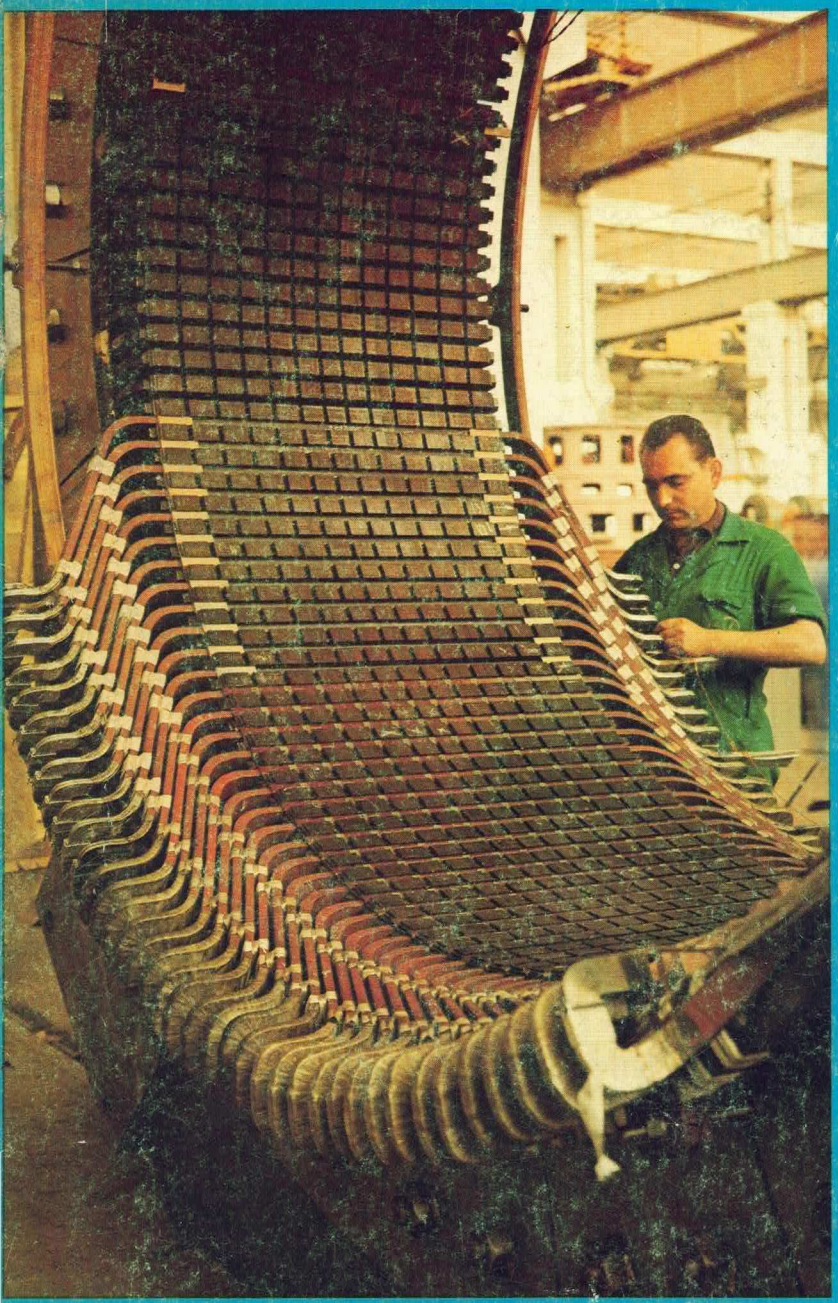
FP2

Equipo EPS Zaragoza

máquinas eléctricas

TECNOLOGÍA 2·1



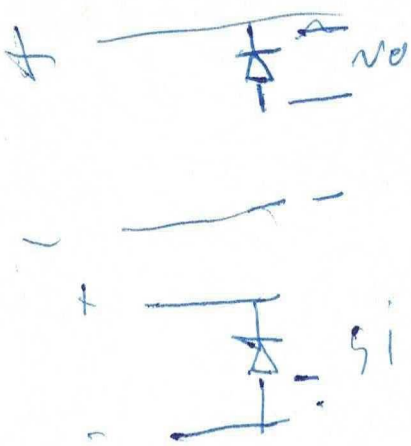
Primer Curso
de Formación Profesional
de Segundo Grado

bruño - edebé
formación profesional

TECNOLOGÍA 2·1

máquinas eléctricas

Primer Curso
de Formación Profesional
de Segundo grado


+
NO.
-
+
Si
-

TECNOLOGÍA 2·1

máquinas eléctricas

Primer Curso
de Formación Profesional
de Segundo Grado

por

RICARDO CASADO VALERO
ingeniero técnico eléctrico
profesor del Instituto Politécnico Virgen del Pilar
de Zaragoza

MARIO RUBIO GARCIA
perito industrial electricista

JOSE LUIS RUIZ LOPEZ
ingeniero técnico electrónico

ANDRES MARTIN BRUN
ingeniero técnico aeronáutico

JESUS POLITE ARBEA
ingeniero técnico electrónico

CARLOS LAHOZ GARCIA
maestro industrial

profesores de las Escuelas Profesionales Salesianas
de Zaragoza

edb formación profesional bruño

EDICIONES DON BOSCO
Paseo San Juan Bosco, 62. Barcelona 17

EDITORIAL BRUÑO
Marqués de Mondéjar, 32. Madrid 28

Tecnología 2.1
MAQUINAS ELECTRICAS

Primer Curso
de Formación Profesional
de Segundo Grado

Fotocolor de la cubierta:
Bobinado de un estator, cortesía de General Eléctrica Española.

Agradecemos la valiosa colaboración prestada por las casas comerciales General Eléctrica Española, Alconza, Westinghouse y Fagor, en la elaboración de esta obra.
Asimismo, al Instituto Nacional de Racionalización y Normalización, Madrid.

ES PROPIEDAD
© *Ediciones Don Bosco*
Barcelona, 1978

Impreso en España
Printed in Spain

ISBN 84-236-1358-5
Depósito Legal. B. 2234-78

Escuela Gráfica Salesiana
Barcelona-Sarriá

Presentación

El presente libro de Tecnología, sobre el estudio de las Máquinas Electricas, ha sido especialmente estructurado y presentado para su aplicación al 2.º grado de la Enseñanza de Formación Profesional.

Para su elaboración, al construir el esquema general de la obra, se han tenido muy presentes las últimas aportaciones teóricas y prácticas aparecidas en este campo. En este sentido, y al final de cada tema, ha sido refrendada la bibliografía consultada, e incluso aquélla que se ha considerado importante para los distintos aspectos allí tratados.

Debido al intento de actualizar el tratamiento y la forma del tema no se han seguido los índices oficiales, sino que se han ampliado y modernizado, en orden a la cada día más importante especialización técnica. Las previsiones oficiales, válidas unos años atrás, han quedado superadas hoy día por nuevas aportaciones; e incluso la incidencia de otras ramas técnicas ha abierto nuevos cauces hasta hace poco desconocidos. En este espíritu superador ha sido elaborado el presente libro, cuya extensión, por las razones antes señaladas, también sobrepasa las previsiones y las normas hasta ahora establecidas.

Dado este nuevo carácter y en evitación de presentar un texto en exceso denso, se han incluido gran cantidad de ejercicios resueltos, que no sólo diluyen el contenido, sino que facilitan la mejor comprensión de los distintos temas.

Todas estas consideraciones sirven de perfecta introducción al objeto pretendido de un libro especializado como éste; objetivo que no es otro que el de formar especialistas.

Por si algún recelo de operatividad pudiese levantar el tema concreto de la obra, Máquinas eléctricas de corriente continua, *es necesario precisar que la evolución tecnológica arroga a este tema la importancia que le confieren las ventajas de control y automatización electrónicas, tan en boga actualmente.*

LOS AUTORES

CUESTIONARIO OFICIAL

O. M. 13-IX-75; BOMEC, 17-XI-75

Especialidad: Máquinas Eléctricas

Máquinas rotativas de corriente continua

Dínamos. Producción de la energía eléctrica. Máquina teórica simple. Colectores. Máquinas industriales. Magneto. Anillo de Gramme. Circuitos derivados. Corrientes de Foucault. Clasificación de los inducidos. Discos para inducidos. Histéresis. Fijación al árbol. Centrado y ventilación.

Circuito inducido y colector. Devanados: elección de los mismos. Esquema de representación. Conexión de conductores. Números de circuitos derivados. División de los devanados: fórmula general de los devanados. Devanados imbricados. Tablas de conexiones. Situación de las escobillas.

Devanados ondulados. Multiplicación de las escobillas. Devanados en series paralelas. Devanados especiales: inducidos con dos colectores. Colector Mordey. Comparación de los arrollamientos imbricados y ondulados. Conexiones equipotenciales.

F. e. m. y resistencia interior de un inducido. Secciones inducidas. Reacción del inducido. Velocidad. Escobillas. Desgaste del colector y de las escobillas. Potenciales en el colector. Pérdidas en el inducido. Temperaturas.

Excitación de las dínamos. Excitación magnética. Excitación independiente. Autoexcitación. Serie, derivación y compuesta. Reguladores de tensión y de corriente. Reguladores automáticos. Acoplamientos de dínamos en serie y en derivación.

Circuito magnético de las dínamos. Inductores: tipos bipolares y multipolares. Metales empleados. Devanado inductor. Núcleos y piezas polares. Flujo inductor. Coeficiente de dispersión. Fuerza magnetomotriz. Ampervueltas de excitación. Efectos magnéticos de la armadura. Flujos antagonistas y transversal. Ampervueltas totales. Condición límite y de autoexcitación. Entrehierro.

Conmutación. Límite de producción de un inducido. Corrientes en las escobillas. Autoinducción en la sección conmutada y variación de la corriente en la misma. Desvío de las escobillas. Polos auxiliares.

Motores de corriente continua. Reversibilidad de las dínamos. Sentido de rotación. Posición de las escobillas. Polos auxiliares. Fuerza contraelectromotriz. Potencias eléctrica y mecánica. Pares motor y resistentes. Rendimiento eléctrico e industrial. Motor serie funcionando a tensión constante. Puesta en marcha. Regulación de la velocidad. Cambio del sentido de rotación.

Motor shunt a tensión constante. Puesta en marcha. Regulación de la velocidad. Disyuntores de seguridad. Cambio del sentido de rotación. Motor compuesto serie adicional. Motor compuesto autorregulador. Arranque automático de los motores.

Reóstatos y reguladores para máquinas de corriente continua. Reóstatos para dínamos. Reguladores de tensión. Intensidad de excitación. Determinación experimental. Método de la característica. Cálculo aproximado. Reguladores de corriente para dínamos. Intensidades de excitación: métodos experimental y aproximado. Dínamos con excitación compuesta. Reóstatos para motores: de arranque y de regulación de velocidad. Cálculos gráficos. Aceleradores de velocidad para motores shunt. Regulación electrónica de máquinas de corriente continua: tipos y aplicaciones.

Ensayos de máquinas de corriente continua. Elevación de las temperaturas: límites. Como de máquinas de gran potencia. Medición por variación de resistencias. Aislamiento. Rigidez dieléctrica. Rendimiento. Medida directa del rendimiento de un motor y una dínamo. Métodos de Hopkinson y Kapp. Método de las pérdidas separadas. Determinación de las pérdidas en una dínamo y en un motor. Característica externa. Determinación experimental. Característica de velocidad. Característica interna de un motor. Pérdidas mecánicas y magnéticas de un motor serie.

Convertidores rotativos. Grupos motor-generador: tipos. Conmutatrices: principio y utilización.

Convertidores estáticos. Ignitrón. Tiratrón. Diodo semiconductor. Rectificadores de selenio, óxido de cobre, silicio y germanio. Puentes de rectificación. Onduladores: principio y tipos.

Acumuladores y pilas. Pilas secas. Pilas patrones. Acumuladores: tipos. Construcción y características de los distintos tipos de acumuladores. Carga de un acumulador. Averías y mantenimiento de acumuladores.

Baños electrolíticos industriales. Aplicación industrial de la electrólisis. Protección de superficies metálicas. Circuitos especiales para baños electrolíticos.

Indice

Presentación 5

Cuestionario Oficial 6

Indice. 7

1 Principios generales de Electricidad y Magnetismo 15

1.1 *Objeto de las máquinas eléctricas* 15
1.2 *Clasificación general de las máquinas eléctricas* 15
1.2.1 Generadores 16
1.2.2 Motores 17
1.2.3 Transformadores 17
1.2.4 Convertidores rotativos 17
1.3 *El convertidor electromecánico de energía* 18
1.4 *Conceptos generales sobre Electricidad y Magnetismo* 19
1.5 *Conceptos de Magnetismo* 19
1.6 *Conceptos de Electromagnetismo* 20
1.7 *Unidades más utilizadas en Electricidad y Magnetismo* 21
1.8 *Valores nominales y características de funcionamiento de las máquinas de corriente continua* 22

2 Funcionamiento de la máquina de corriente continua como generador 24

2.1 *Estudio de la inducción electromagnética* 24
2.1.1 Experiencias 24
2.1.2 Resumen 25
2.1.3 Deducción de la f. e. m. inducida 25
2.1.4 Sentido de la f. e. m. inducida 26
2.2 *F. e. m. inducida en una espira que gira en un campo magnético. Datos* 28
2.2.1 Valor de la f. e. m. inducida 29
2.2.2 Resumen 29
2.3 *Colectores* 30
2.3.1 Escobillas y colector de anillos 30
2.3.2 Colector de un anillo 31
2.4 *F. e. m. inducida en un sistema de espiras que giran en un campo magnético* 32
2.4.1 Inducido con 4 espiras 32
2.4.2 Inducido con 6 espiras 33
2.4.3 Inducido con 8 espiras 34
2.4.4 Inducido de una máquina real 35
2.5 *Dínamo Gramme bipolar* 35
2.5.1 Partes principales 36
2.5.2 Funcionamiento 36
2.5.3 Diagrama de potenciales en el colector 37
2.6 *Dínamo Gramme multipolar* 37
2.6.1 Clasificación 37
2.6.2 Funcionamiento 37
2.7 *Desarrollo histórico de las dínamos* 38
2.7.1 Evolución de la dínamo Gramme 38
2.8 *Partes básicas de una máquina de corriente continua real* 38
2.8.1 Inductor 39
2.8.2 Inducido 39
2.8.3 Escobillas 40
2.8.4 Entrehierro 40
2.8.5 Cojinetes 40

3 Devanados del inducido 42

3.1 *Generalidades sobre devanados* 42
3.1.1 Clasificación 42
3.1.2 Comparación de los devanados en anillo y en tambor 44
3.2 *Norma exigible a un devanado en tambor* 44
3.2.1 Paso polar 44
3.3 *Conceptos generales sobre los devanados en tambor* 45
3.3.1 Elementos del núcleo magnético inducido 45
3.3.2 Términos relativos a los devanados 45
3.4 *Estudio del circuito eléctrico del devanado inducido* 47
3.4.1 Devanado formado por bobinas iguales 47
3.4.2 Devanado formado por bobinas diferentes 49
3.4.3 Casos particulares 50
3.5 *Tipos de devanado en tambor* 51
3.5.1 Devanado imbricado 51
3.5.2 Devanado ondulado 51
3.6 *Estudio del devanado imbricado simple* 52

3.6.1 Tipos de devanado imbricado simple 52
3.6.2 Normas necesarias para un devanado imbricado simple 52
3.6.3 Conexiones equipotenciales 53
3.6.4 Cálculo de un devanado imbricado simple 53
3.7 *Estudio del devanado imbricado múltiple* 57
3.7.1 Necesidad de este devanado 57
3.7.2 Devanado imbricado doble 57
3.7.3 Normas necesarias para un devanado imbricado doble 58
3.7.4 Cálculo de un devanado imbricado doble 58
3.8 *Estudio del devanado ondulado en serie* 60
3.8.1 Tipos de devanado ondulado 60
3.8.2 Normas necesarias en un devanado ondulado en serie normal 61
3.8.3 Devanado ondulado en serie con una sección muerta 61
3.8.4 Cálculo de un devanado ondulado en serie 61
3.9 *Estudio del devanado ondulado en serie-paralelo* 63
3.9.1 Necesidad de este devanado 63
3.9.2 Devanado ondulado en serie-paralelo 64
3.9.3 Normas necesarias en el devanado ondulado en serie-paralelo 65
3.9.4 Cálculo de un devanado en serie-paralelo 65
3.10 *Resumen para la elección de un devanado de inducido* 66

4 Magnitudes eléctricas y mecánicas del inducido 68

4.1 *Conversión de la energía en el inducido* 68
4.1.1 Principio de la energía aplicado al generador 68
4.1.2 Principio de la energía aplicado al motor 69
4.2 *Resistencia interior del inducido* 69
4.2.1 Resistencia del devanado inducido 69
4.2.2 Resistencia de las escobillas 71
4.2.3 Resistencia de contacto 71
4.2.4 Resistencia global del inducido 71
4.3 *Intensidad de corriente en una rama del devanado inducido* 71
4.4 *F. e. m. inducida en una máquina de corriente continua* 72
4.4.1 Deducción de la f. e. m. a partir de un sistema de espiras giratorias 73
4.4.2 Deducción de la f. e. m. a partir de la ley de inducción electromagnética 73
4.5 *La máquina de c. c. como generador* 75
4.5.1 Tensión en bornes de un generador 75
4.6 *La máquina de c. c. como motor* 79
4.6.1 Fuerza contraelectromotriz del inducido 79
4.6.2 Tensión aplicada a un motor 79
4.7 *Sentidos de giro del generador-motor* 82
4.8 *Par interno del inducido de una máquina de c. c.* 83
4.8.1 Deducción de la fórmula del par 83
4.8.2 Adaptación de la fórmula del par a magnitudes y unidades prácticas 84
4.8.3 Par útil en el eje del motor 86
4.8.4 Par resistente del generador 87
4.8.5 Potencia transformada en el inducido 87
4.9 *Rendimiento eléctrico del inducido* 87
4.9.1 Rendimiento eléctrico del inducido de un generador 88
4.9.2 Rendimiento eléctrico del inducido de un motor 88

5 Circuito mágnético de la máquina de corriente continua 91

5.1 *Conceptos fundamentales sobre Magnetismo* 91
5.1.1 Campo magnético generado por una corriente eléctrica 91
5.1.2 Intensidad del campo magnético 92
5.1.3 Inducción magnética ($\vec{B}$) 92
5.1.4 Permeabilidad magnética 93
5.1.5 Circuito magnético 94
5.2 *Cálculo de los circuitos magnéticos* 95
5.2.1 Cálculo directo de un circuito magnético 95
5.2.2 Cálculo inverso de un circuito magnético 96
5.2.3 Cálculo de un circuito magnético derivado 97
5.2.4 Dispersión del flujo 98
5.3 *Circuito magnético de una máquina de corriente continua* 99
5.3.1 Datos de partida 99
5.3.2 Cálculo del circuito magnético 99
5.3.3 Estudio de la curva de magnetismo correspondiente a una máquina de c. c. 101
5.4 *Fuerza magnetomotriz necesaria cuando la máquina funciona en vacío* 102
5.5 *Fuerza magnetomotriz necesaria cuando la máquina funciona en carga* 104
5.5.1 Caídas de tensión internas 104
5.5.2 Variaciones de la f. e. m. por reacción de inducico 105
5.6 *Reacción del inducido* 105
5.6.1 Campo resultante 106
5.6.2 Efectos de la reacción del inducido 106
5.6.3 Modificación de la posición de las escobillas 107
5.6.4 Flujo antagonista 107
5.6.5 Flujo transversal 108
5.7 *Ampervueltas totales en carga* 108

6 Conmutación 110

6.1 *Introducción* 110
6.1.1 F. e. m. de autoinducción 111
6.1.2 Producción de chispas en el colector 112
6.2 *Proceso de conmutación* 112
6.2.1 Estudio de la variación de corriente en función del tiempo 113
6.2.2 Diagrama de la variación de corriente en la bobina cortocircuitada 113
6.2.3 F. e. m. del circuito de conmutación 114
6.2.4 Ecuación general de la conmutación 114

6.3 *Condiciones para conseguir una buena conmutación* 115
6.3.1 Densidades de corriente 115
6.3.2 Diagramas de las variaciones de corrientes en la conmutación 115
6.3.3 Conmutación lineal 115
6.4 *Conmutación sobre la línea neutra* 116
6.4.1 Imposibilidad de lograr la conmutación lineal sobre la línea neutra 116
6.4.2 Resumen sobre la conmutación en la línea neutra 116
6.5 *Conmutación con las escobillas decaladas* 116
6.5.1 Conmutación sin chispas 117
6.5.2 Inconvenientes del decalaje de escobillas en la conmutación 117
6.6 *Conmutación real, cubriendo una escobilla varias delgas* 117
6.6.1 Diagrama de la conmutación 117
6.6.2 Gráfico de la variación de corriente en las bobinas que conmutan 118
6.6.3 Estudio de la corriente que llega a una delga 118
6.7 *Normas aconsejables para mejorar la conmutación* 119
6.7.1 Normas para evitar las causas mecánicas de las chispas 119
6.7.2 Condiciones eléctricas que debe reunir una buena conmutación 119
6.8 *Medios utilizados para lograr una buena conmutación* 120
6.8.1 Polos auxiliares de conmutación 120
6.8.2 Devanados de compensación 122
6.8.3 Aplicaciones de los polos de conmutación y devanados compensadores. 122

7 Aspectos de la construcción de las máquinas eléctricas de corriente continua 124

7.1 *Productos siderúrgicos* 125
7.1.1 El hierro 125
7.1.2 Acero 125
7.1.3 Chapa 126
7.1.4 Fundiciones 127
7.1.5 Aplicaciones de los productos siderúrgicos a la construcción de máquinas eléctricas 127
7.2 *Materiales conductores eléctricos* 127
7.2.1 El cobre 127
7.2.2 Aluminio 127
7.2.3 Carbón 128
7.2.4 Aleaciones 128
7.3 *Materiales aislantes* 128
7.3.1 Aislantes utilizados en la construcción de máquinas eléctricas 129
7.4 *Elementos estructurales de una máquina de corriente continua* 131
7.4.1 Partes del estator 131
7.4.2 Partes del rotor 132
7.5 *Elementos eléctricos y mecánicos del estator* 132
7.5.1 Pieza polar (polo principal) 132
7.5.2 Polo auxiliar o de conmutación 132
7.5.3 Armazón o carcasa 133
7.6 *Elementos eléctricos y mecánicos del inducido (rotor)* 133
7.6.1 Núcleo del inducido 133
7.6.2 Eje 134
7.6.3 Cojinetes 135
7.6.4 Devanado inducido 136
7.6.5 Colector 137
7.6.6 Inducido completo 138
7.6.7 Conjunto de escobillas y portaescobillas 139
7.7 *Condiciones de funcionamiento de las máquinas eléctricas de c. c.* 139
7.7.1 Tipos de protección de las máquinas de c. c. 140
7.7.2 Refrigeración de las máquinas 140
7.7.3 Aislamiento de las máquinas eléctricas 141

8 Sistemas de excitación de los generadores. Características del generador de excitación independiente 143

8.1 *Excitación de los generadores* 143
8.1.1 Imán permanente 143
8.1.2 Excitación 144
8.2 *Clasificación de los generadores por su excitación* 144
8.2.1 Dínamo de excitación independiente 144
8.2.2 Dínamo autoexcitada 144
8.2.3 Tipos de dínamos autoexcitadas 145
8.3 *Características fundamentales del generador de corriente continua* 149
8.3.1 Curvas características 149
8.3.2 Tipos de curvas características 149
8.4 *Estudio de la dínamo de excitación independiente* 150
8.5 *Característica en vacío* 150
8.5.1 Interpretación de la curva 150
8.5.2 Ciclo de histéresis del material 151
8.5.3 Influencia de la velocidad en la curva de vacío 151
8.5.4 Resumen de las características de vacío 152
8.6 *Características en carga* 152
8.6.1 Análisis de la curva 153
8.6.2 Reparto de caídas de tensión 153
8.6.3 Determinación de los ampervueltas inductores 153
8.6.4 Resumen 154
8.7 *Características de regulación y de cortocircuito* 154
8.7.1 Características de regulación de la dínamo de excitación independiente 154
8.7.2 Característica de cortocircuito de la dínamo de excitación independiente 155
8.8 *Característica exterior e interior* 155
8.8.1 Característica exterior de la dínamo de excitación independiente 155
8.8.2 Característica interior de la dínamo de excitación independiente 156

9 Características de los generadores autoexcitados 160

9.1 *Estudio de la dínamo con excitación en derivación* 160
9.1.1 Característica en vacío 160
9.1.2 Característica en carga $V_b = f(I_{ex.})$ 163
9.1.3 Características de regulación y de cortocircuito 164

9.1.4 Característica exterior 164
9.1.5 Característica interior 168
9.2 *Dínamo con excitación en serie* 170
9.2.1 Característica en vacío 170
9.2.2 Característica en carga 170
9.2.3 Característica exterior 170
9.2.4 Característica interior 171
9.3 *Dínamo con excitación mixta o compound* 173
9.3.1 Característica en vacío 173
9.3.2 Característica exterior 173
9.4 *Comparación y aplicación de los principales tipos de generadores* 175
9.4.1 Dínamo de excitación independiente 175
9.4.2 Dínamo con excitación en derivación 175
9.4.3 Dínamo con excitación en serie 176
9.4.4 Dínamo con excitación compound 176

10 Acoplamiento de generadores de corriente continua 179

10.1 *Generalidades* 179
10.1.1 Necesidad del acoplamiento 179
10.2 *Tipos de acoplamiento* 180
10.2.1 Acoplamiento en serie 180
10.2.2 Acoplamiento en paralelo 181
10.3 *Acoplamiento de generadores de excitación independiente* 183
10.3.1 Condiciones previas al acoplamiento en derivación 183
10.3.2 Maniobras para el acoplamiento 185
10.3.3 Maniobras para la desconexión 185
10.4 *Acoplamiento de generadores de excitación en derivación* 189
10.4.1 Acoplamiento de generadores de excitación en derivación 189
10.4.2 Acoplamiento en paralelo de generadores con excitación derivación 189
10.4.3 Estudio gráfico del acoplamiento en paralelo de generadores derivación 191
10.5 *Acoplamiento de generadores de excitación serie* 194
10.5.1 Acoplamiento en serie de generadores serie 195
10.5.2 Acoplamiento en paralelo de generadores serie 195
10.6 *Acoplamiento de generadores de excitación compuesta* 195
10.6.1 Acoplamiento en paralelo de generadores compound 195

11 Funcionamiento de la máquina de corriente continua como motor 198

11.1 *Generalidades* 198
11.2 *Fundamento del motor de c. c.* 199
11.2.1 Valor de la fuerza electromagnética en un conductor 199
11.2.2 Sentido de la fuerza electromagnética producida en un conductor 200
11.2.3 Aplicación de la fuerza electromagnética al motor de c. c. 200
11.3 *Variables fundamentales de un motor de c. c.* 200
11.3.1 Fuerza contraelectromotriz 200
11.3.2 Par motor 201
11.3.3 Velocidad de rotación 201
11.3.4 Corriente absorbida por un motor de c. c. 201
11.4 *Corriente absorbida en el arranque del motor de c. c.* 201
11.4.1 Corriente absorbida en el arranque directo a la red 202
11.5 *Características fundamentales del motor de c. c.* 203
11.5.1 Curvas características electromecánicas 203
11.5.2 Importancia de la característica mecánica 204
11.6 *Estudio del tiempo de arranque de un motor de c. c.* 204
11.6.1 Par motor 204
11.6.2 Momento de inercia mecánico. Par de inercia 204
11.6.3 Tiempo de arranque del motor 206
11.6.4 Variación del par y del factor de inercia con la velocidad 207
11.7 *Estabilidad de funcionamiento de un motor* 208
11.7.1 Funcionamiento estable 208
11.7.2 Funcionamiento inestable 209
11.7.3 Curvas de pares resistentes 209

12 El motor de corriente continua en servicio 211

12.1 *Clasificación de los motores de c. c.* 211
12.1.1 Tipos de motores según su excitación 211
12.1.2 Tipos de motores según su funcionamiento 212
12.1.3 Comparación entre los motores de excitación independiente y derivación 212
12.2 *Características generales utilizadas en los motores* 212
12.2.1 Expresión general de la velocidad 212
12.2.2 Expresión general del par motor 212
12.3 *Motor de excitación en derivación* 213
12.3.1 Características de velocidad 213
12.3.2 Característica del par motor 214
12.3.3 Característica mecánica 214
12.4 *Motor de excitación en serie* 215
12.4.1 Características de velocidad 215
12.4.2 Característica de par motor 217
12.4.3 Característica mecánica 217
12.5 *Motor de excitación compound* 219
12.5.1 Características del motor compound aditiva 219
12.5.2 Características del motor compound diferencial 220
12.6 *Comparación y aplicación de los principales tipos de motores de c. c.* 221
12.6.1 Motor de excitación independiente 221
12.6.2 Motor de excitación en derivación 221
12.6.3 Motor de excitación serie 221
12.6.4 Motor de excitación compound 222

13 Convertidores estáticos 224

13.1 *Introducción* 224
13.2 *Conceptos generales sobre rectificadores* 224
13.3 *Funcionamiento de los rectificadores* 225
13.4 *Rectificadores de vapor de mercurio* 225
13.4.1 Anodo de encendido 225
13.5 *Rectificador monofásico de vapor de mercurio* 225

13.6 *Rectificadores de vapor de mercurio polifásicos* 226
13.6.1 Rectificador de vapor de mercurio trifásico 226
13.6.2 Rectificador de vapor de mercurio hexafásico 226
13.7 *Consideraciones generales* 226
13.7.1 Mantenimiento del vacío 226
13.7.2 Refrigeración 227
13.7.3 Características de los rectificadores de vapor de mercurio 227
13.8 *Ignitrón* 227
13.8.1 Funcionamiento del ignitrón 228
13.8.2 Ignitrones para rectificación 228
13.9 *Tiratrones* 228
13.9.1 Características de los gases 228
13.9.2 Cátodo 229
13.9.3 Anodo 229
13.9.4 Rejilla 229
13.9.5 Funcionamiento 229
13.9.6 Características de gobierno de un tiratrón 230
13.10 *Tiratrón tetrodo* 230
13.11 *Aplicación como rectificadores* 231
13.12 *Otros modos de control* 231
13.13 *Diodos semiconductores* 232
13.13.1 Características generales 232
13.14 *Rectificador de silicio* 232
13.14.1 Construcción 232
13.15 *Rectificadores de germanio* 233
13.15.1 Construcción 233
13.15.2 Características 233
13.16 *Rectificadores de óxido de cobre* 234
13.16.1 Construcción 234
13.16.2 Características 234
13.17 *Rectificadores de selenio* 234
13.17.1 Construcción 234
13.17.2 Funcionamiento 235
13.17.3 Características 235
13.18 *Circuito rectificador de onda completa* 236
13.18.1 Valor de la intensidad 236
13.18.2 Valor de las potencias y del rendimiento 237
13.19 *Puentes de rectificación* 237
13.19.1 Rectificador monofásico de onda completa o rectificador en puente 237
13.19.2 Rectificador trifásico de onda completa o rectificador trifásico en puente 239
13.20 *Tiristores* 240
13.20.1 Fundamentos 240
13.20.2 Clasificación de los tiristores 241
13.21 *Onduladores* 243
13.21.1 Clasificación 243
13.21.2 Principio de funcionamiento 243
13.21.3 Ondulador mediante vibrador de tiristores 244
13.21.4 Ondulador en puente 244
13.21.5 Generalidades 244

14 Dispositivos de regulación y control de las características de un generador de corriente continua 247

14.1 *Generalidades* 248
14.2 *Reóstatos de campo* 248
14.2.1 Reóstatos de campo en serie con el devanado inductor 248
14.2.2 Reóstato de campo en derivación con el campo inductor 249
14.3 *Cálculo teórico del regulador de tensión* 249
14.3.1 Cálculo teórico del reóstato en el generador derivación 250
14.3.2 Cálculo teórico del regulador de tensión en el generador serie 251
14.4 *Cálculo del regulador de tensión por el método de la característica* 253
14.5 *Cálculo del regulador de corriente* 255
14.5.1 Cálculo de un regulador de corriente por el método de la característica 255
14.6 *Regulador automático de tensión* 256
14.6.1 Reguladores clásicos 257
14.6.2 Regulador de tensión de un elemento 257
14.6.3 Regulador de tensión de tres elementos 257
14.7 *Sistemas automáticos de regulación. Regulación de tensión por control electrónico* 258
14.7.1 Esquemas de bloques 258
14.7.2 Componentes de los servomecanismos 259
14.7.3 Regulación de la tensión en un generador de c. c. por control electrónico 260

15 Dispositivos de regulación y control de las características de un motor de corriente continua 262

15.1 *Cálculo de reóstatos de arranque* 263
15.1.1 Cálculo gráfico de las resistencias de un reóstato de arranque 263
15.1.2 Determinación del número de pasos del reóstato 264
15.2 *Constitución de los reóstatos de arranque. Tipos de reóstatos* 265
15.2.1 Tipos de reóstatos de arranque 266
15.3 *Sistemas utilizados para la regulación de la velocidad* 268
15.3.1 Control reostático en el inducido 268
15.3.2 Regulación por acoplamiento de motores 270
15.3.3 Grupo Ward-Leonard 271
15.3.4 Regulación del flujo inductor 272
15.3.5 Comparación de sistemas de regulación 273
15.4 *Inversión del sentido de marcha de un motor* 274
15.4.1 Inversión del sentido de giro en el motor de excitación independiente 274
15.4.2 Inversión del sentido de giro en el motor derivación 275
15.4.3 Inversión del sentido de giro en el motor serie 275
15.4.4 Inversión del sentido de giro en el motor compound 275
15.5 *Frenado eléctrico del motor de c. c.* 275
15.5.1 Frenado dinámico 275
15.5.2 Frenado por recuperación 276
15.5.3 Frenado por inversión de corriente 277
15.6 *Control electrónico del motor de c. c.* 277
15.6.1 Esquema de bloques correspondiente al accionamiento del motor de c. c. 278
15.6.2 Funcionamiento 278

16 **Pérdidas y rendimiento de las máquinas de corriente continua a partir de los ensayos. Ensayos generales** 281

16.1 *Generalidades* 281
16.2 *Pérdidas: su clasificación y determinación* 282
16.2.1 Pérdidas en el circuito de excitación 282
16.2.2 Pérdidas constantes (pérdidas independientes de la intensidad) 282
16.2.3 Determinación de las pérdidas constantes 283
16.2.4 Pérdidas en carga (pérdidas normales dependientes de la intensidad) 283
16.2.5 Pérdidas adicionales en carga 284
16.3 *Rendimiento de las máquinas de c. c.* 284
16.3.1 Determinación del rendimiento 285
16.4 *Calentamiento. Ensayo de calentamiento* 286
16.4.1 Tipos de servicio 287
16.4.2 Ensayo de calentamiento 288
16.4.3 Métodos de medición de temperaturas 288
16.4.4 Duración de los ensayos de calentamiento 291
16.5 *Ensayos de aislamiento* 291
16.5.1 Medición de la resistencia de aislamiento 291
16.5.2 Ensayos dieléctricos 292
16.6 *Características y ensayos diversos* 294
16.6.1 Sobreintensidad momentánea de los generadores 294
16.6.2 Exceso momentáneo de par del motor de c. c. 294
16.6.3 Sobrevelocidad 294
16.6.4 Ensayo de conmutación 294

17 **Ensayos propios de generadores de c. c.** 296

17.1 *Determinación de la característica de vacío* 297
17.1.1 Modo de trabajo 297
17.1.2 Toma de valores 298
17.1.3 Representación de la característica del generador de excitación independiente 298
17.1.4 Observaciones necesarias durante el ensayo 298
17.1.5 Característica de vacío de los generadores autoexcitados 299
17.2 *Determinación de la característica en carga* 299
17.2.1 Modo de trabajo 300
17.2.2 Toma de valores 300
17.2.3 Representación de la característica del generador de excitación independiente 301
17.2.4 Observaciones 301
17.2.5 Característica en carga de los generadores autoexcitados 301
17.3 *Determinación de la característica en cortocircuito* 301
17.3.1 Modo de trabajo 301
17.3.2 Toma de valores y representación de la característica del generador de excitación independiente 302
17.3.3 Observaciones 302
17.4 *Determinación de la característica de regulación* 302
17.4.1 Modo de trabajo 302
17.4.2 Toma de valores y representación de la característica del generador de excitación independiente 302
17.4.3 Observaciones 302
17.4.4 Característica de regulación de los generadores autoexcitados 302
17.5 *Determinación de las características exterior e interior* 303
17.5.1 Modo de trabajo 303
17.5.2 Toma de valores 304
17.5.3 Observaciones 304
17.5.4 Característica exterior de los generadores autoexcitados 304
17.6 *Determinación del rendimiento de un generador* 305
17.6.1 Medida directa del rendimiento 306
17.6.2 Medida indirecta del rendimiento 306

18 **Ensayos propios de los motores de c. c.** 309

18.1 *Generalidades* 309
18.2 *Medida de la potencia mecánica* 310
18.2.1 Freno mecánico 310
18.2.2 Frenos electromagnéticos 311
18.2.3 Dínamo-freno 312
18.3 *Determinación de la característica de velocidad* 312
18.3.1 Característica de velocidad del motor derivación 312
18.3.2 Característica de velocidad del motor serie 314
18.3.3 Característica de velocidad del motor compound 314
18.4 *Determinación de la característica de par motor* 314
18.4.1 Característica de par motor del motor derivación 314
18.4.2 Características de par motor en los motores serie y compound 314
18.5 *Determinación de la característica mecánica* 314
18.6 *Determinación del rendimiento de un motor* 315
18.6.1 Medida directa del rendimiento de un motor 315
18.6.2 Medida indirecta del rendimiento de un motor 315

19 **Convertidores rotativos** 318

19.1 *Introducción* 318
19.1.1 Definición 319
19.1.2 Clases de convertidores 319
19.1.3 Ventajas e inconvenientes 319
19.2 *Grupos convertidores* 319
19.2.1 Funcionamiento 319
19.2.2 Motor c. a.-dínamo (c. a./c. c.) 320
19.2.3 Motor de c. c.-alternador (c. c./c. a.) 320
19.2.4 Convertidor de frecuencias 321
19.2.5 El dinamotor 322
19.3 *Conmutatrices* 323
19.3.1 Principio de funcionamiento 323
19.3.2 Utilización de las conmutatrices 323
19.4 *Tensiones de una conmutatriz* 324
19.4.1 Relación de tensiones en una conmutatriz monofásica 324
19.4.2 Relación de tensiones en una conmutatriz polifásica 325
19.5 *Intensidad de una conmutatriz* 325
19.5.1 Relación de las corrientes de una conmutatriz 326
19.6 *Arranque de una conmutatriz* 327

19.6.1 Arranque de una conmutatriz por medios propios 328
19.6.2 Arranque de una conmutatriz por medios auxiliares 329

20 Pilas y acumuladores 330

20.1 *Características generales de las pilas eléctricas* 330
20.1.1 Fuerza electromotriz 331
20.1.2 Resistencia interna 331
20.1.3 Corriente de régimen 332
20.1.4 Capacidad 332
20.2 *Tipos de pilas eléctricas* 332
20.2.1 Pila de Volta o galvánica 332
20.2.2 Pila de Leclanché 332
20.2.3 Pilas secas 332
20.2.4 Pila de Weston 332
20.3 *Acoplamiento de pilas eléctricas* 333
20.3.1 Acoplamiento en serie 333
20.3.2 Acoplamiento en paralelo 334
20.3.3 Acoplamiento mixto 335
20.4 *Acumuladores: generalidades* 336
20.4.1 Componentes constructivos 336
20.4.2 Principio químico de funcionamiento 336
20.4.3 Baterías: su tensión (asociación de vasos) 337
20.4.4 Resistencia interna 337
20.4.5 Capacidad de una batería 337
20.4.6 Rendimiento de un acumulador 338
20.4.7 Clases de acumuladores 338
20.5 *Acumuladores de plomo* 338
20.5.1 Principio de funcionamiento 338
20.5.2 Componentes de un acumulador de plomo 339
20.5.3 Carga de un acumulador 343
20.5.4 Descarga de un acumulador 343
20.6 *Acumuladores alcalinos* 343
20.6.1 Principio de funcionamiento 344
20.6.2 Componentes de un acumulador alcalino 345
20.6.3 Carga de un acumulador 347
20.6.4 Descarga de un acumulador 347
20.7 *Mantenimiento* 348
20.7.1 Reposición de electrólito 348
20.7.2 Reposición de agua destilada 350
20.7.3 Medidas de carga 350
20.7.4 Limpieza y comprobación general 350
20.7.5 Averías 351

21 Baños electrolíticos industriales 355

21.1 *Aplicación industrial de la electrólisis* 355
21.1.1 Galvanostegia 355
21.1.2 Galvanoplastia 355
21.1.3 Refinado de metales electrolíticamente 356
21.2 *Tratamiento previo de los objetos* 356
21.2.1 Limpieza mecánica 357
21.2.2 Limpieza química 357
21.2.3 Limpieza electrolítica 357
21.3 *Utillajes de las instalaciones galvanostégicas* 357
21.4 *Protección de superficies metálicas* 358
21.5 *Circuitos especiales para baños electrolíticos* 360

Apéndice 363

Tema 1

Principios generales de Electricidad y Magnetismo

OBJETIVOS

- *Justificar la importancia actual de las máquinas eléctricas.*
- *Clasificar las máquinas según la transformación de energía que realicen.*
- *Apreciar la relación máquinas eléctricas-electromagnetismo.*
- *Definir los conceptos básicos sobre electricidad y magnetismo.*

GUION

- Objeto de las máquinas eléctricas.
- Clasificación general de las máquinas eléctricas.
- El convertidor electromecánico de energía.
- Conceptos generales sobre electricidad y magnetismo.
- Conceptos de magnetismo.
- Conceptos de electromagnetismo.
- Unidades más utilizadas en electricidad y magnetismo.

PUNTOS CLAVE

- Clasificar los principales grupos de máquinas eléctricas.
- Conceptos de electromagnetismo aplicables a las máquinas eléctricas.

EXPOSICION DEL TEMA

El presente texto se dedica al estudio de las máquinas eléctricas de corriente continua, para lo cual se presupone que el alumno posee los conocimientos básicos de electricidad y magnetismo.

Con objeto de unificar criterios, y antes de pasar al estudio de las máquinas de corriente continua, este tema se dedica al repaso de los conceptos y definiciones generales de Electrotecnia, basados en el Vocabulario Electrotécnico Internacional, a través de las normas UNE.

1.1 Objeto de las máquinas eléctricas

La energía eléctrica es una de las diferentes formas en que se manifiesta la energía en la Naturaleza.

Una de las ventajas que ofrece la energía eléctrica es su posibilidad de transformación en otras formas de energía: mecánica, química, calorífica, etc.

El proceso de conversión de la energía eléctrica en otro tipo de energía se realiza a través de *máquinas* y aparatos eléctricos.

1.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas

Se entiende por máquina eléctrica el conjunto de mecanismos que pueden producir, transformar o aprovechar la energía eléctrica.

Las máquinas se clasifican en cuatro grupos:

A, Generadores.
B, Motores.
C, Transformadores.
D, Convertidores rotativos.

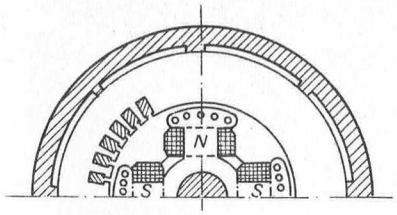
1.2.1 *Generadores*

Son máquinas que producen energía eléctrica por transformación de la energía mecánica.

A su vez, los generadores se clasifican en *dínamos* (fig. 1.1) y *alternadores* (fig. 1.2), según que produzcan corriente continua o alterna, respectivamente.

Posteriormente, cabe destacar otro tipo de generadores (no son máquinas) que transforman la energía química en eléctrica, como son *pilas* y *acumuladores* (figs. 1.3 y 1.4).

En la época actual, se buscan afanosamente otras fuentes de energía, pudiendo servir de ejemplo la *pila solar,* que transforma la energía térmica del Sol en eléctrica.



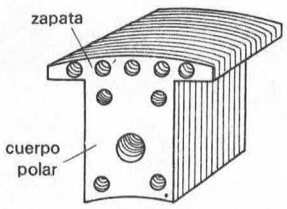


Fig. 1.2 Alternador.

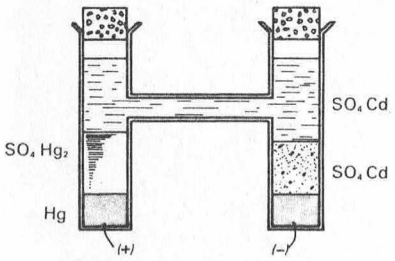


Fig. 1.3 Pila.

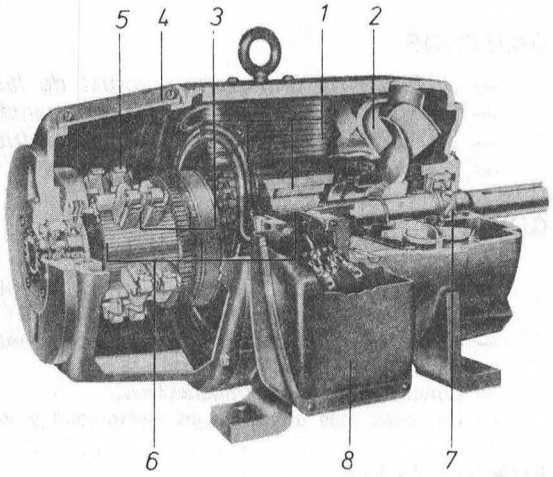


Fig. 1.1 Dínamo: 1, aislamiento; 2, ventilación controlada; 3, colector; 4, soporte lado colector; 5, conjunto de escobillas; 6, inducido; 7, cojinetes; 8, caja de bornas.

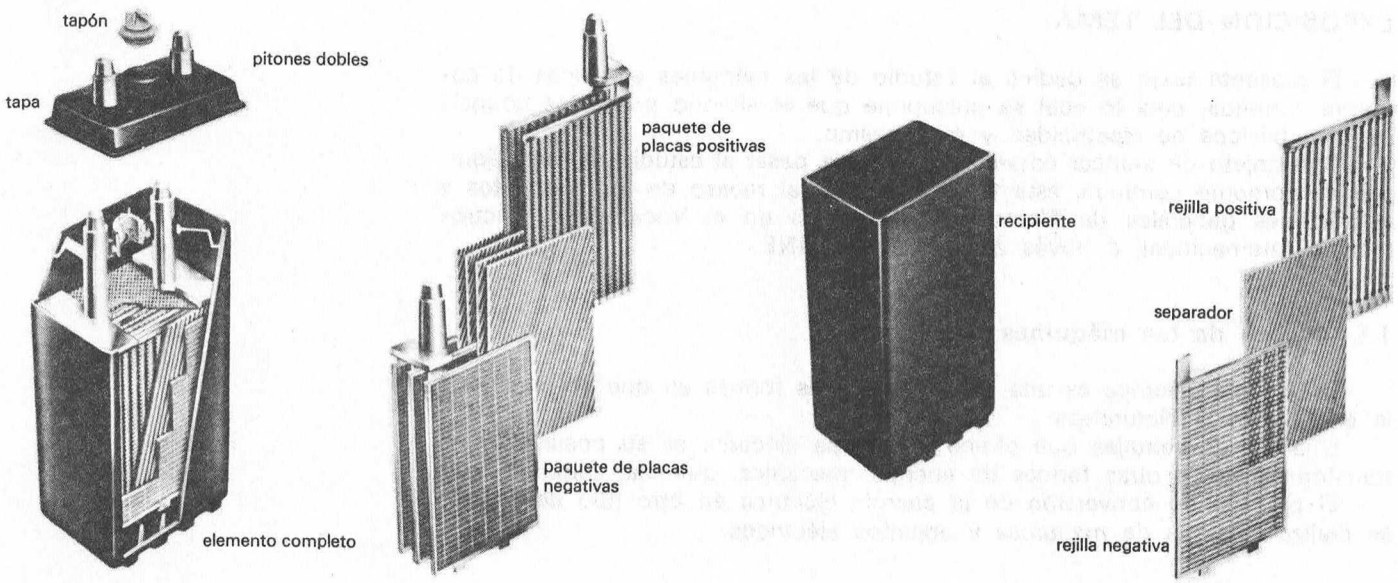


Fig. 1.4 Acumulador.

1.2.2 *Motores*

Son las máquinas que producen energía mecánica por transformación de la energía eléctrica.

Según la corriente que se utiliza, se clasifican en motores de corriente continua (fig. 1.5), y motores de corriente alterna (fig. 1.6).

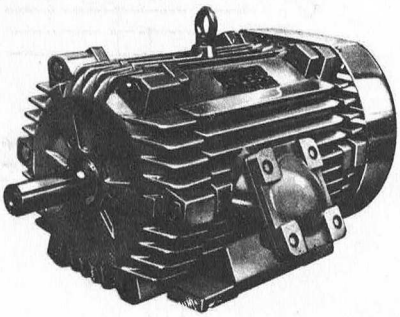


Fig. 1.6 Motor de c. a.

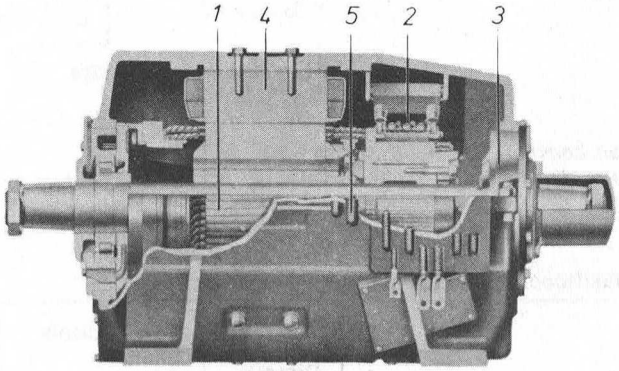


Fig. 1.5 Motor de c. c.: 1, inducido; 2, conjunto de escobillas; 3, cojinetes; 4, circuito inductor; 5, carcasa.

Los motores de corriente continua pueden ser de cuatro tipos: *independiente, shunt, serie* y *compuesto.*

Los motores de corriente alterna se clasifican en *síncronos, asíncronos* y de *colector.*

Existe un tipo de motores, llamados *universales* (fig. 1.7), que pueden funcionar indistintamente con corriente continua o alterna.

1.2.3 *Transformadores*

Son aparatos estáticos de inducción electromagnética destinados a transformar sistemas de corrientes variables en otros sistemas de corrientes variables, de intensidad y de tensión generalmente diferentes y de la misma frecuencia.

A su vez, los transformadores se subdividen en *transformadores de potencia* (fig. 1.8) y *transformadores de medida* (fig. 1.9).

El *autotransformador* es un transformador en el que los devanados primario y secundario tienen partes comunes.

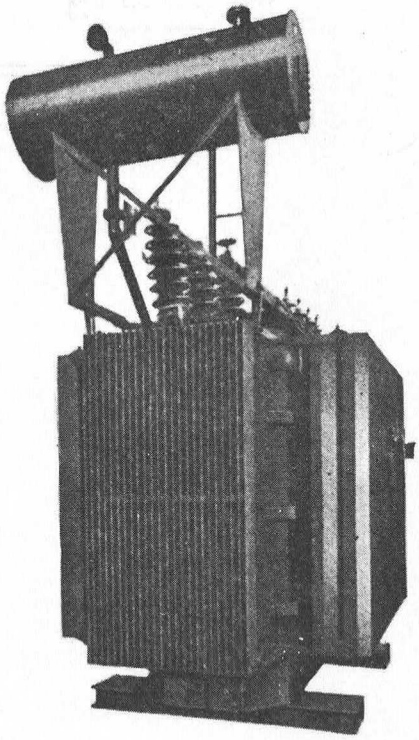


Fig. 1.8 Transformador de potencia.

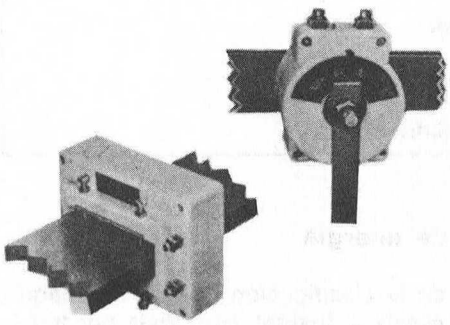


Fig. 1.9 Transformador de intensidad.

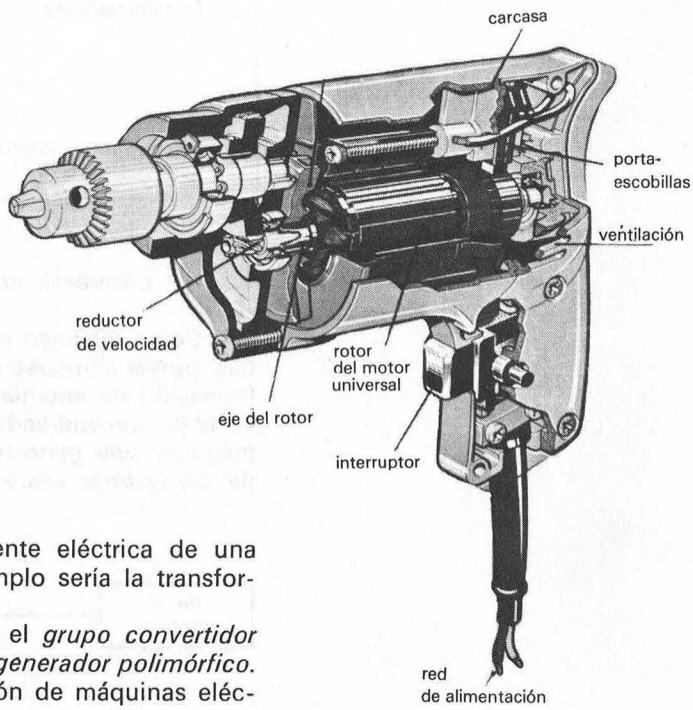


Fig. 1.7 Motor universal.

1.2.4 *Convertidores rotativos*

Son máquinas giratorias destinadas a obtener corriente eléctrica de una cierta especie utilizando otra de especie distinta. Un ejemplo sería la transformación de corriente alterna en continua (fig. 1.10).

Entre los diferentes tipos de convertidores destacan: el *grupo convertidor* (motor eléctrico-generador), la *conmutatriz* (fig. 1.11) y el *generador polimórfico.*

A continuación, se hace un resumen de la clasificación de máquinas eléctricas, según indica la tabla 1.12.

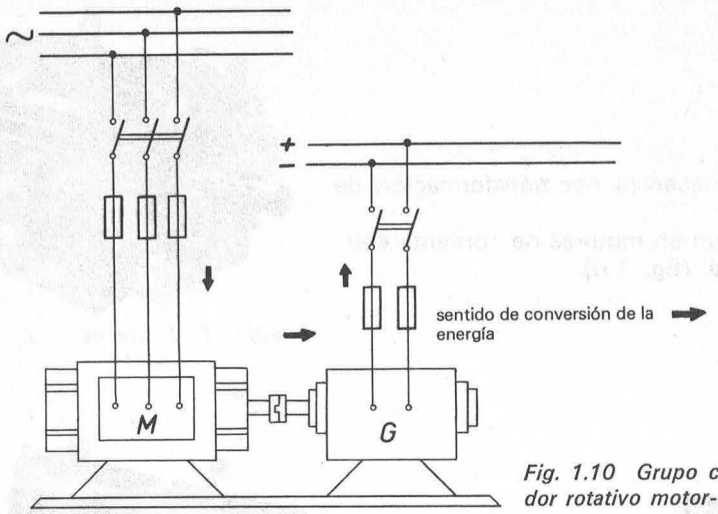


Fig. 1.10 Grupo convertidor rotativo motor-dínamo.

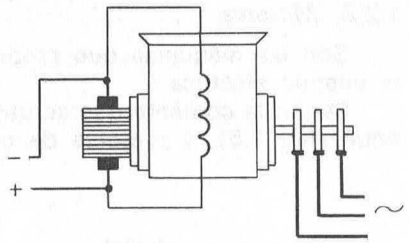


Fig. 1.11 Conmutatriz trifásica.

Tabla 1.12 Clasificación de las máquinas eléctricas

Generadores	De corriente continua	Dínamo	Independiente
			Shunt
			Serie
			Compound
		Pila	
		Acumulador	
		Pila solar	
	De corriente alterna	Alternador	
Motores	De corriente continua	Independiente	
		Shunt	
		Serie	
		Compound	
	De corriente alterna	Síncrono	
		Asíncrono	
		De colector	
	De ambas corrientes	Universal	
Transformadores	De potencia		
	De medida	De tensión	
		De intensidad	
	Autotransformador		
Convertidores rotativos	Grupo convertidor		
	Conmutatriz		
	Generador polimórfico		

1.3 El convertidor electromecánico de energía

Como resumen de los grupos *A* y *B*, de la clasificación general de máquinas, puede afirmarse con seguridad que, a escala industrial, se trabaja por transformación de energía mecánica en eléctrica o viceversa, por ser el proceso reversible. Dependiendo del sentido de la transformación de la energía, la misma máquina será *generador* o *motor,* y en conjunto se le designa con el nombre de *convertidor electromecánico* (fig. 1.13).

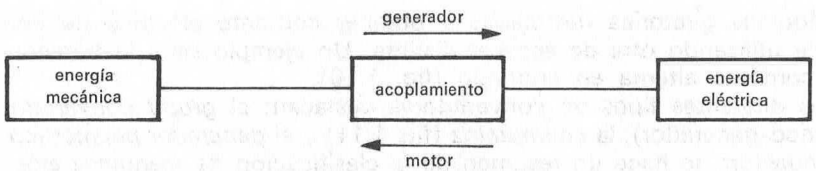


Fig. 1.13 Convertidor electromecánico de energía.

Cuando la máquina funciona como *generador* transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Si la máquina funciona como motor, la energía eléctrica la transforma en energía mecánica.

En ambos casos, generador o motor, la transformación de energías está basada en la acción de los *campos electromagnéticos,* que, a su vez, están ligados a las fuerzas y movimientos.

1.4 Conceptos generales sobre Electricidad y Magnetismo

Con objeto de facilitar el estudio de las *máquinas eléctricas de corriente continua,* a continuación (según Normas UNE) se indican las definiciones de los conceptos más usados en electromagnetismo, así como sus unidades de medida en los sistemas c. g. s. y Giorgi (Internacional).

1.5 Conceptos de Magnetismo

Magnetismo. Parte de la ciencia que trata de las propiedades de los campos magnéticos y de los cuerpos sometidos a su acción.

Campo magnético. Región del espacio en la que existe un estado físico susceptible de manifestarse por fuerzas magnéticas.

Campo magnético terrestre. Campo magnético natural que existe en la Tierra.

Intensidad del campo magnético (H). Magnitud vectorial que equivale a la fuerza puntual que ejerce el campo sobre la unidad de masa magnética situada en dicho punto.

En el sistema c. g. s., la unidad de intensidad de campo es el *oerstedio* (Oe). En el sistema Giorgi, la unidad de intensidad de campo es el *ampervuelta por metro* (Av/m), que equivale a $4 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$ Oe.

Flujo magnético (Φ). Número total de líneas de fuerza que atraviesan una superficie, normal a la dirección del campo magnético.

En el sistema c. g. s., la unidad de flujo de inducción magnética es el *maxvelio* (Mx). En el sistema Giorgi, la unidad de flujo es el *weberio* (Wb), que equivale a 10^8 Mx.

Inducción magnética (β). Magnitud vectorial que equivale al número de líneas de fuerza por unidad de superficie.

En el sistema c. g. s., la unidad de inducción es el *gausio* (Gs). En el sistema Giorgi, la unidad de inducción es el *tesla* (T) que equivale a 10^4 Gs.

Permeabilidad absoluta de una sustancia (μ_a). Cociente de la inducción magnética por la intensidad de campo magnético. Es una magnitud física expresada en H/m en el sistema Giorgi.

Permeabilidad relativa de una sustancia (μ_r). Relación de la permeabilidad absoluta a la del vacío (μ_o). Es un número abstracto por ser el cociente de dos números de la misma naturaleza.

Sustancia paramagnética. Sustancia que adquiere, en un campo magnético externo, una imanación, siempre débil, que tiene por efecto aumentar la inducción debida exclusivamente al campo. Ejemplos: aire, oxígeno, aluminio, estaño, platino, paladio, óxido de carbono, etc.

Sustancia diamagnética. Sustancia que adquiere, en un campo magnético externo, una imanación, siempre débil, que tiene por efecto disminuir la inducción debida exclusivamente al campo. Ejemplos: hidrógeno, nitrógeno, alcohol, agua, cobre, cinc, plata, mercurio, grafito, etc.

Sustancia ferromagnética. Sustancia capaz de adquirir una imanación importante en un campo magnético externo, y susceptible de conservar la totalidad o parte de esta imanación una vez que ha cesado la acción del campo. Ejemplos: hierro, níquel, cobalto, aleaciones, ferritas, etc.

Imán permanente. Cuerpo ferromagnético que mantiene un campo magnético sin la intervención de corrientes eléctricas externas.

Imanación. Operación mediante la cual un cuerpo ferromagnético llega a poseer las propiedades de un imán.

Corriente magnetizante. Corriente que tiene por objeto primordial la producción de un campo magnético.

Desimanar. Restaurar la condición neutra de un cuerpo ferromagnético imanado.

Saturación magnética. Estado de una sustancia ferromagnética colocada en un campo de intensidad suficiente para que la intensidad de imanación resulte independiente del campo.

Estado magnético neutro. Estado de una sustancia ferromagnética que no ha sido sometida todavía a una imanación (estado virgen) o que ha sido llevada artificialmente a este estado.

Curva de imanación normal. Lugar de los vértices de diversos ciclos de histéresis simétricos que se obtienen haciendo variar los límites del campo magnetizante.

Histéresis magnética. Fenómeno por el que la imanación de los cuerpos ferromagnéticos depende, no solamente del valor actual del campo, sino también de los estados magnéticos anteriores.

Ciclo de histéresis. Curva cerrada que representa la serie de valores de la inducción magnética al variar el campo magnético.

Remanencia. Propiedad de los cuerpos ferromagnéticos de conservar una cierta inducción después de suprimir el campo magnetizante.

Imanación residual. Imanación que subsiste en un cuerpo ferromagnético después de suprimir el campo magnetizante. Esta propiedad se aprovechará para el cebado de las dínamos.

Campo coercitivo. Campo magnético necesario para llevar a cero la inducción de un cuerpo ferromagnético previamente imanado.

1.6 Conceptos de Electromagnetismo

Electromagnetismo. Parte de la ciencia que trata de las relaciones entre la electricidad y el magnetismo.

Circuito magnético. Conjunto de medios constituidos principalmente por sustancias ferromagnéticas, que forman un circuito cerrado y a través de los cuales puede pasar un flujo magnético.

Fuerza magnetomotriz (F). Causa capaz de mantener la circulación del flujo de inducción a lo largo del circuito magnético.

En el sistema c. g. s., la unidad de f. m. m. es el *gilbertio* (Gb). En el sistema Giorgi, la unidad de f. m. m. es el *ampervuelta* (Av), que equivale a $4\ \pi/10$ Gb.

Reluctancia (R). Cociente de la fuerza magnetomotriz aplicada a un circuito magnético por el flujo de inducción que produce.

Las unidades de reluctancia no tienen nombre especial, expresándose en el sistema c. g. s., por (Gb/Mx); y, en el sistema Giorgi, por (Av/Wb).

Electroimán. Conjunto formado por un núcleo ferromagnético y por una bobina, que produce efectos magnéticos apreciables solamente cuando la bobina es recorrida por una corriente eléctrica.

Núcleo magnético. Parte de un circuito magnético rodeado por un devanado.

Culata o yugo. Pieza de sustancia ferromagnética no rodeada por devanados y destinada a unir los núcleos de un electroimán o de un transformador o los polos de una máquina.

Armadura de un electroimán. Pieza magnética dispuesta de modo que se puede mover mediante la acción magnética del electroimán.

Entrehierro. Solución de continuidad, de pequeña longitud, de la parte ferromagnética de un circuito magnético.

Excitación. Producción de un flujo de inducción magnética en un circuito magnético, por medio de una corriente eléctrica.

Solenoide. Bobina cilíndrica devanada según una hélice de paso muy corto.

Inducción electromagnética. Producción de f. e. m. por variación de flujo en un circuito estático, o por corte del flujo a un circuito en movimiento.

Ley de Lenz. Los efectos conseguidos se oponen a las causas que los originan. El sentido de la f. e. m. inducida es siempre de signo tal que se opone a la causa que lo ha producido, o sea, a la variación del flujo inductor.

Ley de Faraday. Ley fundamental de la inducción electromagnética, según la cual, la f. e. m. inducida en un circuito cerrado es proporcional a la derivada del flujo abarcado con respecto al tiempo.
El sentido queda definido por la ley de Lenz.

Regla de Fleming de la mano derecha. Disponiendo el dedo índice en dirección del campo magnético y el dedo pulgar (perpendicular al anterior) en la dirección del movimiento, el dedo medio (perpendicular a los otros dos) señalará el sentido de la f. e. m. inducida.

Autoinducción. Producción de una f. e. m. en un circuito por la variación de corrientes que pasa por él.

Corrientes parásitas o de Foucault. Corrientes eléctricas que circulan por los materiales magnéticos al estar sometidos a una variación de flujo de inducción magnética. Estas corrientes dan lugar a pérdidas de energía por efecto Joule, siendo necesario, para disminuirlas, construir las piezas metálicas con espesores mínimos.

Ley de Laplace. Sobre un conductor recorrido por una corriente eléctrica, bajo la acción de un campo magnético, se ejerce una fuerza que tiende a desplazarlo en un sentido.

Regla de Fleming de la mano izquierda. Disponiendo los dedos pulgar, medio e índice formando un triedro, si el índice señala el sentido del campo y el medio, el de la corriente, el pulgar indicará el sentido de la fuerza o movimiento.

Regla del flujo máximo. Todo circuito eléctrico móvil, que se encuentre bajo la acción del campo magnético, tiende a ocupar una posición tal que el flujo que lo atraviesa sea el máximo.

1.7 Unidades más utilizadas en Electricidad y Magnetismo

Modernamente se tiende al empleo del Sistema Internacional (S. I.) también conocido por sistema Giorgi, y toma, como magnitudes fundamentales, la longitud, la masa, el tiempo y la intensidad de la corriente eléctrica.

No obstante, también tiene su importancia el sistema c. g. s. ya que es, todavía, utilizado en bastantes textos relacionados con Electricidad y Magnetismo.

Para abarcar los dos sistemas de unidades y ver las relaciones que existen entre ellos, así como el estudio de otros sistemas que son de uso normal, se indican a continuación, en la tabla 1.14, las magnitudes eléctricas y magnéticas más empleadas en Electrotecnia.

Tabla 1.14 Magnitudes utilizadas en electricidad y magnetismo

Concepto	*Nombre de la unidad*						*Relación entre sistemas*
	c. g. s.	*Símb.*	*Giorgi*	*Símb.*	*Otros sist.*	*Símb.*	
Energía y trabajo	Ergio	Erg	Julio	J	Kilovatio-hora	kWh	1 J = 10^7 erg 1 kWh = 3,6 · 10^6 J
Potencia	Ergio por segundo	Erg/s	Vatio	W			1 W = 10^7 erg/s
Fuerza	Dina	Dyn	Neutonio	N			1 N = 10^5 dyn
Temperatura					° Centígrado ° Kelvin	° C ° K	T °K = t °C + 273
Tensión y f. e. m.	u. e. m.		Voltio	V			1 V = 10^8 u. e. m.
Cantidad electricidad	u. e. m.		Culombio	C	Amperio-hora	Ah	1 C = 10^{-1} u. e. m. 1 Ah = 3 600 C
Capacidad	u. e. m.		Faradio	F			1 F = 10^{-9} u. e. m.
Intensidad o corriente	u. e. m.		Amperio	A			1 A = 10^{-1} u. e. m.
Resistencia	u. e. m.		Ohmio	Ω			1 Ω = 10^9 u. e. m.
Conductancia			Siemensio	s			
Intensidad de campo magnét.	Oerstedio	Oe	Ampervuelta por m	$\frac{Av}{m}$			1 Av/m = 4 π · 10^{-3} Oe
Flujo de inducción	Maxvelio	Mx	Weberio	Wb			1 Wb = 10^8 Mx
Inducción magnética	Gausio	Gs	Tesla	T			1 T = 1 Wb/m^2 = 10^4 Gs
Fuerza magnetomotriz	Gilbertio	Gb	Ampervuelta	Av			1 Av = $\frac{4\pi}{10}$ Gb
Reluctancia	u. e. m.		$A^2/N \cdot m$				1 $A^2/N \cdot m = 4\pi 10^{-9}$ u. e. m.
Autoinducción	u. e. m.		Henrio	H			1 H = 10^9 u. e. m.
Permeabilidad del vacío	$\mu_0 = 1$		$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m				

1.8 Valores nominales y características de funcionamiento de las máquinas de corriente continua

Dada la importancia que tiene la claridad en las definiciones referentes a las máquinas, se indicarán, a continuación, las relacionadas con las máquinas de c. c. (Norma UNE 20 113-73).

Servicio nominal. Conjunto de los valores numéricos de las características eléctricas y mecánicas, relacionadas con su duración y secuencias en tiempo, asignadas a la máquina por el fabricante e indicadas en la placa de características, estando la máquina de acuerdo con las condiciones especificadas.

Valor nominal. Valor numérico de una característica incluida en el servicio nominal.

Potencia nominal. Valor numérico de la potencia incluido en el servicio nominal.

Régimen. Conjunto de los valores numéricos de las características eléctricas y mecánicas que determinan, en una máquina rotativa, las exigencias impuestas por un circuito eléctrico o un dispositivo mecánico, en un instante dado.

Funcionamiento en vacío. Estado de funcionamiento de una máquina girando a su velocidad normal en régimen nominal sin que se le exija suministrar potencia.

Reposo. Ausencia completa de todo movimiento y de toda alimentación eléctrica o de accionamiento mecánico.

Potencia nominal de un generador de c. c. Potencia útil en bornes expresada en vatios (W).

Potencia nominal de un motor de c. c. Potencia mecánica disponible en el eje, expresada en vatios (W). En numerosos países es normal expresar la potencia mecánica disponible en el eje, en caballos (1 HP equivale a 745,7 W; 1 CV equivale a 736 W).

Tensión nominal. Tensión entre polos medida en los bornes de la máquina a la potencia nominal.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Hacer una clasificación de máquinas que comprenda todos los tipos que se fabrican en la actualidad, incluidas las especiales.

CUESTIONARIO

1.1 Citar diversas aplicaciones de la energía eléctrica.

1.2 ¿Por qué motivos es mucho más utilizado el alternador que la dínamo?

1.3 ¿Por qué ese interés actual en encontrar otras clases de generadores en lugar de los utilizados hasta ahora?

1.4 Citar diversos tipos de motores eléctricos de corriente alterna y sus aplicaciones en la industria.

1.5 ¿Por qué los transformadores forman un grupo aparte del resto de las máquinas?

1.6 ¿Qué aplicación tienen los convertidores rotativos?

1.7 Realizar un esquema que indique las transformaciones de energía de un convertidor electromecánico. Aplicación al principio de conservación de la energía.

1.8 ¿Hay alguna relación entre las leyes de inducción electromagnética y de Laplace, con la máquina de corriente continua?

1.9 Hallar las ecuaciones de dimensiones correspondientes a las magnitudes eléctricas citadas en el tema.

1.10 Hallar las ecuaciones de dimensiones correspondientes a las magnitudes que intervienen en los circuitos magnéticos.

BIBLIOGRAFIA

ALFARO E., *Curso de Electricidad.* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.

UNE, Instituto Nacional de Racionalización y Normalización. Madrid.

Tema 2

Funcionamiento de la máquina de corriente continua como generador

OBJETIVOS

— *Estudiar el principio fundamental de inducción electromagnética y su aplicación al generador.*

— *Realizar ejercicios de cálculo que requieran el manejo de las magnitudes electromagnéticas en los principales sistemas de unidades.*

— *Conocer el generador elemental de corriente alterna.*

— *Comprender la función del colector de delgas.*

— *Saber elegir el lugar de emplazamiento de las escobillas en una dínamo.*

— *Comparar las ff. ee. mm. obtenidas en dínamos con diferente número de espiras en el inducido.*

— *Conocer detalladamente la constitución de una máquina de corriente continua.*

GUION

— Estudio de la inducción electromagnética.
— F. e. m. inducida en una espira que gira en un campo magnético.
— Colectores.
— F. e. m. inducida en un sistema de espiras que giran en un campo magnético.
— Dínamo Gramme bipolar.
— Dínamo Gramme multipolar.
— Desarrollo histórico de las dínamos.
— Partes básicas de una máquina de corriente continua real.

PUNTOS CLAVE

— Conocer las leyes electromagnéticas que fundamentan el generador.
— Misión del colector de delgas.
— Importancia del número de espiras del inducido en función de la forma de corriente obtenida.

EXPOSICION DEL TEMA

2.1 Estudio de la inducción electromagnética

La producción de energía eléctrica, bien sea por dínamos, bien por alternadores, está basada en el principio fundamental de la inducción electromagnética; por ello, puede afirmarse que los fenómenos de inducción electromagnética son el punto de partida del estudio de las máquinas eléctricas.

2.1.1 *Experiencias*

La producción de f. e. m. en un conductor, al variar el flujo a que está sometido, se llama *inducción.* A continuación se explica el procedimiento de producción de f. e. m. inducida en un conductor rectilíneo:

1.º Al desplazar un conductor de longitud *l* sobre un soporte conductor,

cortando las líneas de fuerza del campo magnético perpendicularmente (fig. 2.1), se observa en la aguja del galvanómetro una desviación en una dirección; se ha inducido una f. e. m.

2.º Al desplazar el conductor en sentido contrario al caso 1.º, se observa que la aguja del aparato se desplaza en sentido opuesto.

3.º Al aumentar la velocidad de desplazamiento del conductor, la aguja sufre una desviación mayor a la observada en los casos 1.º y 2.º.

4.º Si se sustituye el imán por otro de mayor potencia, se produce una desviación de más amplitud que en los casos anteriores.

5.º Al reemplazar el conductor por otro de mayor longitud, cortando así más líneas de fuerza, aumenta también la desviación del galvanómetro.

6.º Al sustituir el conductor por otro de diferente material, el resultado obtenido no varía con respecto a los casos anteriores.

7.º Al desplazar el conductor en dirección paralela a las líneas de fuerza, la aguja del aparato no se mueve.

8.º Al desplazar el conductor en una dirección oblicua, con respecto a las líneas de fuerza, se produce un desplazamiento de la aguja, pero inferior al caso 1.º.

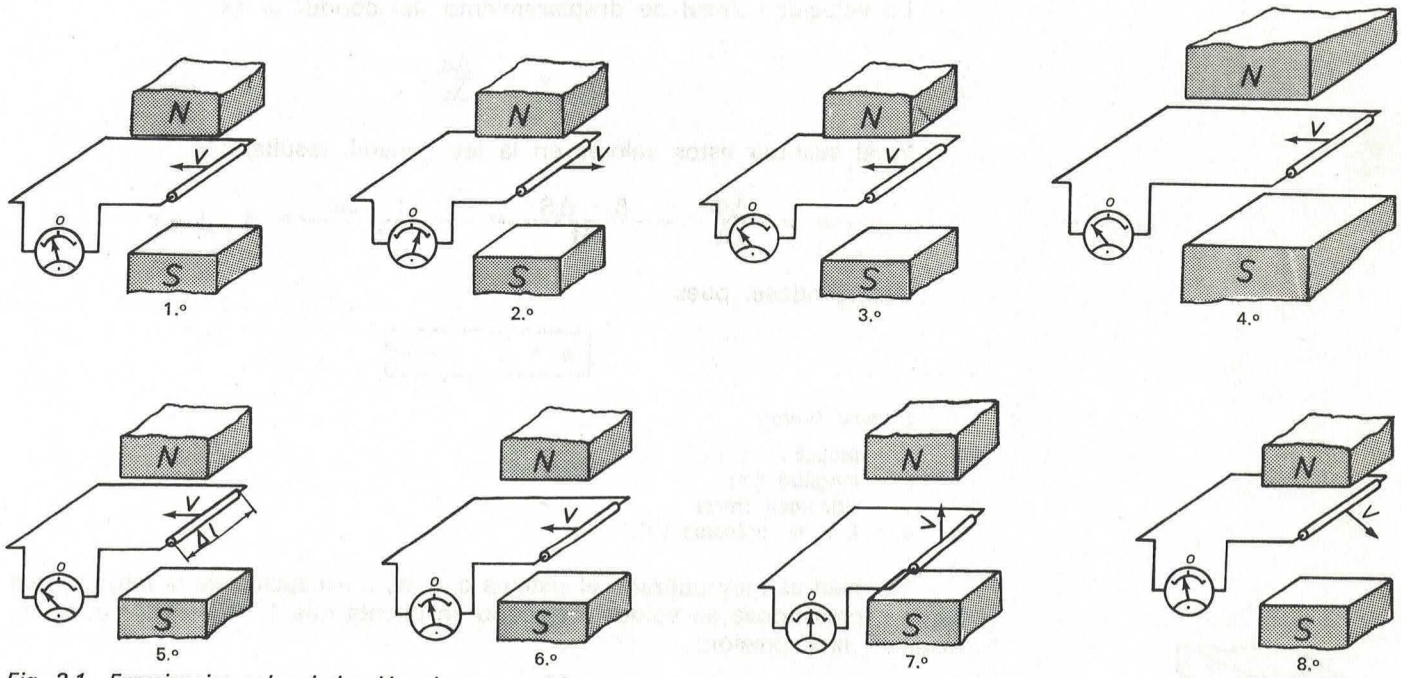


Fig. 2.1 Experiencias sobre inducción electromagnética.

2.1.2 *Resumen*

De las experiencias anteriores, se llega a la siguiente conclusión: la f. e. m. inducida en un conductor es directamente proporcional a:

— la inducción magnética (β),
— la velocidad de desplazamiento del conductor, normal al campo (v),
— la longitud del conductor activo (l).

2.1.3 *Deducción de la f. e. m. inducida*

Si, durante un tiempo muy pequeño Δt, se desplaza el conductor l (fig. 2.2) con una velocidad v en dirección normal al campo, cortará un número de líneas de campo magnético $\Delta\Phi$, a la vez que recorrerá un espacio infinitesimal Δc. El desplazamiento del conductor engendrará la superficie rectangular ΔS, rayada en la figura.

Según la ley de Faraday:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

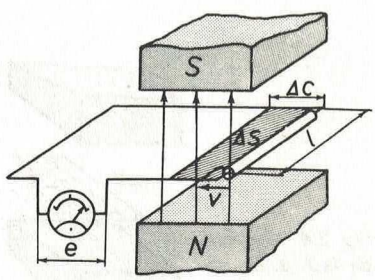


Fig. 2.2 F. e. m. inducida en un conductor.

donde:

$\Delta\Phi$ = flujo cortado (Wb)
Δt = tiempo (s)
e = f. e. m. inducida media (V)

La inducción magnética β, que es constante, se obtiene como cociente entre el flujo cortado $\Delta\Phi$ y la superficie abarcada ΔS:

$$\beta = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}\ ; \qquad \Delta\Phi = \beta \cdot \Delta S$$

La inducción magnética se puede definir como el *flujo que atraviesa normalmente la unidad de superficie.*

La superficie formada ΔS es el área de un rectángulo de lados l y Δc; así, pues:

$$\Delta S = l \cdot \Delta c$$

La velocidad lineal de desplazamiento del conductor es:

$$v = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

Y, al sustituir estos valores en la ley general, resultará:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\beta \cdot \Delta S}{\Delta t} = \frac{\beta \cdot l \cdot \Delta c}{\Delta t} = \beta \cdot l \cdot v$$

Obteniéndose, pues:

$$\boxed{e = \beta \cdot l \cdot v}$$

Sistema Giorgi:

β = inducción (T)
l = longitud (m)
v = velocidad (m/s)
e = f. e. m. inducida (V)

También es muy utilizado el sistema c. g. s., a excepción de la tensión, que sigue expresándose en voltios. Teniendo en cuenta que $1 \cdot v = 10^{-8}$ u. e. m., resultará la expresión:

$$\boxed{e = \beta \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}}$$

Sistema c. g. s.:

β = inducción (Gs)
l = longitud (cm)
v = velocidad (cm/s)
e = f. e. m. inducida (V)

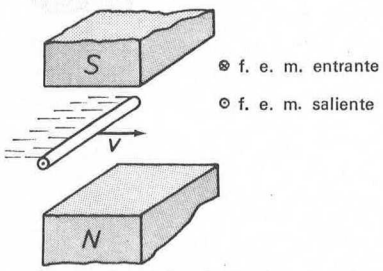


Fig. 2.3 Sentido de la f. e. m. inducida.

2.1.4 *Sentido de la f. e. m. inducida*

El sentido de la f. e. m. sigue la regla de Fleming de la mano derecha.

Si el conductor se desplaza hacia la derecha (fig. 2.3), el sentido de la f. e. m. es saliente en el plano que determina el papel.

Si el conductor se desplaza hacia la izquierda (fig. 2.4), el sentido de la f. e. m. es entrante en el plano.

Al invertir el sentido del campo (fig. 2.5), se invierte el sentido de la f. e. m., y es, por tanto, entrante.

Si se invierten el campo y el movimiento, el sentido de la f. e. m. no varía (fig. 2.6).

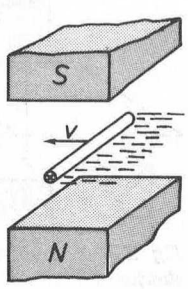


Fig. 2.4 Sentido de la f. e. m. inducida al variar el movimiento.

Ejercicios de aplicación

1.º El conductor de la figura 2.1 se desplaza, durante 0,2 s, a una velocidad lineal de 3 m/s, y corta las líneas de fuerza del campo de inducción 6 000 Gs. Sabiendo que la longitud

efectiva del conductor es de 1 m, hallar el valor de la f. e. m. inducida. Resolver el ejercicio en los dos sistemas de unidades, utilizando las dos expresiones del valor de la f. e. m.

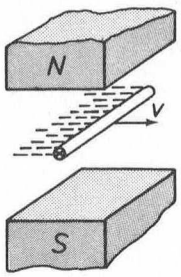


Fig. 2.5 Sentido de la f. e. m. inducida al variar el campo.

Solución:

a) Según la expresión

$$e = \beta \cdot l \cdot v$$

Giorgi:

$\beta = 6\,000 \times 10^{-4} = 0{,}6$ T
$l = 1$ m
$v = 3$ m/s

(Giorgi) f. e. m.:

$$e = 0{,}6 \times 1 \times 3 = 1{,}8 \text{ V}$$

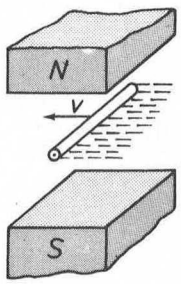


Fig. 2.6 Sentido de la f. e. m. inducida al variar el campo y movimiento.

c. g. s.:

$\beta = 6\,000$ Gs
$l = 100$ cm
$v = 300$ cm/s

(c. g. s.) f. e. m.:

$$e = 6\,000 \times 100 \times 300 \times 10^{-8} = 1{,}8 \text{ V}$$

b) La otra expresión es:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Sistema Giorgi:

Durante 0,2 s, el conductor recorre un espacio:

$$\Delta c = v \cdot t = 3 \times 0{,}2 = 0{,}6 \text{ m}$$

La superficie formada será:

$$s = l \cdot \Delta c; \qquad c = 1 \times 0{,}6 = 0{,}6 \text{ m}^2$$

El corte de flujo:

$$\Phi = \beta \cdot S = 0{,}6 \times 0{,}6 = 0{,}36 \text{ Wb}$$

La variación de flujo a que está sometido el conductor será:

$\Phi_1 = 0$, al principio del movimiento;
$\Phi_2 = 0{,}36$ Wb, al final del movimiento.

Por tanto, en el tiempo $\Delta t = 0{,}2$ s, hay una variación de flujo = 0,36 Wb.
Y la f. e. m. media inducida:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{t} = \frac{0{,}36}{0{,}2} = 1{,}8 \text{ V}$$

Sistema c. g. s.:

El espacio recorrido en 0,2 s:

$$\Delta c = v \cdot t = 300 \times 0{,}2 = 60 \text{ cm}$$

Superficie formada:

$$S = l \cdot \Delta c = 100 \times 60 = 6\,000 \text{ cm}^2$$

Flujo cortado:

$$\Phi = \beta \cdot S = 6\,000 \times 6\,000 = 36 \times 10^6 \text{ Mx}$$

F. e. m. inducida:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{36 \times 10^6}{0{,}2} = 1{,}8 \times 10^8 \text{ u. e. m.} = 1{,}8 \text{ V}$$

2.º Hallar la f. e. m. inducida en una bobina de 10 cm^2 de sección y 500 espiras, cuando gira por la acción de un campo magnético de inducción 0,4 T. El campo magnético pasa de 0 al valor máximo en 0,2 segundos.

Solución:

La f. e. m. media en cada espira es:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Giorgi:

$S = 10 \times 10^{-4} = 10^{-3}\ m^2$
$\beta = 0{,}4\ T$

El flujo máximo cortado por una espira:

$$\Phi_{máx.} = \beta \cdot S = 0{,}4 \times 10^{-3}\ Wb$$

La variación de flujo en ese intervalo de tiempo es:

$$\Delta\Phi = \Phi_{máx.} - \Phi_{mín.} = 0{,}4 \times 10^{-3}\ Wb$$

La f. e. m. media en cada espira:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0{,}4 \times 10^{-3}}{0{,}2} = 2 \times 10^{-3}\ V$$

La f. e. m. en la bobina de 500 espiras en serie será la suma de las ff. ee. mm. de todas ellas:

$$e_T = e \cdot n = 2 \times 10^{-3} \times 500 = 1\ V$$

3.º El electroimán de la figura 2.7 produce un campo magnético, cuyo valor de inducción en el entrehierro es de 0,6 T. Sabiendo que en 0,1 segundos se extrae una bobina que está alojada en el entrehierro, averiguar la f. e. m. media inducida en dicho tiempo.
Datos de la bobina: forma circular, 20 espiras en serie y 8 cm de diámetro.

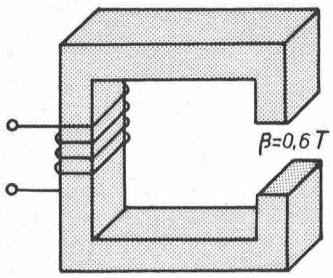


Fig. 2.7 Electroimán.

Solución:

c. g. s.:

$\beta = 0{,}6 \times 10^4 = 6\,000\ Gs$
$s = \pi \cdot 4^2 = 50{,}26\ cm^2$

El flujo máximo abarcado por la bobina:

$$\Phi = \beta \cdot S = 6\,000 \times 50{,}26 = 301\,592\ Mx$$

La bobina está sometida a la variación de flujo:

al principio del movimiento, $\Phi_1 = 301\,592$ Mx;
al final del movimiento, $\Phi_2 = 0$ Mx.

Por tanto, la variación de flujo total en el tiempo de 0,1 s es de 301 592 Mx.
La f. e. m. media inducida en cada espira:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{301\,592}{0{,}1} = 3\,015\,920\ u.\ e.\ m. = 0{,}03\ V$$

La f. e. m. inducida en la bobina de 20 espiras en serie:

$$e_T = e \cdot n = 0{,}03 \times 20 = 0{,}6\ V$$

2.2 F. e. m. inducida en una espira que gira en un campo magnético. Datos

Se dispone de una espira cerrada rectangular de longitud *l* y anchura 2 *R* (fig. 2.8), que gira con una velocidad angular ω sobre el eje longitudinal *O*, en el interior de un campo magnético *N-S* de inducción β cte.

El máximo flujo abarcado por la espira corresponde a la posición *AA* (perpendicular al campo); cuando la espira está en posición horizontal (paralela

a las líneas del campo), el flujo abarcado es nulo. En otra posición, *BB*, el flujo cortado por la espira adquiere un valor intermedio entre los citados y se determinará a continuación.

2.2.1 *Valor de la f. e. m. inducida*

Si se toma como origen de tiempos el instante en que el plano de la espira es normal al campo magnético (posición *AA*) y se supone que el tiempo necesario para pasar a ocupar la posición *BB* es *t*, y que el ángulo girado en el mismo tiempo es α.

La velocidad lineal de la espira *v* puede descomponerse en las componentes v_y y v_x; la v_y actúa normalmente a las líneas de fuerza; y la v_x, paralelamente (no corta líneas).

Recordando que la f. e. m. inducida en un conductor era:

$$e = \beta \cdot l \cdot v$$

donde v = velocidad normal al campo; aquí la f. e. m. inducida en la espira se suma en los dos conductores, según puede deducirse al aplicar la regla de la mano derecha, y resulta:

$$e = 2 \cdot \beta \cdot l \cdot v_y$$

donde:

- v = velocidad lineal de la espira
- ω = velocidad angular
- R = radio de la trayectoria
- α = espacio angular = $\omega \cdot t$

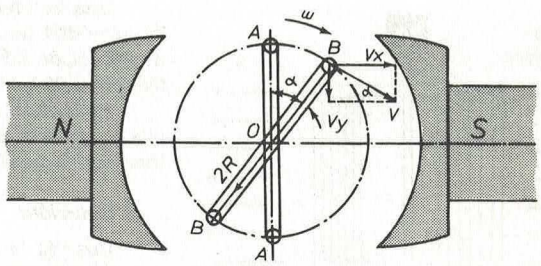


Fig. 2.8 F. e. m. inducida en una espira giratoria.

A su vez:

$$v = \omega \cdot R$$

$$v_y = v \cdot \text{sen } \alpha = \omega \cdot R \cdot \text{sen } \alpha$$

La superficie máxima de corte de líneas será el área del rectángulo que forma la espira:

$$S_{máx.} = 2\ R \cdot l$$

El flujo máximo cortado por la espira:

$$\Phi_{máx.} = \beta \cdot S_{máx.} = \beta \cdot 2\ R \cdot l$$

Al sustituir:

$$e = \omega \cdot \Phi_{máx.} \cdot \text{sen } \alpha = E_o \cdot \text{sen } \alpha = E_o \cdot \text{sen } (\omega t)$$

queda, finalmente:

$$\boxed{e = E_o \cdot \text{sen } (\omega t)}$$

donde:

$$E_o = \text{f. e. m. máxima} = \omega \cdot \Phi_{máx.}$$

2.2.2 *Resumen*

La f. e. m. inducida en una espira giratoria, sometida a un campo magnético, es una función senoidal.

La amplitud o valor máximo de la función es:

$$E_o = \omega \cdot \Phi_{máx.}$$

y su representación corresponde a la figura 2.9.

En definitiva, la espira giratoria es el generador elemental para producir corriente alterna.

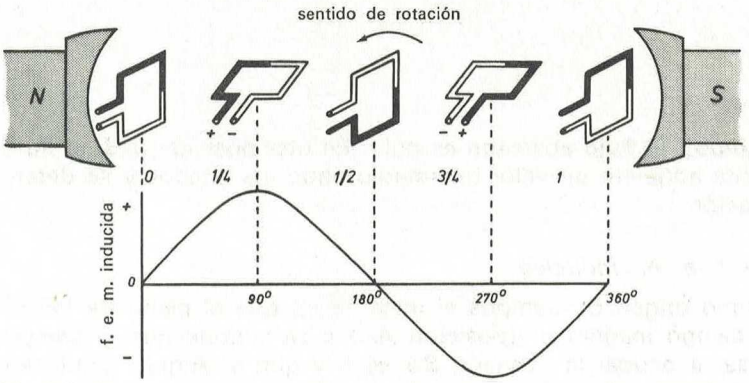


Fig. 2.9 Representación de la f. e. m. inducida en una espira giratoria.

2.3 Colectores

La f. e. m. generada en la espira de la figura 2.8 dará lugar a una corriente alterna elevada, por ser mínima su resistencia. La energía eléctrica producida en la espira se transformará íntegramente en calor por efecto Joule.

Ejercicio de aplicación

Una bobina cuadrada de 1 m de lado, formada por 10 espiras en serie (fig. 2.10), gira a la velocidad de 2 revoluciones por segundo, por la acción de un campo magnético horizontal de inducción 0,5 T. La bobina está construida con hilo de cobre de 0,5 mm de diámetro y resistividad 0,017 $\Omega \cdot mm^2/m$.

Hallar la f. e. m. inducida y la corriente que circulará por la bobina cuando ésta se desplace desde la posición horizontal a la vertical. ¿En qué forma se manifestará la energía eléctrica producida?

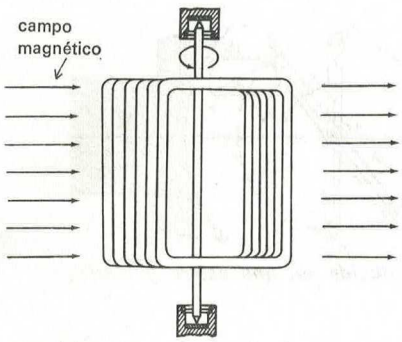


Fig. 2.10 Bobina cuadrada con varias espiras en serie.

Solución:

Cuando la bobina está en posición horizontal, la superficie de corte de líneas de fuerza es nula, mientras que, al desplazarse 90°, el corte de líneas de fuerza es máximo.

El tiempo empleado para girar 90° será el equivalente a 1/4 de revolución de la espira:

Si 2 revoluciones ——— 1 segundo
1/4 » ——— t »

$$t = \frac{1/4}{2} = 0{,}125 \text{ s}$$

El flujo cortado por una espira es:

$$\Phi = \beta \cdot S = 0{,}5 \times 1^2 = 0{,}5 \text{ Wb}$$

La f. e. m. media en cada espira:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{(0{,}5 - 0)}{0{,}125} = 4 \text{ V}$$

La f. e. m. media total de las 10 espiras en serie es:

$$e_T = e \cdot n = 4 \times 10 = 40 \text{ V}$$

La resistencia de la bobina:

$$R = \rho \cdot l/S = 0{,}017 \cdot \frac{(4 \times 10)}{\frac{\pi \cdot 0{,}5^2}{4}} = 3{,}46\ \Omega$$

La corriente que circula por el conductor:

$$i = \frac{e_T}{R} = \frac{40}{3{,}46} = 11{,}55 \text{ A}$$

La energía eléctrica producida, se manifiesta en calor y toma el valor:

$$Q = 0{,}24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0{,}24 \times 3{,}46 \times 11{,}55^2 \times 0{,}125 = 13{,}8 \text{ cal}$$

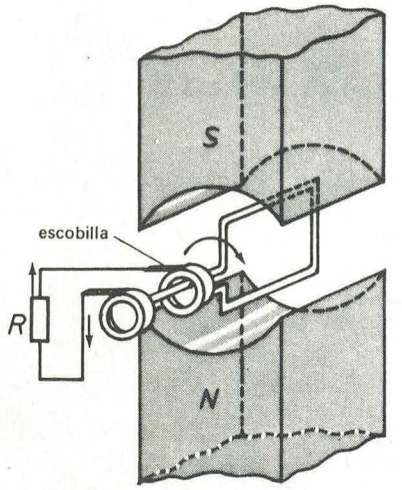


Fig. 2.11 Generador elemental.

2.3.1 *Escobillas y colector de anillos*

Para aprovechar la f. e. m. inducida en la espira giratoria, es necesario conducirla a un circuito exterior estático, donde se conectarán los receptores (figura 2.11).

La transmisión de energía eléctrica de un circuito móvil a otro estático se hace a través de dos anillos unidos a los extremos de la espira, a los que se aplican tangencialmente sendas piezas conductoras, llamadas *escobillas.*

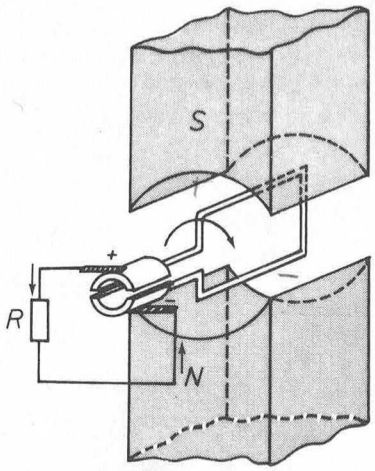


Fig. 2.12 Colector de un anillo.

2.3.2 *Colector de un anillo*

Si en la figura 2.11 se sustituyen los dos anillos por uno solo, dividido en dos partes separadas por un aislante (fig. 2.12), se conseguirá que la corriente vaya dirigida en el mismo sentido.

El contacto de la escobilla con el aislante debe producirse en el instante de anularse la f. e. m. en la espira, y sucede dos veces por vuelta de espira (figura 2.9).

Puede decirse que esta parte de la futura máquina, llamada colector, es la que diferencia al alternador de la dínamo.

2.3.2.1 *F. e. m. pulsatoria*

Hasta aquí, la f. e. m. inducida en la espira era de forma senoidal; sin embargo, la obtenida con el anillo dividido en dos partes aisladas (fig. 2.13) es pulsatoria; por tanto, más próxima a la corriente continua.

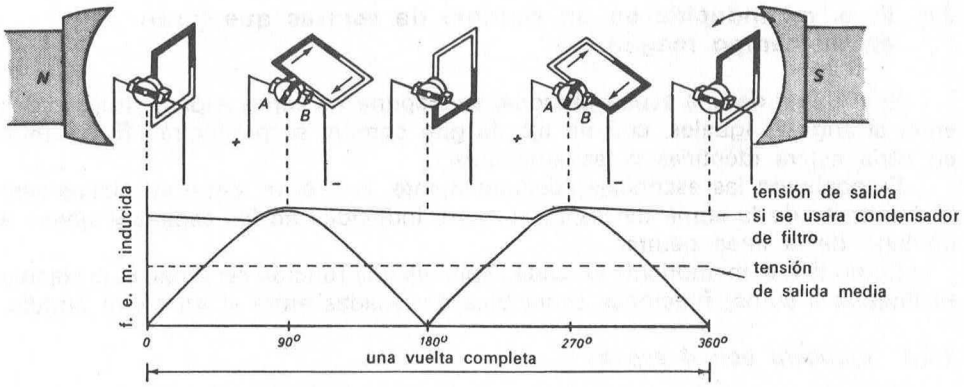


Fig. 2.13 Obtención de la f. e. m. pulsatoria.

La f. e. m. pulsatoria, producida por medio del colector, pasa dos veces por 0 durante una vuelta de la espira; por tanto, dista bastante de una corriente continua pura (línea recta).

2.3.2.2 *Polaridad de las escobillas*

Para averiguar la polaridad de cada escobilla, es necesario estudiar el proceso de inducción de f. e. m. de la espira *ab* (fig. 2.14), en cualquier posición de giro del espacio. Se ha supuesto el giro en sentido horario: sentido de las agujas del reloj.

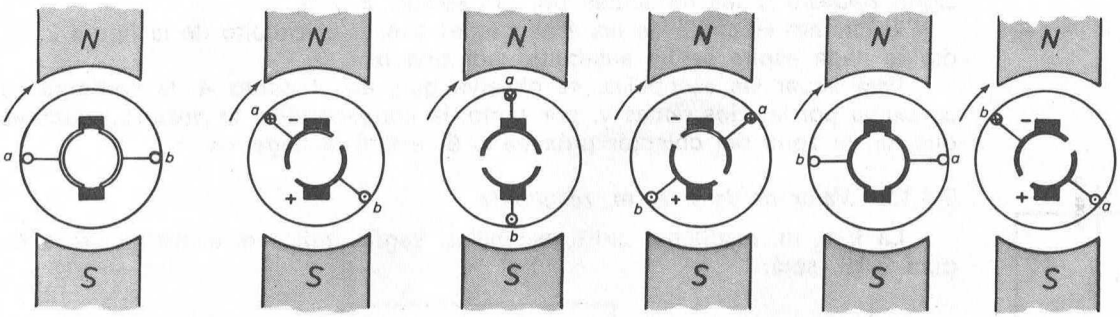


Fig. 2.14 Polaridad de las escobillas para diversas posiciones de la espira.

El sentido de la f. e. m. en cada conductor se deduce al aplicar la regla de la mano derecha, tomándose como norma la siguiente identificación:

— ⊗ corriente entrante (penetra en dirección perpendicular al papel).
— ⊙ corriente saliente (sale perpendicularmente al papel).

En el 1.er caso, los conductores *a* y *b* se encuentran en la zona neutra; por tanto, no se induce en ellos f. e. m., eligiéndose este instante para situar las escobillas sobre el aislante (cortocircuitando los semianillos). *La escobilla debe estar unida siempre a la bobina (o espira) que en ese instante pase por la línea neutra.*

En el 2.º caso, la espira ha girado 45º y, al aplicar la regla de Fleming, se observa que la corriente entra por *a* y sale por *b*.

En el 3.er caso, la espira ha girado 90º, obteniéndose el máximo de f. e. m.

En el 4.º caso, la espira ha girado 135º y sigue manteniéndose la situación de los casos 2.º y 3.º.

En el 5.º caso, la espira ha girado 180º, y de nuevo aparece el 1.er caso.

En el 6.º caso, se vuelve a repetir el proceso y la situación es similar al caso 2.º.

De todo lo observado anteriormente, se deduce que:

— Las *escobillas mantienen su polaridad,* siendo la escobilla inferior la *positiva* (envía la corriente al exterior); y la superior, la *negativa* (recibe la corriente del exterior).

— La corriente se *invierte en el conductor* y no en el colector.

— El colector se comporta como un *rectificador mecánico.*

2.4 F. e. m. inducida en un sistema de espiras que giran en un campo magnético

Si en lugar de una espira giratoria, se dispone de varias espiras desplazadas entre sí ángulos iguales, con un eje de giro común, se producirán ff. ee. mm. en cada espira idénticas a las anteriores.

Disponiendo las escobillas adecuadamente, la f. e. m. entre escobillas será la resultante de la suma de las ff. ee. mm. inducidas en las espiras situadas a un lado de la línea neutra.

Como la f. e. m. inducida en cada espira es una función senoidal, el problema se limitará a sumar funciones senoidales desfasadas entre sí un cierto ángulo.

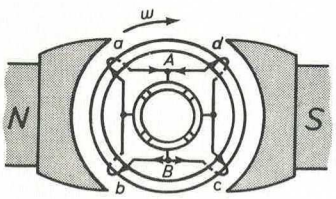


Fig. 2.15 Inducido con cuatro espiras.

2.4.1 *Inducido con 4 espiras*

Este sistema está constituido por un anillo de hierro (fig. 2.15) rodeado por 4 espiras, situadas a 90º entre sí y unidas en serie.

Los extremos de cada espira se conectan al anillo colector, previamente dividido en 4 partes aisladas, llamadas *delgas.*

2.4.1.1 *Circuito eléctrico del inducido*

Al ponerse en movimiento el inducido (sentido horario), se generan ff. ee. mm. en las 4 espiras *a, b, c, d,* formándose un circuito eléctrico.

Para conocer el sentido de las ff. ee. mm., se aplica a cada espira la regla de la mano derecha de Fleming, comprobándose que las espiras *a* y *b* producen ff. ee. mm. del mismo sentido. Las ff. ee. mm. de las espiras *c* y *d* son del mismo sentido.

Las ff. ee. mm. producidas por las espiras *a* y *b* son del mismo valor y de signo *opuesto* a las inducidas por las espiras *c* y *d.*

El circuito eléctrico de las 4 espiras es similar al circuito de la figura 2.16, donde cada espira se ha sustituido por una *pila.*

Para situar las escobillas, se observa que, en el punto *A*, la corriente se aproxima por las dos ramas y, por tanto, le corresponderá la *positiva,* mientras que, en la zona del colector próxima a *B*, estará la *negativa.*

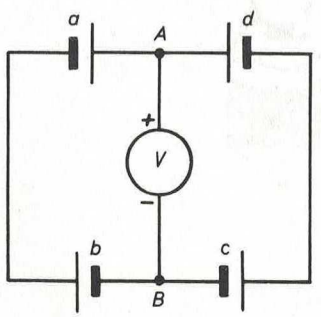


Fig. 2.16 Símil de circuito formado por pilas.

2.4.1.2 *Valor de la f. e. m. resultante*

La f. e. m. resultante entre escobillas, según indica el esquema de la figura 2.16, será:

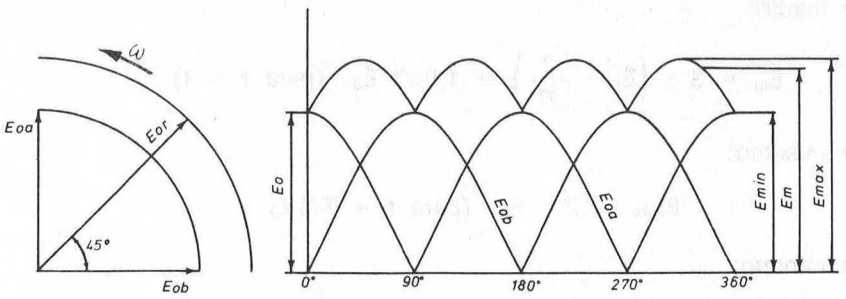
$$e_a + e_b = e_c + e_d$$

Las ff. ee. mm. inducidas en las espiras no son constantes, como en las pilas, sino que responden a funciones senoidales desfasadas 90º:

$$e_a = E_o \cdot \text{sen } (\omega t)$$

$$e_b = E_o \cdot \text{sen } (\omega t + 90^o)$$

La f. e. m. resultante se obtiene sumando gráficamente e_a y e_b, bien sea vectorialmente o por diagrama cartesiano (fig. 2.17).



Para t = 0, la f. e. m. resultante es mínima:

$$E_{mín.} = E_o$$

Para t = 45°, la f. e. m. resultante es máxima:

$$E_{máx.} = E_o \sqrt{2} = 1{,}41\ E_o$$

El valor medio de la f. e. m. resultante es:

$$E_m = 2\ (E_o\ 2/\pi) = 1{,}27\ E_o$$

Fig. 2.17 Gráfica de la f. e. m. resultante en un inducido de 4 espiras.

Los valores más destacables de la f. e. m. resultante son:
Valor medio:

$$E_m = 2 \cdot \left(E_o \cdot \frac{2}{\pi}\right) = 1{,}27 \cdot E_o \quad (\text{para } t = t)$$

Valor máximo:

$$E_{máx.} = 1{,}41 \cdot E_o \quad (\text{para } t = T/8)$$

Valor mínimo:

$$E_{mín.} = E_o \quad (\text{para } t = 0)$$

La variación de la f. e. m. resultante se expresa en valor absoluto y en valor relativo:

$$V_{ab} = \text{variación absoluta} = E_{máx.} - E_{mín.} = 1{,}14\ E_o - E_o = 0{,}41\ E_o$$

$$V_{re} = \frac{V_{ab}}{E_{máx.}} \cdot 100 = \frac{0{,}41 \cdot E_o}{1{,}41 \cdot E_o} \cdot 100 = 29\ \%$$

2.4.1.3 *Resumen*

Con el sistema de 4 espiras en el inducido, se obtiene una f. e. m. resultante más próxima a la corriente continua pura que en el caso de 1 espira, aunque todavía persiste una variación relativa del 29 %.

Para conseguir una variación relativa nula (corriente continua pura), habrá de disponerse, en el inducido, de *mayor número de espiras,* desfasadas ángulos idénticos entre sí.

2.4.2 *Inducido con 6 espiras*

En el inducido se disponen 6 espiras desfasadas 60° entre sí (fig. 2.18), formando un circuito eléctrico similar a un circuito mixto de 6 pilas.

Este sistema da lugar a la generación de ff. ee. mm., de forma similar al anterior de 4 espiras, aunque con alguna variación en el resultado numérico de la f. e. m. resultante.

2.4.2.1 *Determinación de la f. e. m. resultante*

De las 6 espiras del inducido, solamente se suma la tensión en la mitad, puesto que forman 2 circuitos en derivación, obteniéndose para f. e. m. total:

$$\boxed{e_a + e_b + e_c = e_d + e_e + e_f}$$

Las ff. ee. mm. inducidas en las espiras son:

$$e_a = E_o \cdot \text{sen } (\omega t)$$

$$e_b = E_o \cdot \text{sen } (\omega t - 60^o)$$

$$e_c = E_o \cdot \text{sen } (\omega t - 120^o)$$

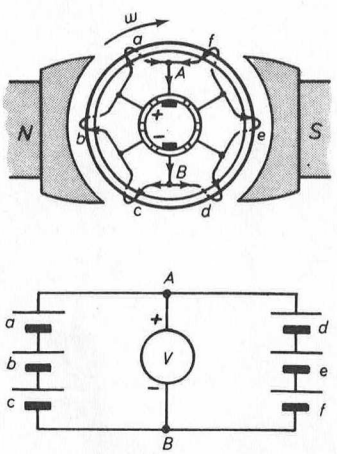


Fig. 2.18 Inducido con 6 espiras y circuito equivalente.

La suma gráfica de las 3 funciones senoidales (fig. 2.19) da lugar a la f. e. m. resultante.

Los valores más destacables de la f. e. m. resultante son:

Valor medio:

$$E_m = 3 \cdot \left(E_o \cdot \frac{2}{\pi}\right) = 1{,}909\ E_o \quad (\text{para } t = t)$$

Valor máximo:

$$E_{máx.} = 2 \cdot E_o \quad (\text{para } t = T/12)$$

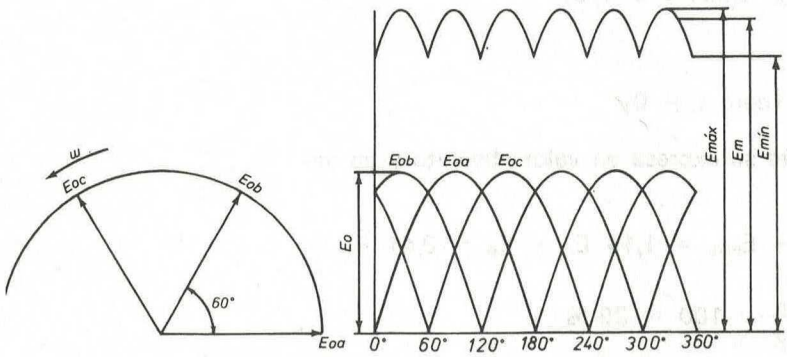
Valor mínimo:

$$E_{mín.} = 2 \cdot E_o \cdot \text{sen } 60^o = \sqrt{3} \cdot E_o \quad (\text{para } t = 0)$$

La variación de la f. e. m. resultante:

$$V_{abs.} = E_{máx.} - E_{mín.} = 2 \cdot E_o - \sqrt{3} \cdot E_o = 0{,}267 \cdot E_o$$

$$V_{rel.} = \frac{V_{abs.}}{E_{máx.}} \cdot 100 = \frac{0{,}267 \cdot E_o}{2 \cdot E_o} \cdot 100 = 13{,}98\ \%$$



Para t = 0, la f. e. m. resultante es mínima:

$E_{o\,mín.} = 2 \cdot E_o \text{ sen } 60^o = \sqrt{3}\ E_o = 1{,}732\ E_o$

Para t = 30°, la f. e. m. resultante es máxima:

$E_{o\,máx.} = 2\ E_o$

El valor medio de la f. e. m resultante:

$E_m = 3\ (E_o\ 2/\pi) = 1.909\ E_o$

Fig. 2.19 Gráfica de la f. e. m. resultante en un inducido de 6 espiras.

2.4.3 *Inducido con 8 espiras*

Forman el inducido 8 espiras desfasadas 45°.

La f. e. m. resultante es:

$$\boxed{e_a + e_b + e_c + e_d = e_e + e_f + e_g + e_h}$$

siendo:

$$e_a = E_o \cdot \text{sen } (\omega t)$$

$$e_b = E_o \cdot \text{sen } (\omega t - 45^o)$$

$$e_c = E_o \cdot \text{sen } (\omega t - 90^o)$$

$$e_d = E_o \cdot \text{sen } (\omega t - 135^o)$$

La suma gráfica de las 4 funciones senoidales (fig. 2.20) da lugar a la f. e. m. resultante.

Los valores más destacables de la f. e. m. son:

Valor medio:

$$E_m = 4 \cdot \left(E_o \cdot \frac{2}{\pi}\right) = 2{,}546 \cdot E_o \quad (\text{para } t = t)$$

Valor máximo:

$$E_{máx.} = 2{,}61 \cdot E_o \quad (\text{para } t = T/16)$$

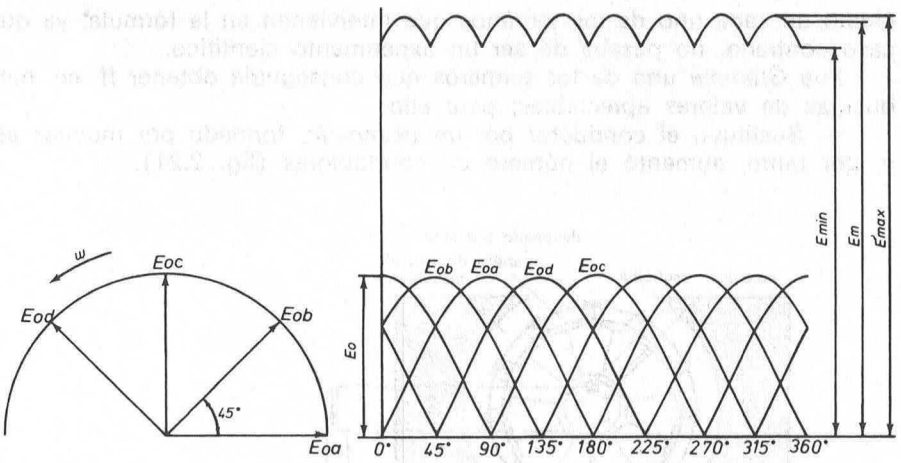


Fig. 2.20 Gráfica de la f. e. m. resultante en un inducido de 8 espiras.

Valor mínimo:

$$E_{mín.} = E_o + 2 \cdot E_o \cdot \cos 45^o = 2{,}41 \cdot E_o \quad (\text{para } t = 0)$$

La variación de la f. e. m. resultante:

$$V_{abs.} = E_{máx.} - E_{mín.} = 2{,}61 \cdot E_o - 2{,}41 \cdot E_o = 0{,}169 \cdot E_o$$

$$V_{rel.} = \frac{V_{abs.}}{E_{máx.}} \cdot 100 = \frac{0{,}169 \cdot E_o}{2{,}61 \cdot E_o} \cdot 100 = 7{,}69\ \%$$

2.4.4 *Inducido de una máquina real*

A medida que aumenta el número de espiras del inducido, la variación de la f. e. m. resultante disminuye, consiguiéndose una corriente prácticamente continua a partir de las 20 bobinas. La representación gráfica de una corriente en función del tiempo es una línea recta.

Dado que la máquina real dispone de un inducido con un número de bobinas muy superior a 20, puede afirmarse con seguridad que la dínamo real produce una f. e. m. continua pura.

El valor de la f. e. m. que se genera en una bobina formada por $\frac{n}{2}$ espiras es:

$$E_m = \frac{n}{2} \cdot \left(E_o \cdot \frac{2}{\pi}\right) = \frac{n}{2} \cdot \omega \cdot \Phi \cdot \frac{2}{\pi}$$

$$= \frac{n}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \Phi = 2 \cdot n \cdot N \cdot \Phi$$

$$\boxed{E_m = 2 \cdot n \cdot N \cdot \Phi}$$

donde:

- n = número de conductores activos del inducido
- $\frac{n}{2}$ = número de espiras que suma la f. e. m. en cada instante
- N = velocidad angular (r. p. s.)
- Φ = flujo máximo cortado (Wb)
- E_m = f. e. m. inducida (V)

2.5 Dínamo Gramme bipolar

Se sabe que la f. e. m. inducida en un conductor es: $e = \beta \cdot l \cdot v$; sin embargo, esa ley de inducción era solamente el fundamento del generador de corriente continua. Para conseguir un generador útil, fue preciso multiplicar el

efecto de cada uno de los términos que intervienen en la fórmula, ya que, en caso contrario, no pasaba de ser un experimento científico.

Fue *Gramme* uno de los primeros que conseguiría obtener ff. ee. mm. inducidas de valores apreciables; para ello:

— Sustituyó el conductor por un *devanado,* formado por muchas espiras y, por tanto, aumentó el número de conductores (fig. 2.21).

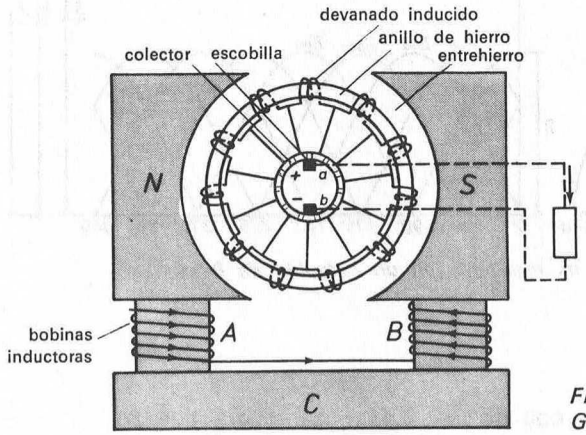


Fig. 2.21 Dínamo Gramme bipolar.

— Elevó la potencia magnética de los polos al rodearlos de *bobinas inductoras,* por las que circulan corrientes eléctricas.

— Consiguió aumentar considerablemente la velocidad de giro de los conductores al pasar del movimiento lineal al *giratorio.*

2.5.1 *Partes principales*

Realizadas las modificaciones citadas, Gramme construyó la máquina generadora de corriente continua (dínamo), en la que cabe diferenciar las siguientes partes:

1.ª *Inductor.* Su misión es la de proporcionar el flujo magnético, y consta de las *piezas polares N y S;* los *núcleos magnéticos A* y *B,* rodeados por las bobinas inductoras; y la *culata C,* que une los polos de la máquina.

Las bobinas inductoras están conectadas en serie, y el sentido de la corriente ha de ser tal que se forme un polo *N* en el núcleo *A,* y un *S* en el *B.*

2.ª *Inducido.* Destinado a producir el desplazamiento de los conductores; lo constituyen: un *anillo de hierro,* un *devanado,* el *colector* y el *eje.*

Anillo de hierro. Formado por chapa magnética, para aprovechar al máximo el flujo magnético, que está rodeado por las bobinas del inducido.

Devanado. Formado por las bobinas del inducido y sus conexiones al colector.

Colector. Conjunto de delgas (láminas conductoras) aisladas entre sí y conectadas al devanado.

Eje. Elemento mecánico de acero destinado a servir de soporte del inducido, apoyado en los cojinetes.

3.ª *Entrehierro.* Espacio de aire comprendido entre los polos y el inducido, para evitar el rozamiento entre ambas partes durante la rotación del inducido.

4.ª *Escobillas.* Piezas conductoras que establecen contacto por rozamiento entre el colector y un circuito exterior fijo.

2.5.2 *Funcionamiento*

La producción de f. e. m. tiene lugar de forma similar a la máquina con 4, 6, 8, etc., espiras en el inducido. La única variación está en que la f. e. m. resultante es mayor por ser también mayor el número de espiras y aumentar considerablemente el flujo magnético.

Un inconveniente que surge es la necesidad de disponer de corriente continua para la alimentación de las bobinas inductoras. Esta corriente la puede suministrar una red auxiliar o la propia dínamo (autoexcitación). El fenómeno

de autoexcitación se explicará en el tema dedicado a la excitación de las máquinas de corriente continua.

2.5.3 *Diagrama de potenciales en el colector*

Si la dínamo está girando a su velocidad nominal y está alimentado el circuito inductor, se producirá una f. e. m. entre escobillas, que vendrá indicada por un voltímetro.

El diagrama de potenciales representa la f. e. m. inducida en las delgas existentes entre 2 escobillas de signos opuestos (fig. 2.22). Los datos del diagrama serán las lecturas que proporcione un voltímetro de puntas móviles, al conectarles entre la escobilla negativa y cualquier delga.

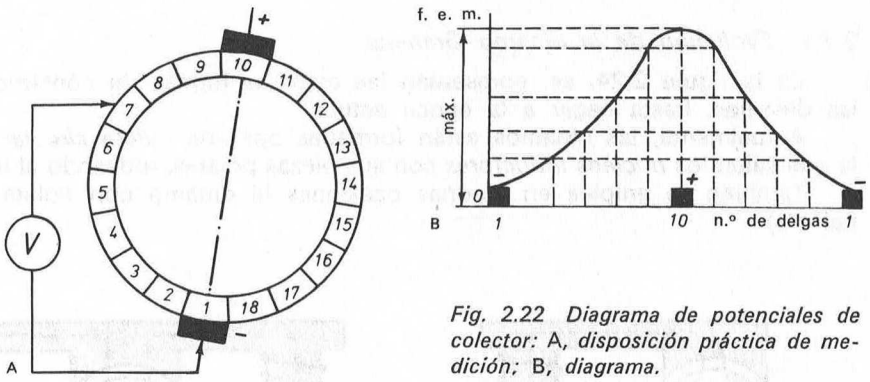


Fig. 2.22 Diagrama de potenciales de colector: A, *disposición práctica de medición;* B, *diagrama.*

Si se toma como potencial 0 el de la escobilla negativa, situada en la línea neutra, el potencial va aumentando en las delgas siguientes hasta llegar a su valor máximo, que estará en la escobilla positiva.

2.5.3.1 *Conclusiones*

Una dínamo bien construida presentará un *diagrama simétrico* con respecto a la línea neutra, puesto que las ff. ee. mm. inducidas en cada bobina son iguales y, por tanto, es indiferente medir las tensiones a la izquierda o a la derecha de la línea neutra.

Al cambiar la posición de las escobillas, *disminuirá la f. e. m. total,* debido a que la tensión máxima se produce en las escobillas situadas en la línea neutra.

2.6 **Dínamo Gramme multipolar**

La dínamo estudiada anteriormente disponía de un campo magnético suministrado por los polos *N* y *S* (bipolar).

Sin embargo, en las máquinas de gran potencia el flujo magnético ha de ser elevado y, por consiguiente, también lo serán las *secciones* de las piezas que constituyen el circuito magnético (polos, culata, inducido). Las máquinas así construidas presentarían los inconvenientes de peso, volumen y coste elevado.

2.6.1 *Clasificación*

Para evitar los inconvenientes mencionados, se construyen las máquinas *multipolares* (fig. 2.23), que pueden ser tetrapolares, hexapolares, octopolares, etc.

En las dínamos multipolares el flujo magnético es proporcionado entre todos los polos y, por tanto, por cada polo pasará una *fracción de flujo* total. Así, si la dínamo tuviera 4 polos (2 N y 2 S), por cada polo pasa 1/2 del flujo total; si la dínamo fuese de 6 polos (3 N y 3 S), por cada uno pasaría 1/3 del flujo, etc.

2.6.2 *Funcionamiento*

El funcionamiento de esta dínamo es similar al de la dínamo bipolar. No obstante, puede apreciarse una variación en el número de escobillas, ya que aumentan de 2 a 4, y por la existencia de *2 líneas neutras.*

La situación de las escobillas se elige una vez aplicada a cada bobina la

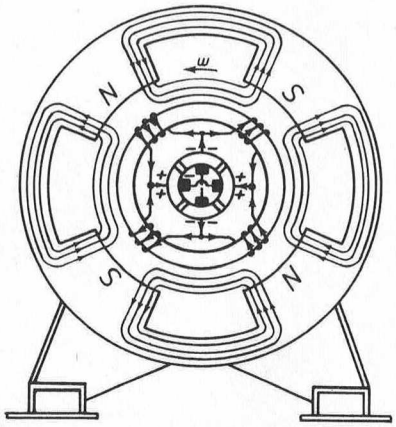


Fig. 2.23 Dínamo Gramme tetrapolar.

regla de Fleming de la mano derecha, correspondiendo las positivas a las zonas por donde se aproximan las corrientes; y las negativas, por donde se alejan.

El *terminal positivo* del generador saldrá de la unión de las escobillas positivas; y el *negativo,* de las escobillas negativas.

El flujo emitido por cada polo *N* se cierra a través de los polos *S* más próximos, y, por ello, el número total de polos (2 p) ha de ser siempre par.

2.7 Desarrollo histórico de las dínamos

La dínamo Gramme presentaba una serie de inconvenientes, como peso excesivo, mal rendimiento, inestabilidad, etc., que dieron lugar a grandes modificaciones posteriores.

2.7.1 *Evolución de la dínamo Gramme*

En la figura 2.24, se representan las distintas formas de construcción de las dínamos, hasta llegar a la época actual.

Actualmente, las dínamos están formadas por una *culata circular* (F), de la que salen los *núcleos inductores* con sus piezas polares, rodeando al inducido.

También se emplea en algunas ocasiones la dínamo con culata poligonal (G).

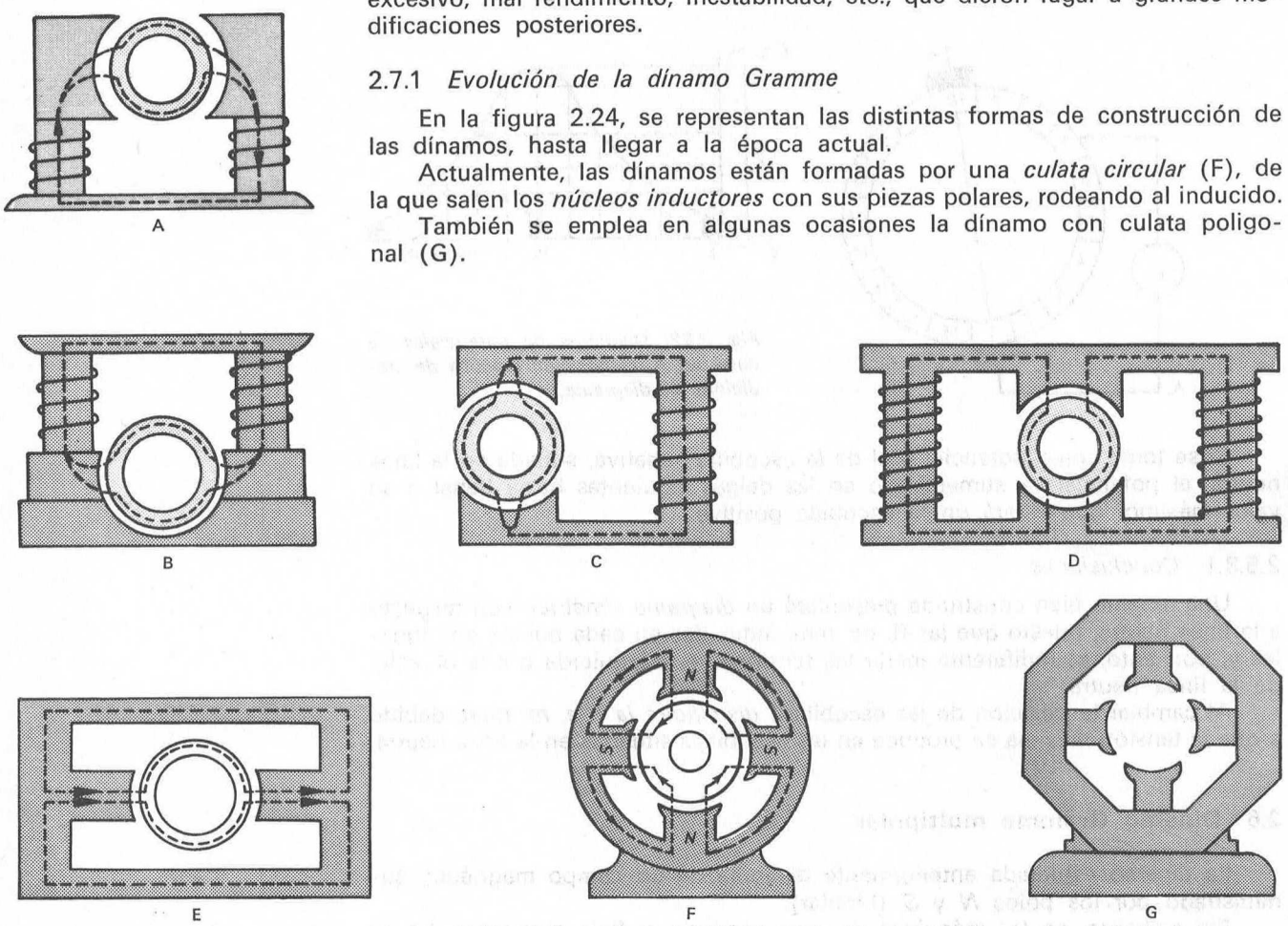


Fig. 2.24 Evolución de la dínamo.

2.8 Partes básicas de una máquina de corriente continua real

Debido a que el proceso de conversión de la energía mecánica en eléctrica es *reversible,* la constitución de la dínamo es idéntica para una dínamo o un motor de corriente continua.

En general, la máquina de corriente continua consta de un *devanado inductor* (que origina el campo magnético), y un *devanado inducido,* acoplados ambos por un *campo magnético.*

La máquina de corriente continua consta, básicamente, de las partes siguientes (fig. 2.25):

— Inductor.
— Inducido.
— Escobillas.
— Entrehierro.
— Cojinetes.

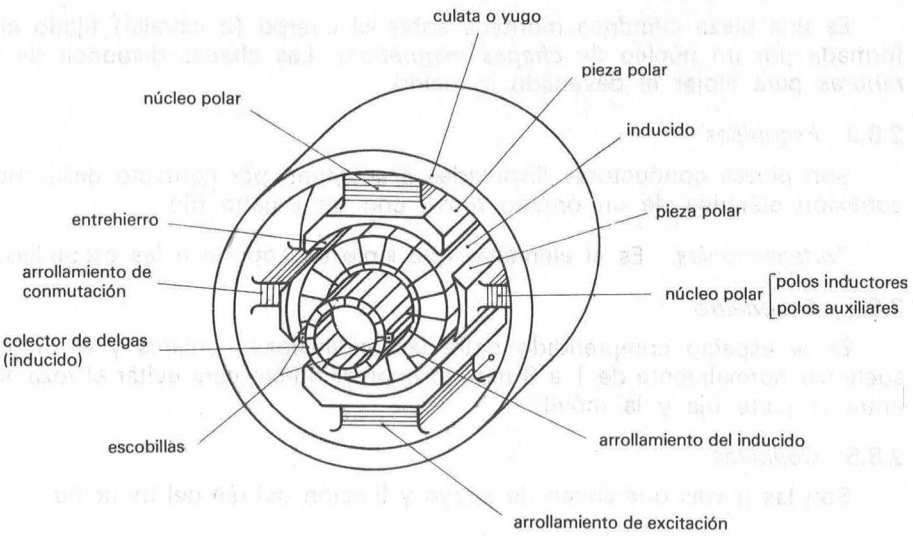


Fig. 2.25 Partes básicas de un motor de corriente continua.

2.8.1 *Inductor*

Es la parte de la máquina destinada a la producción del flujo magnético que ha de circular por el circuito magnético.

El inductor consta de las partes siguientes:

2.8.1.1 *Pieza polar*

Es la parte del circuito magnético situada entre la culata y el entrehierro, incluyendo el núcleo y la expansión polar.

Núcleo. Es la parte del circuito magnético rodeada por el devanado inductor.

Devanado inductor. Es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por la corriente eléctrica.

Expansión polar. Es la parte de la pieza polar próxima al inducido y que bordea al entrehierro.

2.8.1.2 *Polo auxiliar o de conmutación*

Es un polo magnético suplementario, provisto, o no, de devanados y destinado a mejorar la conmutación (producción de chispas entre el colector y escobillas). Suelen emplearse en las máquinas de mediana y gran potencia.

2.8.1.3 *Culata*

Es una pieza de sustancia ferromagnética, no rodeada por devanados, y destinada a unir los polos de la máquina.

2.8.2 *Inducido*

Es la parte giratoria de la máquina, también llamada *rotor.*

El inducido consta de las siguientes partes:

2.8.2.1 *Devanado inducido*

Es el devanado conectado al circuito exterior de la máquina y en el que tiene lugar la conversión principal de la energía.

2.8.2.2 *Colector*

Es el conjunto de láminas conductoras (delgas), aisladas unas de otras, pero conectadas a las secciones del devanado y sobre las cuales frotan las escobillas.

2.8.2.3 *Núcleo del inducido*

Es una pieza cilíndrica montada sobre el cuerpo (o estrella) fijado al eje, formada por un núcleo de *chapas magnéticas*. Las chapas disponen de unas *ranuras* para alojar el devanado inducido.

2.8.3 *Escobillas*

Son piezas conductoras destinadas a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica de un órgano móvil con un órgano fijo.

Portaescobillas. Es el elemento que sirve de soporte a las escobillas.

2.8.4 *Entrehierro*

Es el espacio comprendido entre las expansiones polares y el inducido; suele ser normalmente de 1 a 3 mm, lo imprescindible para evitar el rozamiento entre la parte fija y la móvil.

2.8.5 *Cojinetes*

Son las piezas que sirven de apoyo y fijación del eje del inducido.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Investigar sobre el generador de corriente continua magnetohidrodinámico (M. H. D.), basado en la transformación de la energía de un gas en energía eléctrica.

— Explicar el funcionamiento de una dínamo bipolar, con 6 espiras en el inducido, desviando las escobillas hasta 90° de su posición correcta.

— Explicar la obtención de f. e. m. en una dínamo octopolar que dispone de 12 bobinas en el inducido. El devanado inductor es alimentado por una batería.

CUESTIONARIO

2.1 Calcular el flujo magnético que atraviesa una superficie plana de 1,5 m^2, cuando el flujo y la superficie forman ángulos de 0°, 45°, 60° y 90°. La inducción magnética es de 500 Gs.

2.2 Calcular la energía producida en una espira plana cerrada de 25 cm^2 al introducirla normalmente a las líneas de fuerza de un campo magnético de 600 Gs, en 0,01 s. La corriente que circula por la espira es de 10 A. Emplear los sistemas Giorgi y c. g. s.

2.3 Calcular la inducción magnética en el interior de un solenoide de 200 espiras y de 110 cm de longitud, cuando es recorrido por una corriente de 10 A.

$$K_{Giorgi} = 4\ \pi \times 10^{-7}$$

Solución: $22{,}8 \times 10^{-4}$ T.

2.4 Se desplaza un conductor de 1,5 m en dirección normal a las líneas de fuerza de un campo magnético, de inducción 6×10^{-4} T.

El conductor se desplaza linealmente con una aceleración de 1 m/s^2, partiendo del reposo.

Construir un gráfico que exprese la f. e. m. inducida en el conductor, en función del tiempo, hasta pasados 5 s de ponerse en movimiento.

2.5 Se dispone de una bobina de 500 espiras y 40 cm^2 de sección, en posición normal a un campo magnético de intensidad 12 000 Av/m.

Hallar el valor de la f. e. m. media inducida, al girar 30° en una décima de segundo.

Solución: 8×10^{-5} V.

2.6 Averiguar la componente horizontal del campo magnético terrestre sabiendo que, en una antena metálica de 1 m de larga, instalada en un vehículo en posición vertical, se induce una f. e. m. de 3/4 mV, cuando el vehículo circula por un llano a 144 km/h.

Solución: 14,9 Av/m.

2.7 Un anillo de hierro está rodeado de 300 espiras y gira alrededor de un eje vertical con una velocidad de 600 r. p. m.; el anillo corta el campo magnético de β = 0,05 T, y tiene un diámetro medio de 50 cm. Hallar, por dos métodos diferentes, la f. e. m. media inducida.

Solución: 117,8 V.

2.8 Calcular la variación relativa de la f. e. m. resultante de una dínamo, sabiendo que su inducido dispone de 10 espiras, repartidas simétricamente.

Solución: 5,12 %.

2.9 ¿Qué desfase existe entre la f. e. m. inducida en una espira giratoria y el flujo que va cortando? Representar las funciones gráficamente, para el caso de una espira unida a dos anillos.

2.10 ¿Qué desventajas presenta el empleo del colector?

2.11 ¿Qué relación existe entre las expresiones:

$$e_m = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{y} \quad e_m = 2 \cdot n \cdot N \cdot \Phi$$

que aparecen en el tema?

2.12 ¿Cuáles son las principales modificaciones realizadas en la dínamo Gramme hasta la época actual?

2.13 Cuando es necesario disponer de corriente continua de baja tensión y fuerte intensidad, explicar cuál será la dínamo más apropiada: ¿bipolar o multipolar?

2.14 Explicar varios tipos de motores primarios empleados en el movimiento de los generadores.

2.15 Citar ejemplos donde se manifieste la inducción electromagnética.

BIBLIOGRAFIA

ALFARO E., *Curso de Electricidad,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.

NIARD J., *Curso de Electricidad I,* Toray-Masson, Barcelona 1971.

CORTES M., *Máquinas eléctricas de corriente continua,* Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1965.

MORILLO J., *Curso de Electrotecnia I,* Editorial Dossat, S. A., Madrid.

CASADO R., *Tecnología Eléctrica/2,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1976.

Tema 3
Devanados del inducido

OBJETIVOS

— *Analizar las características de cada devanado.*
— *Clasificar los devanados según su forma de ejecución.*
— *Enumerar los principales términos que intervienen en un devanado.*
— *Describir el proceso adecuado en el cálculo de un devanado.*
— *Resolver ejercicios sobre ejecución de devanados imbricados y ondulados.*
— *Comparar los devanados imbricados con los ondulados.*

GUION

— Generalidades sobre devanados.
— Norma exigible a un devanado en tambor.
— Conceptos generales sobre los devanados en tambor.
— Estudio del circuito eléctrico del devanado inducido.
— Tipos de devanado en tambor.
— Estudio del devanado imbricado simple.
— Estudio del devanado imbricado múltiple.
— Estudio del devanado ondulado en serie.
— Estudio del devanado ondulado en serie-paralelo.
— Resumen para la elección de un devanado de inducido.

PUNTOS CLAVE

— Identificar cada tipo de devanado.
— Indicar el devanado más adecuado según el tipo de máquina.

EXPOSICION DEL TEMA

3.1 Generalidades sobre devanados

En el tema anterior se explicó la relación existente entre el número de espiras del inducido y la f. e. m. inducida; también se hizo ver la importancia de disponer de un número elevado de conductores, para lograr un buen rendimiento de la máquina.

Se define el *devanado* como el conjunto de conductores que están alojados en el inducido y en el que tiene lugar la conversión principal de energía.

3.1.1 *Clasificación*

Una primera clasificación los divide en *abiertos* y *cerrados,* si bien en las máquinas de c. c. es necesario que sean *cerrados* para poder conectarlos al colector de delgas (fig. 3.1). Así, pues, los devanados de c. c. no tienen extremos libres, a diferencia de los devanados de máquinas de alterna (fig. 3.2).

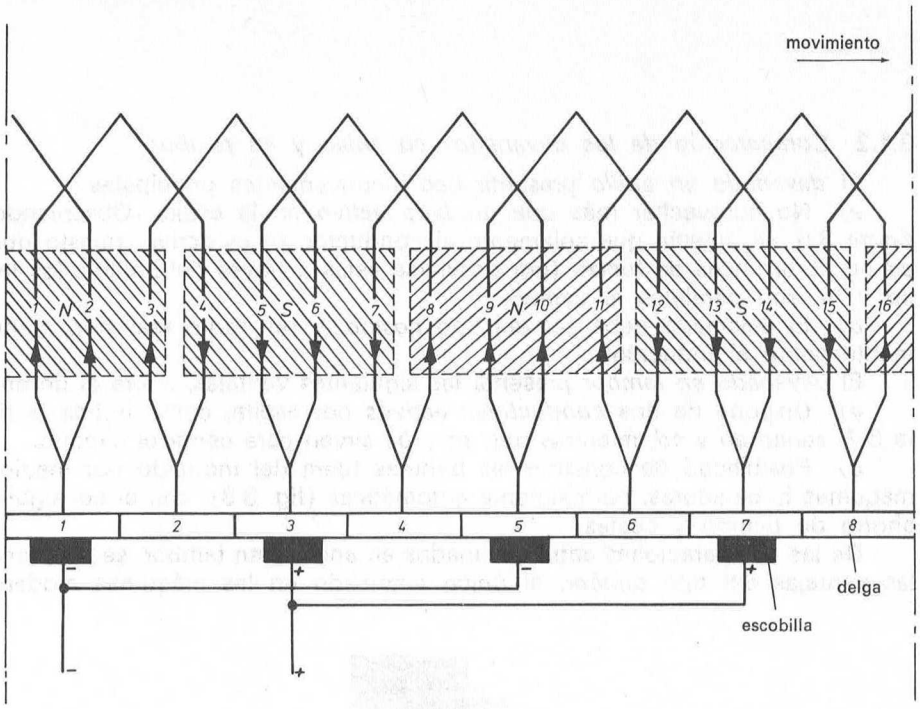


Fig. 3.1 Devanado cerrado.

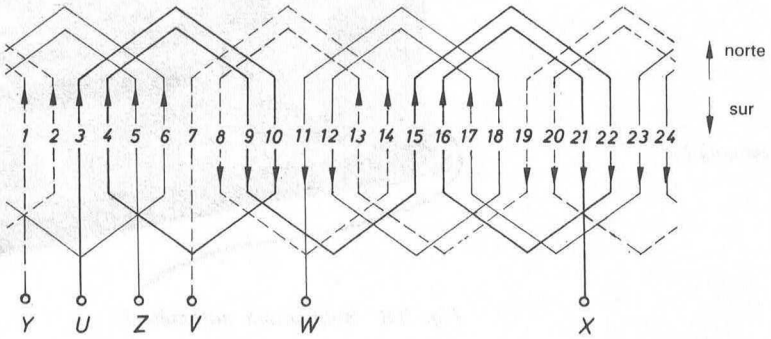


Fig. 3.2 Devanado abierto de corriente alterna.

Una segunda clasificación, según la forma de alojar los conductores sobre la armadura del inducido, los divide en:

— *Devanado en anillo.* Formado por espiras enrolladas alrededor de un núcleo magnético de forma anular, de modo que uno de los lados de cada espira pase por el interior del anillo; es el tipo de devanado utilizado por Gramme (fig. 3.3).

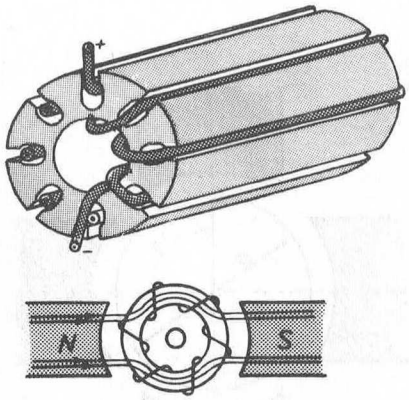


Fig. 3.3 Devanado en anillo.

— *Devanado en tambor.* Formado por espiras colocadas sobre la superficie cilíndrica del núcleo magnético del inducido, determinando planos paralelos al eje de giro (fig. 3.4).

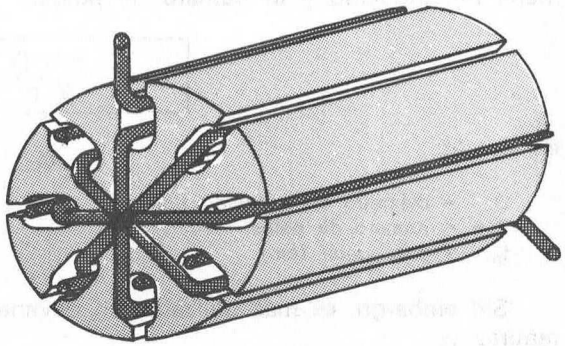


Fig. 3.4 Devanado en tambor.

— *Devanado en disco.* Formado por grupos de conductores activos situados en un plano normal al eje de rotación (fig. 3.5). Este tipo puede decirse que prácticamente nunca se ha utilizado.

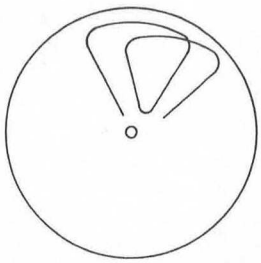


Fig. 3.5 Devanado en disco.

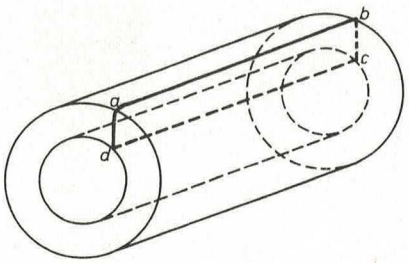


Fig. 3.6 Espira de un devanado en anillo.

3.1.2 *Comparación de los devanados en anillo y en tambor*

El *devanado en anillo* presenta dos inconvenientes principales:

a) No aprovechar más que un *lado activo* en la espira. Observando la figura 3.6, se aprecia que solamente el conductor *ab* es activo, puesto que el *cd* no corta líneas de fuerza (por desviarse éstas a través del anillo); los lados *ad* y *bc* son paralelos al campo.

b) El devanado debe ser del tipo *cosido,* y por tanto realizado manualmente sobre el inducido.

El *devanado en tambor* presenta las siguientes ventajas, sobre el de anillo:

a) Dispone de dos *conductores activos* por espira, como indica la figura 3.7; serían *ab* y *cd,* mientras que *ad* y *bc* sirven para cerrar el circuito.

b) Posibilidad de construir las bobinas fuera del inducido por medio de máquinas bobinadoras, normalmente automáticas (fig. 3.8), con el consiguiente ahorro de tiempo y costes.

De las comparaciones entre devanados en anillo y en tambor, se desprenden las ventajas del tipo *tambor,* el único empleado en las máquinas modernas.

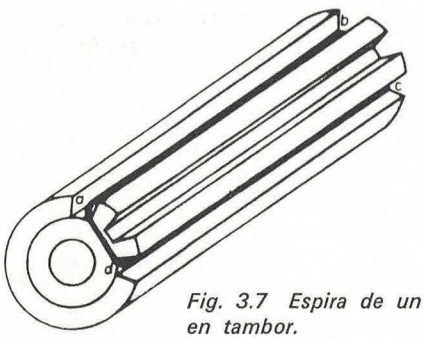


Fig. 3.7 Espira de un devanado en tambor.

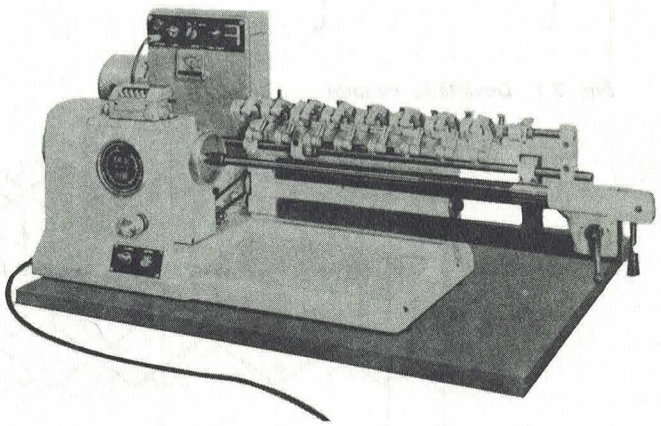


Fig. 3.8 Bobinadora automática.

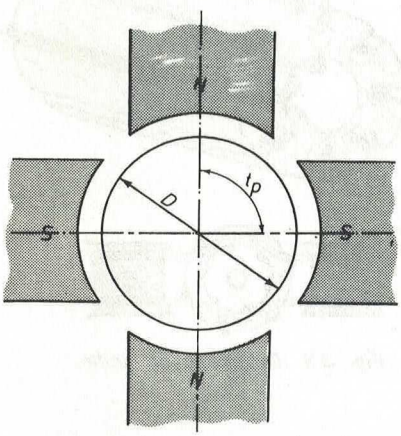


Fig. 3.9 Paso polar.

3.2 Norma exigible a un devanado en tambor

Un requisito imprescindible para el devanado en tambor es la situación de los dos conductores activos (que forman cada espira) bajo polos contrarios, con objeto de que se sumen sus ff. ee. mm. inducidas. Para ello, es necesario que dichas ff. ee. mm. tengan sentidos opuestos y, por ello, la distancia entre ambos conductores debe ser próxima al *paso polar.*

3.2.1 *Paso polar*

Se define el *paso polar* como la distancia periférica entre los puntos que ocupan la misma posición sobre dos polos consecutivos, y se designa por t_p (fig. 3.9).

El valor del paso polar se obtiene por cociente entre la longitud de la periferia del inducido y el número de polos:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2\,p}$$

en donde:

D = diámetro del inducido (cm)
2 p = número de polos
t_p = paso polar (cm)

Sin embargo, es más utilizado, en devanados, el paso polar expresado en ranuras y_p:

$$y_p = \frac{K}{2\,p}$$

en donde:

K = número de ranuras del inducido
y_p = paso polar en ranuras

3.3 Conceptos generales sobre los devanados en tambor

Los devanados en tambor están formados por bobinas alojadas en las ranuras del inducido. A su vez, las bobinas se unen entre sí y con el colector de delgas.

Antes de entrar en materia de cálculo y clasificación de estos devanados, es necesario definir los conceptos más generalizados.

3.3.1 *Elementos del núcleo magnético inducido*

Inducido dentado. Inducido cuyo devanado está alojado en unas ranuras (fig. 3.10).

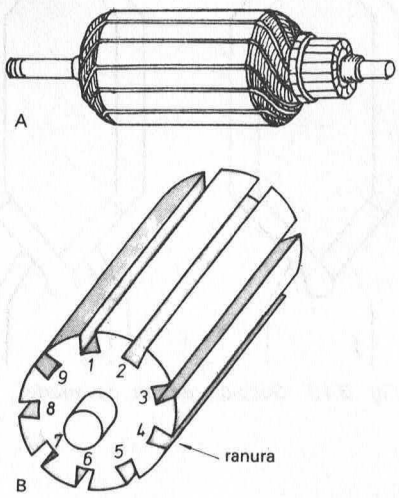


Fig. 3.10 Inducido dentado: A, *inducido bobinado;* B, *inducido sin bobinar.*

Ranura (K). Escotadura practicada en una pieza metálica para alojar en ella los conductores de un devanado (fig. 3.11).

Diente. Parte de hierro comprendida entre dos ranuras consecutivas (figura 3.11).

Delgas (D). Lámina conductora conectada a la sección de un devanado y sobre la que frotan las escobillas.

Colector. Conjunto de delgas aisladas entre sí (fig. 3.12).

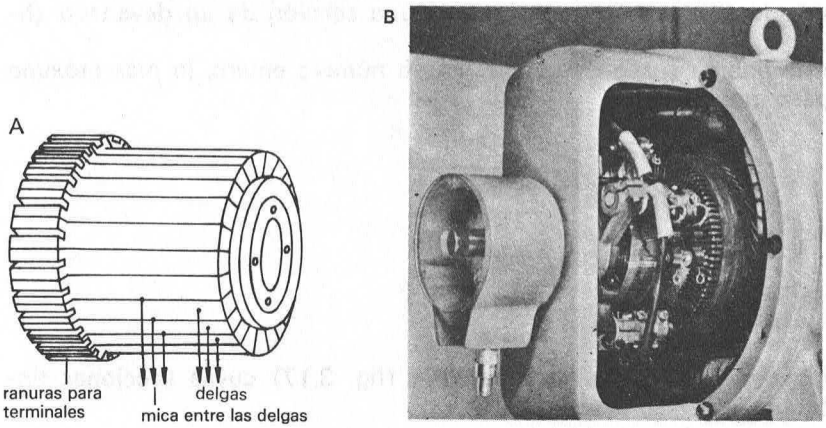


Fig. 3.12 Colector de delgas: A, *partes constituyentes;* B, *vista de un colector.*

3.3.2 *Términos relativos a los devanados*

Espira. Parte elemental de un devanado, formada por dos conductores activos.

Sección de un devanado (S). La parte más pequeña de un devanado cuyas extremidades están conectadas a dos delgas del colector. En la figura 3.13 se representan bobinas de 1, 2 ó 3 secciones, según dispongan de 2, 4 ó 6 extremos libres respectivamente. El número de secciones por bobina es *U*.

Rama o derivación. Conjunto de las secciones de un devanado que, en un instante dado, se encuentran en serie entre dos escobillas consecutivas de signos opuestos.

El número total de ramas se designa por *2 c.*

Bobina (B). Grupo de espiras que forman una unidad antes de ser instaladas en la máquina; una bobina está compuesta de una o varias secciones, envueltas generalmente por un aislante (fig. 3.13).

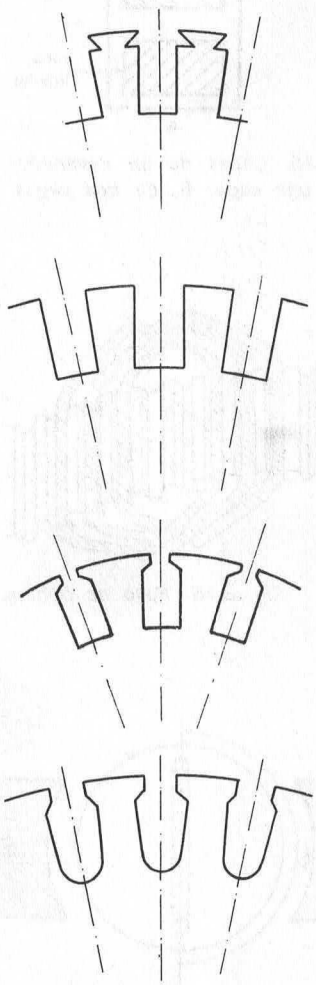


Fig. 3.11 Ranuras y dientes del inducido.

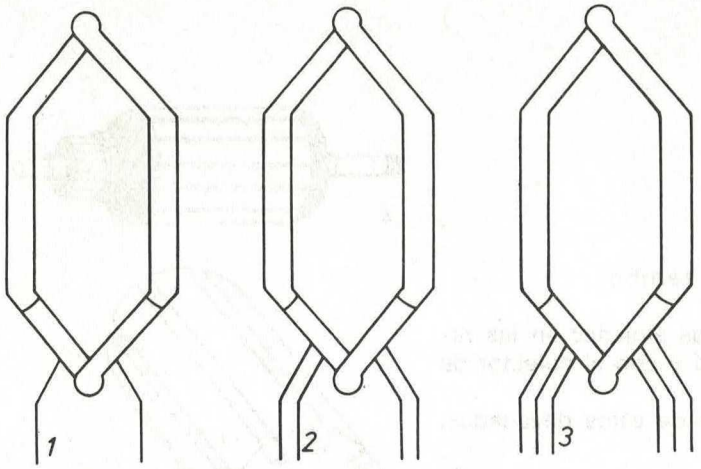


Fig. 3.13 Sección de un devanado.

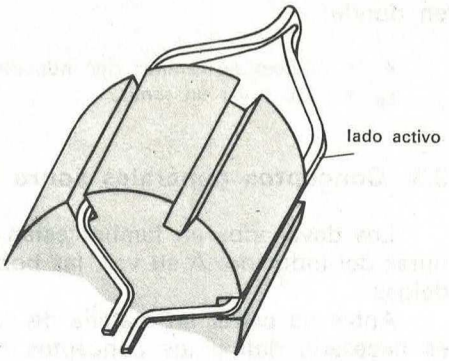


Fig. 3.14 Situación de una bobina.

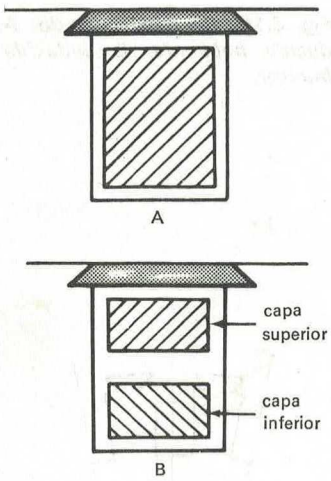


Fig. 3.15 Capas de un devanado: A, de una capa; B, de dos capas.

Lado activo. Cada una de las partes de una bobina o sección alojadas en una ranura. Se llama activo por ser la parte de la bobina que corta las líneas de fuerza (fig. 3.14).

Cabeza de bobina. Parte exterior al hierro comprendida entre dos ranuras de una bobina. La parte próxima al colector es la cabeza anterior, mientras que la opuesta es la posterior (fig. 3.14).

Capas. Se dice que un devanado es de una o de dos capas, según contenga uno o dos lados activos de bobinas diferentes superpuestos en una misma ranura. Actualmente se realizan de dos capas (fig. 3.15).

Paso de bobina (y_k). Número de dientes que separan las ranuras en las que están situados los dos lados activos de una sección de un devanado (figura 3.16).

El paso de bobina (paso de ranura) es un número entero, lo más próximo posible al paso polar.

$$y_k \approx y_p$$

en donde:

y_k = paso de bobina
y_p = paso polar

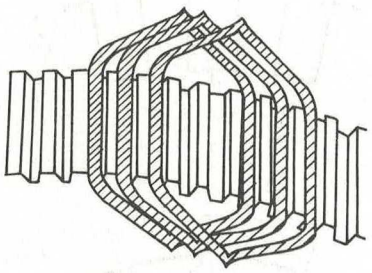


Fig. 3.16 Paso de bobina.

Devanado de paso diametral. Devanado (fig. 3.17) cuyas secciones tienen una anchura igual al paso polar:

$$y_k = y_p$$

Devanado de paso parcial. Devanado en el que el paso medio de la bobina no es igual al paso polar. Si es inferior al paso polar, se denomina *paso acortado* ($y_k < y_p$), y si es superior, *paso alargado* ($y_k > y_p$).

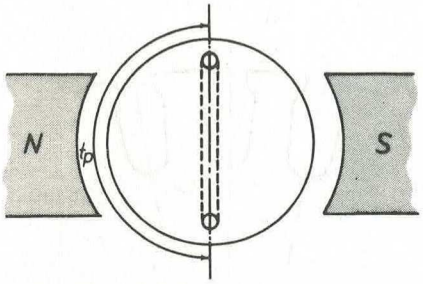


Fig. 3.17 Devanado de paso diametral.

Paso parcial posterior (y_1) o ancho de sección. Distancia medida en secciones del devanado, entre los dos lados activos de una misma sección. Es siempre un número entero. En la figura 3.18 se muestran los dos tipos de devanados en tambor: *imbricado y ondulado.*

Paso parcial anterior (y_2) o paso de conexión. Distancia medida en secciones del devanado, entre el lado activo final de una sección y el lado activo, principio de la siguiente. Es siempre un número entero (fig. 3.18).

Paso resultante (y). Distancia, medida en secciones del devanado, entre el lado activo, principio de una sección, y el lado activo, principio de la sección siguiente (fig. 3.18).

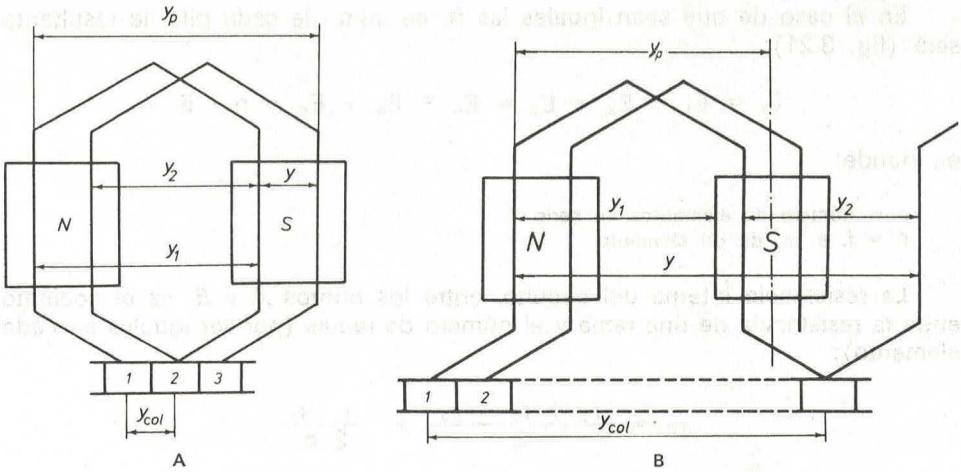


Fig. 3.18 Pasos de un devanado: A, *devanado imbricado;* B, *devanado ondulado.*

Paso en el colector ($y_{col.}$). Número de delgas comprendidas entre los extremos de una sección del devanado (fig. 3.18).

La figura 3.19 muestra un inducido de una máquina de c. c., mientras que la figura 3.20 representa el devanado una vez seccionado y abierto su inducido.

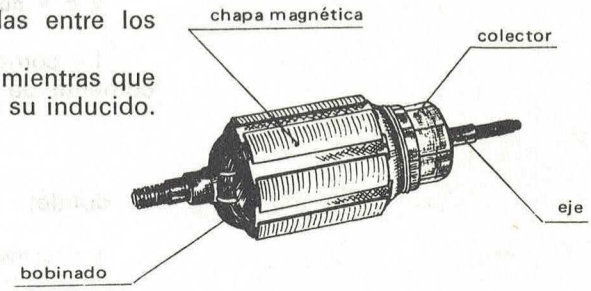


Fig. 3.19 Vista exterior del inducido.

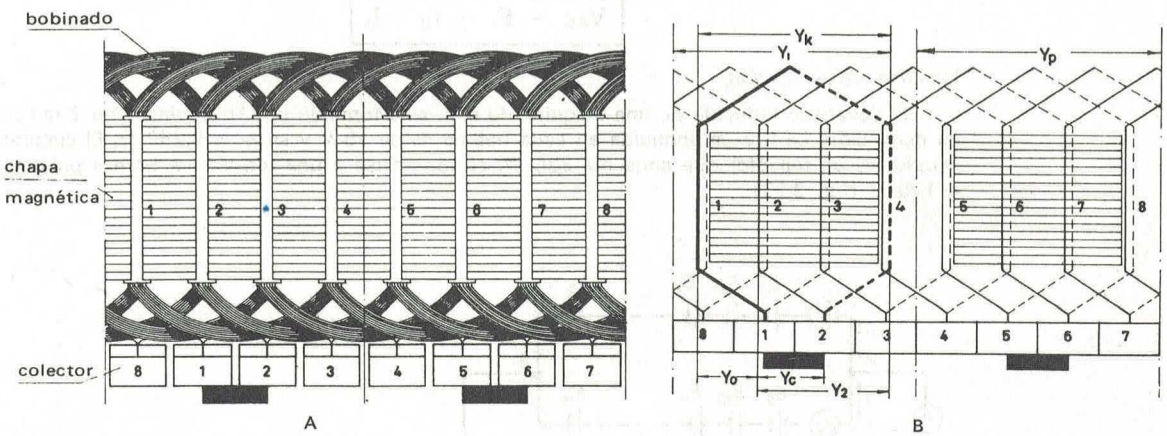


Fig. 3.20 Devanado del inducido: A, *desarrollo del inducido;* B, *esquema simplificado.*

3.4 Estudio del circuito eléctrico del devanado inducido

La disposición del devanado inducido da lugar a un número de derivaciones (2 c) que variará según el tipo de devanado, con un mínimo de dos circuitos derivados.

El circuito eléctrico del devanado puede considerarse similar al de un acoplamiento mixto de pilas (fig. 3.21), donde cada pila reemplaza a una bobina de la misma f. e. m. y resistencia interna.

3.4.1 *Devanado formado por bobinas iguales*

El circuito es similar al caso anterior, donde se sustituyen las bobinas por pilas, ya que proporcionan circuitos más sencillos.

La f. e. m. resultante depende del número de elementos en serie.

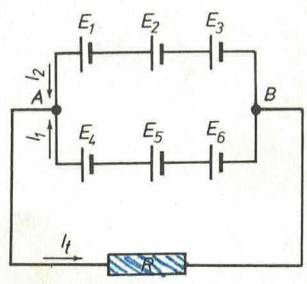


Fig. 3.21 Acoplamiento mixto.

En el caso de que sean iguales las ff. ee. mm. de cada pila, la resultante será (fig. 3.21):

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 = E_4 + E_5 + E_6 = n \cdot E$$

en donde:

n = número de elementos en serie
E = f. e. m. de un elemento

La resistencia interna del circuito, entre los puntos *A* y *B*, es el cociente entre la resistencia de una rama y el número de ramas (por ser iguales en cada elemento):

$$r_{it} = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{2} = \frac{n \cdot r_i}{2\ c}$$

en donde:

r_i = resistencia interior de un elemento
2 c = número de ramas

La corriente suministrada por el circuito al exterior es el producto de la corriente de un elemento por el número de ramas:

$$I_t = 2 \cdot I_1 = 2 \cdot I_2 = (2\ c) \cdot I$$

en donde:

I = corriente suministrada por un elemento

La tensión en bornes del circuito (V_{AB}) se obtiene restando de la f. e. m. total, la caída interna total:

$$\boxed{V_{AB} = E_t - r_{it} \cdot I_t}$$

Ejercicio de aplicación

El devanado inducido de una máquina de c. c. está formado por 16 bobinas con 2 ramas en derivación. La f. e. m. inducida en cada bobina es de 15 V y su r_i de 0,250 Ω. El circuito exterior es un receptor que consume 236 W, al conectarse a una tensión en bornas próxima a 120 V (fig. 3.22).

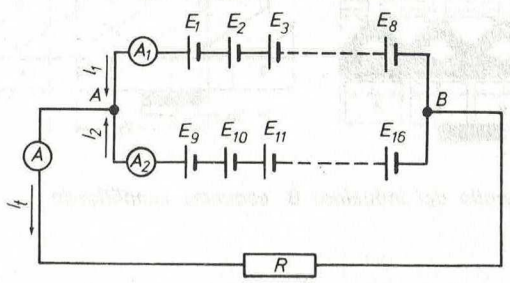


Fig. 3.22 Circuito formado por 16 bobinas iguales.

Hallar:
1.º La corriente absorbida por el receptor.
2.º La tensión en bornes del receptor.
3.º La corriente que circula por cada bobina.
4.º La corriente que circula por cada bobina al desconectar el receptor.

Solución:

1.º Para averiguar la corriente que suministra el devanado, es necesario plantear las siguientes ecuaciones:

$$V_{AB} = E_t - r_{it} \cdot I_t$$

$$P = V_{AB} \cdot I_t$$

en donde:

V_{AB} = tensión en bornes del receptor
P = potencia consumida por el receptor

A su vez, la f. e. m. total es la suma de 8 elementos en serie:

$$E_t = n \cdot E = 8 \times 15 = 120 \text{ V}$$

La r_{it} del devanado será:

$$r_{it} = \frac{n \cdot r_i}{2\ c} = \frac{8 \times 0{,}250}{2} = 1\ \Omega$$

Al sustituir en las ecuaciones, quedará:

$$\left.\begin{array}{l} V_{AB} = 120 - 1 \cdot I_t = 120 - I_t \\ 236 = V_{AB} \cdot I_t \end{array}\right\} \quad V_{AB} = \frac{236}{I_t}$$

$$\frac{236}{I_t} = 120 - I_t; \qquad 236 = 120 \cdot I_t - I_t^2$$

Ordenando la ecuación de 2.º grado, resulta:

$$I_t^2 - 120 \cdot I_t + 236 = 0$$

Las soluciones:

$$I_t = \frac{120 \pm \sqrt{120^2 - 4 \times 1 \times 236}}{2 \times 1} = \frac{120 \pm 116}{2} = \begin{cases} 118 \text{ A} \\ 2 \text{ A} \end{cases}$$

2.º Al obtenerse dos posibles intensidades, también habrá dos posibles tensiones:

$$V_{AB} = E_t - r_i \cdot I_t = \begin{cases} 120 - 1 \times 118 = 2 \text{ V} \\ 120 - 1 \times 2 = 118 \text{ V} \end{cases}$$

Pero según indicaba el enunciado, el receptor consumía 236 W para una *tensión próxima a 120 V,* por lo que quedará como tensión válida la de 118 V y, por tanto, como intensidad total: 2 A.

3.º La corriente que circula por cada bobina es la mitad de la total:

$$I_1 = I_2 = \frac{I_t}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ A}$$

Así, pues, los amperímetros A_1 y A_2 señalarán 1 A.

4.º La desconexión del receptor anula el consumo de corriente y, por tanto, no circulará ninguna corriente por ninguna rama, ya que todas las bobinas suministran la misma f. e. m. tienen la misma r_i y están conectadas en oposición.

3.4.2 *Devanado formado por bobinas diferentes*

Al ser las bobinas diferentes, también lo serán sus características eléctricas: *f. e. m.* y r_i; esto dará lugar a un *funcionamiento anómalo,* como se comprobará a continuación.

Para simplificar el circuito, se consideran solamente dos bobinas en derivación, cuyas ff. ee. mm. son E_1 y E_2, y resistencias internas r_1 y r_2 (fig. 3.23).

La tensión en bornas del receptor (V_{AB}) será:

$$\left.\begin{array}{l} V_{AB} = E_1 - r_1 \cdot I_1 \\ V_{AB} = E_2 - r_2 \cdot I_2 \end{array}\right\} \quad E_1 - r_1 \cdot I_1 = E_2 - r_2 \cdot I_2$$

La corriente total (I_t) será:

$$I_t = I_1 + I_2; \qquad I_2 = I_t - I_1$$

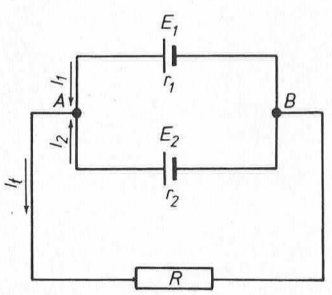


Fig. 3.23 Esquema simplificado.

Al sustituir la I_2, quedará:

$$E_1 - r_1 \cdot I_1 = E_2 - r_2 \cdot (I_t - I_1) = E_2 - r_2 \cdot I_t + r_2 \cdot I_1$$

Agrupando términos, y despejando el valor de I_1, resulta:

$$\boxed{I_1 = \frac{(E_1 - E_2) + r_2 \cdot I_t}{r_1 + r_2}}$$

3.4.3 *Casos particulares*

Examinando la expresión anterior, se comprueba que el valor de las intensidades será correcto cuando $E_1 = E_2$, y $r_1 = r_2$, ya que resultará:

$$I_1 = \frac{(E_1 - E_1) + r_2 \cdot I_t}{r_2 + r_2} = \frac{0 + r_2 \cdot I_t}{2 \cdot r_2} = \frac{I_t}{2}$$

Si sólo se cumple que $r_1 = r_2 = r$, resultará:

$$I_1 = \frac{(E_1 - E_2) + r_2 \cdot I_t}{r + r} = \frac{E_1 - E_2}{2 \cdot r} + \frac{I_t}{2}$$

superior a lo normal, con el consiguiente desequilibrio de corrientes y mal funcionamiento de la máquina.

Si sólo se cumple que $E_1 = E_2 = E$, resultará:

$$\left.\begin{aligned} V_{AB} &= E - r_1 \cdot I_1 \\ V_{AB} &= E - r_2 \cdot I_2 \end{aligned}\right\} \; E - r_1 \cdot I_1 = E - r_2 \cdot I_2$$

y, por tanto: $r_1 \cdot I_1 = r_2 \cdot I_2$; o bien:

$$\boxed{\frac{r_1}{r_2} = \frac{I_2}{I_1}}$$

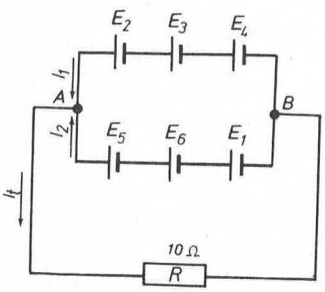


Fig. 3.24 Circuito formado por 6 bobinas diferentes.

Ejercicio de aplicación

Un devanado con 2 ramas está formado por 6 bobinas, cuyos datos son: $E_1 = E_3 = E_4 = 10$ V; $r_1 = r_3 = r_4 = 0{,}2\ \Omega$; $E_2 = E_5 = E_6 = 12$ V; $r_2 = r_5 = r_6 = 0{,}18\ \Omega$ (fig. 3.24).

Averiguar la corriente que circula por cada rama en el instante en que quedan comprendidas entre escobillas las bobinas 2, 3 y 4 en una rama y las 5, 6 y 1 en otra. El receptor exterior es una resistencia de 10 Ω.

Solución:

Esta máquina suministrará una f. e. m. diferente en cada instante, por serlo las ff. ee. mm. de cada rama.

En el instante citado, el valor de la tensión en bornas será:

1.ª

$$V_{AB} = (E_2 + E_3 + E_4) - I_1 \cdot (r_2 + r_3 + r_4)$$

$$= (12 + 10 + 10) - I_1 \cdot (0{,}18 + 0{,}2 + 0{,}2) = 32 - 0{,}58 \cdot I_1$$

2.ª

$$V_{AB} = (E_5 + E_6 + E_1) - I_2 \cdot (r_5 + r_6 + r_1)$$

$$= (12 + 12 + 10) - I_2 \cdot (0{,}18 + 0{,}18 + 0{,}2) = 34 - 0{,}56 \cdot I_2$$

3.ª

$$V_{AB} = R \cdot I_t = 10 \cdot I_t = 10 \cdot (I_1 + I_2)$$

Igualando las tres ecuaciones:

$$32 - 0{,}58 \cdot I_1 = 34 - 0{,}56 \cdot I_2 = 10 \cdot I_1 + 10 \cdot I_2$$

Despejando I_1 de la 3.ª, resultará:

$$I_1 = \frac{34 - 0{,}56 \cdot I_2 - 10 \cdot I_2}{10}$$

Y al sustituirla en la 1.ª, dará:

$$32 - 0{,}58 \left(\frac{34 - 0{,}56 \cdot I_2 - 10 \cdot I_2}{10} \right) = 34 - 0{,}56 \cdot I_2$$

$$320 - 19{,}72 + 0{,}3248 \cdot I_2 + 5{,}8 \cdot I_2 = 340 - 5{,}6 \cdot I_2$$

$$11{,}72 \cdot I_2 = 39{,}72$$

Obteniéndose para el valor de I_2:

$$I_2 = \frac{39{,}72}{11{,}72} = 3{,}38 \text{ A}$$

El valor de I_1 es:

$$I_1 = \frac{34 - 0{,}56 \times 3{,}38 - 10 \times 3{,}38}{10} = -0{,}177 \text{ A}$$

La corriente total será:

$$I_t = I_1 + I_2 = -0{,}177 + 3{,}38 = 3{,}203 \text{ A}$$

Comprobándose que la corriente I_2 alimenta el circuito exterior y la rama superior, por ser I_1 negativa. Esto da lugar a una corriente de circulación $-I_1$, que hará disminuir el rendimiento de la máquina.

3.4.3.1 *Resumen*

Para evitar las corrientes de circulación, que restarían potencia a la máquina y darían lugar a un funcionamiento irregular, es necesario que las ff. ee. mm. inducidas en cada rama sean iguales. Conseguir esa igualdad supone que en cada rama exista el *mismo número de bobinas,* y que éstas contengan los *mismos conductores activos* y sean de *forma idéntica.*

3.5 Tipos de devanado en tambor

La conexión de las bobinas sucesivas puede hacerse de dos formas, dando lugar a dos tipos de devanado: *imbricado* y *ondulado.* En cualquier tipo de devanado deben sumarse las ff. ee. mm. inducidas en las bobinas; sus conexiones se harán pasando por las delgas del colector.

3.5.1 *Devanado imbricado*

Devanado con pasos parciales (anterior y posterior) que tienen sentidos contrarios.

En la figura 3.25 se representan dos secciones inducidas, conectadas según un devanado imbricado, siguiendo los esquemas circular (*A*) y rectangular (*B*). El esquema más utilizado es el tipo *rectangular* debido a su sencillez de dibujo e interpretación.

Para la realización del devanado (fig. 3.25), se parte de la delga *1*, se avanza por la cara posterior y se retrocede por la anterior hasta llegar a la delga *2*, donde empieza la sección siguiente.

El devanado imbricado se divide en *simple* y *múltiple.*

3.5.2 *Devanado ondulado*

Es el devanado con pasos parciales (anterior y posterior) que tienen el mismo sentido.

En la figura 3.26 se representan las dos secciones inducidas, conectadas según un devanado ondulado.

En la realización del devanado se parte de la delga *1* y se avanza por las caras posterior y anterior, hasta llegar a la delga, que será el principio de la sección siguiente.

El devanado ondulado se divide en *serie* y *serie-paralelo.*

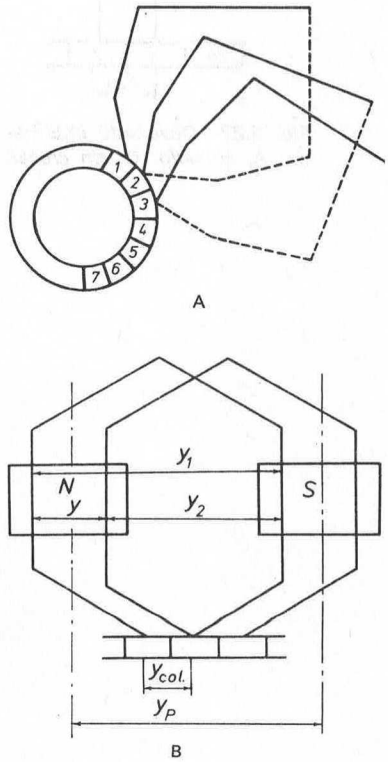


Fig. 3.25 Devanado imbricado: A, *esquema circular;* B, *esquema rectangular.*

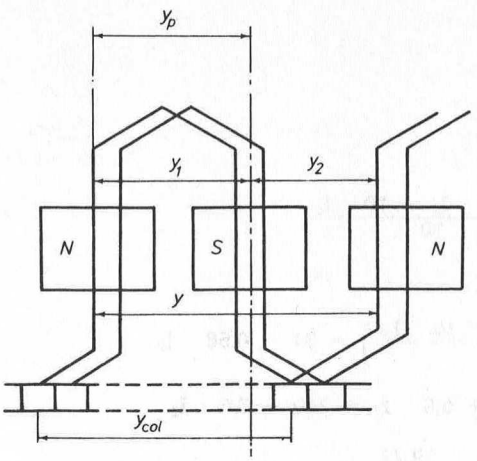


Fig. 3.26 Devanado ondulado.

3.6 Estudio del devanado imbricado simple

Es el devanado con paso en el colector igual a la unidad, por lo cual cada sección de devanado estará unida con la sección contigua.

El paso en el colector es la diferencia entre los pasos parciales:

$$y_{col.} = y_1 - y_2$$

3.6.1 *Tipos de devanado imbricado simple*

Un paso en el colector igual a la unidad da lugar a dos tipos de devanados imbricados:

a) *Cruzado* (también conocido por regresivo) (fig. 3.27).

El paso en el colector es:

$$y_{col.} = -1$$

b) *Sin cruzar* (también conocido por progresivo) (fig. 3.27).

El paso en el colector es:

$$y_{col.} = +1$$

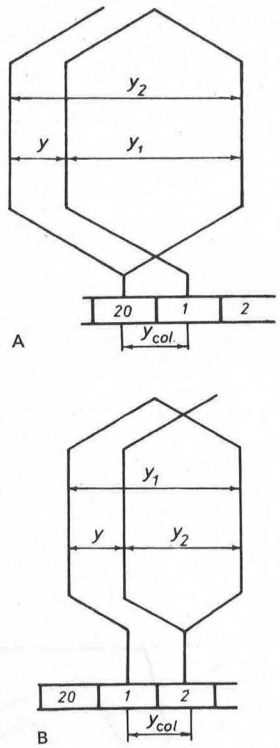


Fig. 3.27 Devanado imbricado: A, *cruzado;* B, *sin cruzar.*

3.6.2 *Normas necesarias para un devanado imbricado simple*

1.ª El número total de ramas en paralelo es igual al número de polos:

$$2\,c = 2\,p$$

$$c = p$$

en donde:

2 c = número de ramas en derivación
2 p = número de polos

2.ª El número de conductores activos debe ser idéntico en cada rama. Por tanto, el número total de conductores ha de ser múltiplo del número de ramas (2 c).

En el devanado normal de dos capas (B = K), el número total de conductores activos es dos veces el número de ranuras (2 K), de forma que:

$$\frac{2\,K}{2\,c} = \text{número entero}$$

O bien:

$$\frac{K}{c} = \frac{K}{p} = \text{número entero}$$

Así, pues, el número de ranuras será múltiplo del número de pares de polos.

3.ª Como en cada delga se conectan dos extremidades, que corresponden a dos secciones de un devanado, el número total de delgas coincide con el de secciones.

$$D = S = B \cdot U = K \cdot U$$

Al ser el número de ranuras (K) múltiplo del número de pares de polos (p), también lo será el número de delgas (D), puesto que $D = K \cdot U$.

4.ª Para evitar que las ff. ee. mm. inducidas en las ramas del devanado sean muy diferentes entre sí, es necesario tener un cuidado especial al construir la máquina. A pesar de las precauciones, es probable que no se consiga la igualdad de ff. ee. mm., siendo necesario recurrir a las conexiones *equipotenciales.*

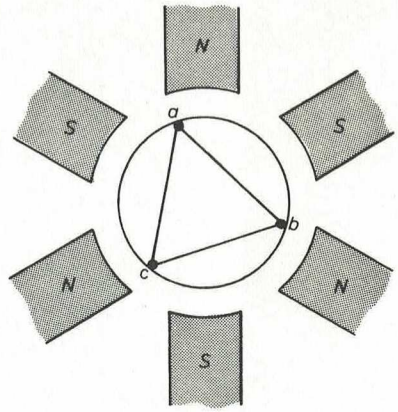


Fig. 3.28 Puntos equipotenciales.

3.6.3 *Conexiones equipotenciales*

El inducido que dispone de un bobinado imbricado está sometido a corrientes circulatorias, debido a la desigualdad entre las ff. ee. mm. de las distintas derivaciones. El origen de esta desigualdad se debe a desequilibrios de flujos (por defectos de material o montaje), variación en el entrehierro de unos puntos a otros, construcción de bobinas con diferente número de conductores o dimensiones, etc.

La corriente circulatoria se suma a la corriente principal (nominal), dando lugar a un calentamiento en las escobillas y a un aumento de chispas que pueden producir averías en la máquina.

Para evitar que las corrientes circulatorias pasen a través de las escobillas, se emplean las *conexiones equipotenciales,* que unirán los puntos del devanado que deberían permanecer al mismo potencial.

Las conexiones equipotenciales pueden ser de primera y segunda clase.

3.6.3.1 *Número de conexiones equipotenciales en el devanado imbricado simple*

Como los puntos equipotenciales, en un instante dado, se encuentran bajo polos del mismo signo (fig. 3.28), es necesario unir entre sí tantos puntos como pares de polos; así, en la figura 3.28, los puntos equipotenciales son *a, b, c.*

Normalmente, es suficiente con disponer de tantas bobinas equipotenciales como número de ranuras ($B_{equip.} = K$). A este tipo de conexiones se les llama de *1.ª clase* y suelen conectarse en las cabezas anteriores de las secciones.

El paso de la bobina equipotencial es el cociente entre el número de bobinas equipotenciales y el número de pares de polos:

$$y_{equip.} = \frac{B_{equip.}}{p} = \frac{K}{p}$$

en donde:

K = número de ranuras
p = pares de polos

3.6.4 *Cálculo de un devanado imbricado simple*

A continuación, se indican los pasos adecuados en el cálculo de un devanado imbricado simple:

Datos de partida:

a) Número de polos: *2 p.*
b) Número de ranuras: *K.*
c) Número de capas: 1 ó 2.
d) Número de secciones por bobina: *U.*
e) Tipo de devanado *cruzado:* $y_{col.} = -1$.
sin cruzar: $y_{col.} = +1$.
f) Conexiones equipotenciales.

1.º *Posibilidad de realización.* Se comprobará que el cociente entre el número de ranuras y el número de pares de polos es un número entero.

$$\frac{K}{p} = \text{número entero}$$

2.º *Paso de bobina.* Debe elegirse lo más próximo posible al paso polar. Puede tomarse el paso acortado o el alargado.

$$y_k \approx y_p$$

3.º *Número de delgas del colector.* Es el producto del número de bobinas por el número de secciones del devanado.

$$D = B \cdot U$$

4.º *Paso posterior.* Es el producto del paso de bobina por el número de secciones del devanado.

$$y_1 = y_k \cdot U$$

5.º *Paso anterior.* Se deduce de la expresión que relaciona los pasos parciales con el paso en el colector.

$$y_2 = y_1 - y_{col.}$$

6.º *Conexiones equipotenciales.* Se halla el número de conexiones equipotenciales, el número de bobinas y el paso de estas bobinas.

El paso en ranuras es:

$$y_{equip.} = \frac{K}{p}$$

7.º *Escobillas.* La escobilla se sitúa en contacto con aquellas delgas que, en un instante determinado, recogen o envían la corriente al inducido por sus dos conductores (fig. 3.29).

La escobilla positiva envía la corriente al circuito exterior, mientras que la *negativa* la dirige hacia el inducido.

Todas las escobillas de la misma polaridad se unen *entre sí,* dejando solamente dos terminales ($\pm$). El número de escobillas (*2 e*) coincide con el de polos.

El paso o distancia entre escobillas de polaridades opuestas es el cociente entre el número de delgas y el número de polos:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p}$$

8.º *Esquema.* En la figura 3.29 se muestran los dos tipos de representación de un devanado: *circular* (*A*) y *rectangular* (*B*).

En la representación rectangular de los conductores alojados en cada ranura (lo normal son de 2 capas), se representan por trazo continuo los correspondientes a la capa superior, y por línea de trazos los de la capa inferior.

Se deduce el sentido de la corriente en cada conductor aplicando la regla de la mano derecha, una vez fijado el movimiento del inducido.

El número de ranuras que en cualquier instante están bajo el campo magnético, varía entre el 60 y 80 % del total.

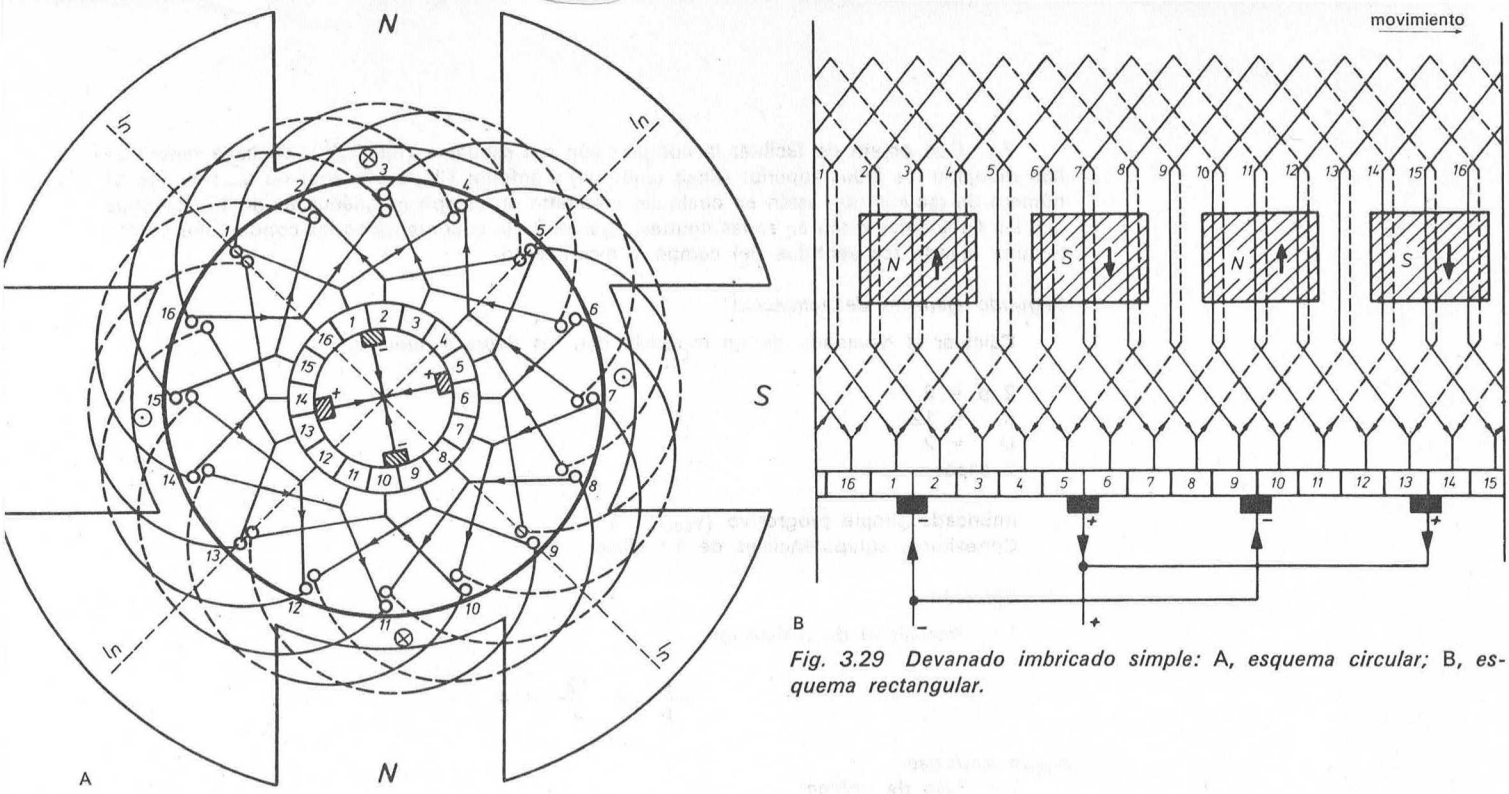


Fig. 3.29 Devanado imbricado simple: A, *esquema circular;* B, *esquema rectangular.*

Primer ejercicio de aplicación

Calcular el devanado correspondiente al inducido de una máquina de c. c. con los datos siguientes:

$2\,p = 4$
$K = 16$
$U = 1$
2 capas ($B = K$)

Imbricado simple progresivo ($y_{col.} = +1$).

Solución:

1.º Posibilidad de realización:

$$\frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$$

por tanto, *puede realizarse.*

2.º Paso de bobina:

$$y_k = \frac{K}{2\,p} = \frac{16}{4} = 4$$

3.º Número de delgas del colector:

$$D = B \cdot U = K \cdot U = 16 \times 1 = 16$$

4.º Paso posterior:

$$y_1 = y_k \cdot U = 4 \times 1 = 4$$

5.º Paso anterior:

$$y_2 = y_1 - y_{col.} = 4 - 1 = 3$$

6.º Este devanado *carece* de conexiones equipotenciales.

7.º Número de escobillas:

$$2\,e = 2\,p = 4$$

El paso de escobillas:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p} = \frac{16}{4} = 4$$

8.º Con objeto de facilitar la comprensión del esquema (fig. 3.29), en cada ranura se han dibujado los lados superior (línea continua) e inferior (línea a trazos) de las bobinas. El número de ranuras que están en cualquier momento en campo magnético es de 12, mientras que las 4 restantes están en zonas neutras. El sentido de la corriente en los conductores se determina fijando los sentidos del campo y movimiento.

Segundo ejercicio de aplicación

Calcular el devanado de un inducido con los datos siguientes:

2 p = 6
K = 12
U = 2
2 capas

Imbricado simple progresivo ($y_{col.} = +1$).
Conexiones equipotenciales de 1.ª clase.

Solución:

1.º Posibilidad de realización:

$$\frac{K}{p} = \frac{12}{3} = 4$$

puede realizarse.

2.º Paso de bobina:

$$y_k = \frac{K}{2\,p} = \frac{12}{6} = 2$$

3.º Número de delgas del colector:

$$D = B \cdot U = 12 \times 2 = 24$$

4.º Paso posterior:

$$y_1 = y_k \cdot U = 2 \times 2 = 4$$

5.º Paso anterior:

$$y_2 = y_1 - y_{col.} = 4 - 1 = 3$$

6.º Conexiones equipotenciales de 1.ª clase:

$$y_{equip.} = \frac{K}{p} = \frac{12}{3} = 4$$

(expresado en ranuras).

$$y_{equip.} = \frac{K}{p} \cdot U = 4 \times 2 = 8$$

(expresado en secciones).

Así, pues, la conexión equipotencial 1.ª unirá la cabeza de la sección 1 con la 9 y 17 (fig. 3.30).

Las secciones siguientes serán: 3-11-19, 5-13-21 y 7-15-22, ya que el número total de conexiones es:

$$N_{equip.} = \frac{K}{p} = \frac{12}{3} = 4$$

7.º Número de escobillas:

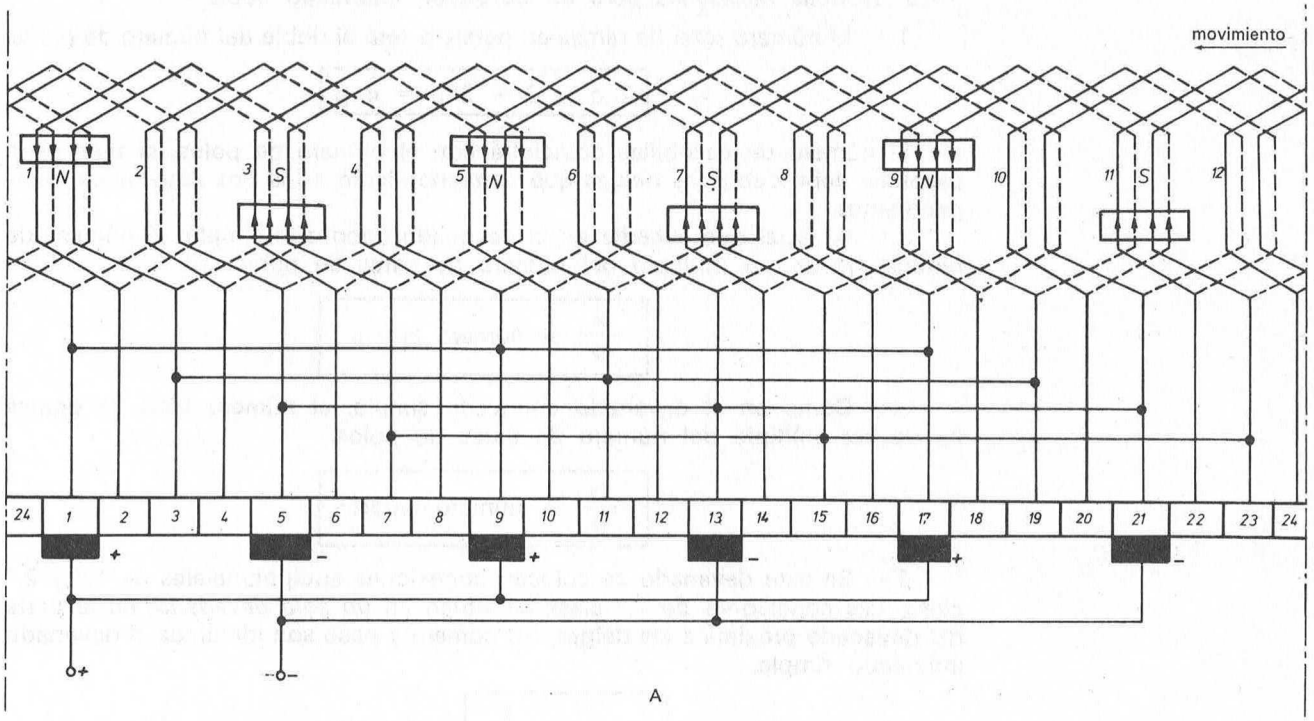
$$2\,e = 2\,p = 6$$

El paso de escobillas:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p} = \frac{24}{6} = 4$$

8.º El esquema rectangular se muestra en la figura 3.30, en el que se han representado los cuatro lados de las bobinas alojadas en cada ranura. Las bobinas superiores se han representado por línea continua y las inferiores por líneas de trazos.

Con objeto de buscar la simetría, para mayor claridad del dibujo, se han situado 6 ranuras bajo campo magnético y otras 6 en la zona neutra; esta disposición del montaje disminuye considerablemente la f. e. m. inducida en la máquina, ya que supone solamente un aprovechamiento del 50 % del campo magnético.



3.7 Estudio del devanado imbricado múltiple

3.7.1 *Necesidad de este devanado*

Se recuerda que en el devanado imbricado simple se formaban *2 p* ramas en derivación y en una vuelta se recorrían todas las bobinas del inducido.

Cuando las máquinas han de suministrar elevadas intensidades, es necesario buscar otro tipo de devanado, que permita un mayor número de ramas en derivación, con el fin de disminuir la corriente que pasa por cada bobina. Este tipo de devanado se llama *imbricado múltiple,* pudiendo ser doble, triple, etcétera, si bien el más utilizado es el *doble.*

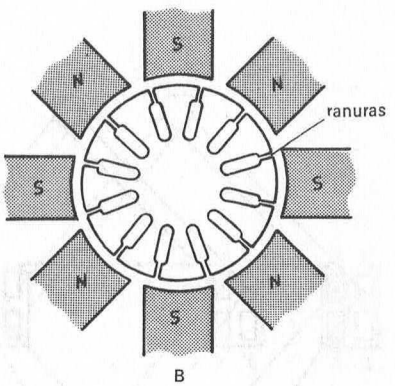


Fig. 3.30 Devanado imbricado simple con conexiones equipotenciales de 1.ª clase: A, *esquema rectangular;* B, *situación de las ranuras.*

3.7.2 *Devanado imbricado doble*

Es el devanado con paso en el colector +2 (sin cruzar), por lo cual las secciones que han de unirse serán las impares (1-3, 3-5, 5-7) y las pares (2-4, 4-6, 6-8, ...).

En la figura 3.31 se representa un devanado imbricado doble en anillo, para mayor sencillez, de una máquina bipolar.

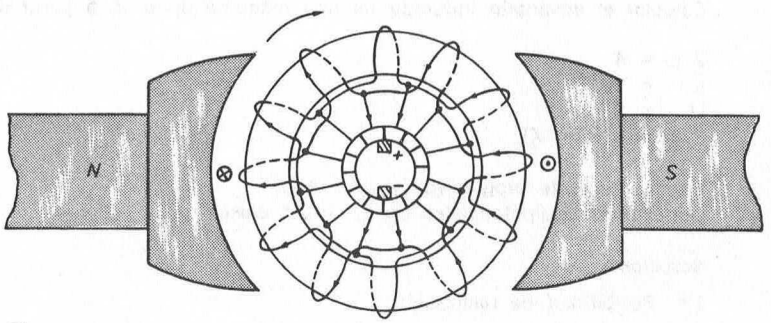


Fig. 3.31 Devanado imbricado doble en anillo.

En el esquema (fig. 3.31), se observa que:

a) Aparecen dos devanados independientes del tipo imbricado simple.

b) Cada escobilla, para recoger o enviar la corriente de los *dos devanados,* debe *cubrir dos delgas.*

c) El número de ranuras en derivación aumenta a 4.

3.7.3 *Normas necesarias para un devanado imbricado doble*

1.ª El número total de ramas en paralelo será el doble del número de polos.

$$2\,c = 2 \times 2\,p = 4\,p$$

El número de escobillas coincidirá con el número de polos, si bien cada escobilla debe cubrir las delgas que corresponderán a los dos devanados independientes.

2.ª Al igual que sucedía en el devanado imbricado simple, el número de ranuras ha de ser múltiplo del número de pares de polos.

$$\frac{K}{p} = \text{número entero}$$

3.ª Como en el devanado imbricado simple, el número total de delgas ha de ser múltiplo del número de pares de polos.

$$\frac{D}{p} = \text{número entero}$$

4.ª En este devanado se colocan conexiones equipotenciales de 1.ª y 2.ª clase. Las conexiones de 1.ª clase se sitúan en *un solo devanado,* en la parte del devanado próxima a las delgas. Su número y paso son idénticos al devanado imbricado simple.

$$y_{equip.} = \frac{K}{p} \qquad 1.^{a}\ clase$$

Las conexiones equipotenciales de 2.ª clase unen dos secciones consecutivas que pertenecen a los dos devanados independientes, con el fin de equilibrar las ff. ee. mm. de las distintas derivaciones (fig. 3.32). Estas conexiones se colocan en las cabezas posteriores y evitan las conexiones equipotenciales de 1.ª clase en uno de los dos devanados. Para lograr un mejor funcionamiento es necesario que las dos secciones unidas por estas conexiones estén alojadas en la misma ranura; es necesario, pues, que el número de secciones por bobina sea un número par.

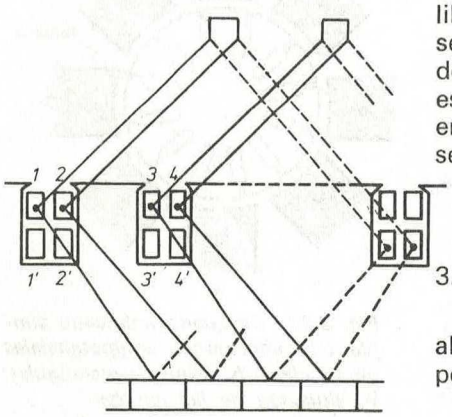


Fig. 3.32 Conexiones equipotenciales de 2.ª clase.

$$U = 2,\ 4,\ 6,\ \ldots$$

3.7.4 *Cálculo de un devanado imbricado doble*

Dado que el sistema normal en el cálculo de este devanado es muy similar al imbricado simple, no parece necesario describir el proceso correspondiente; por ello, se pasa directamente a resolver un ejercicio.

Ejercicio de aplicación

Calcular el devanado inducido de una máquina de c. c. a partir de:

2 p = 4
K = 16
U = 2
2 capas (B = K)

Imbricado doble progresivo ($y_{col.} = +2$).
Conexiones equipotenciales de 1.ª y 2.ª clase.

Solución:

1.º Posibilidad de realización:

$$\frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$$

puede realizarse.

2.º Paso de bobina:

$$y_k = \frac{K}{2\,p} = \frac{16}{4} = 4$$

3.º Número de delgas del colector:

$$D = S = B \cdot U = 16 \times 2 = 32$$

4.º Paso posterior:

$$y_1 = y_k \cdot U = 4 \times 2 = 8$$

5.º Paso anterior:

$$y_2 = y_1 - y_{col.} = 8 - 2 = 6$$

6.º Conexiones equipotenciales:

a) *De 1.ª clase:*

$$y_{equip.} = \frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$$

(expresado en ranuras).

$$y_{equip.} = \frac{K}{p} \cdot U = 8 \times 2 = 16$$

(expresado en secciones).

Así, pues, las conexiones equipotenciales de 1.ª clase unirán las secciones 1-17, 3-19, 5-21, etc. (fig. 3.33).

El número total de conexiones equipotenciales es:

$$N_{equip.} = \frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$$

b) *De 2.ª clase:*

Se colocan en las cabezas posteriores de las bobinas, uniendo las secciones 1-2, 3-4, 5-6, etc., sumando en total 16 conexiones.

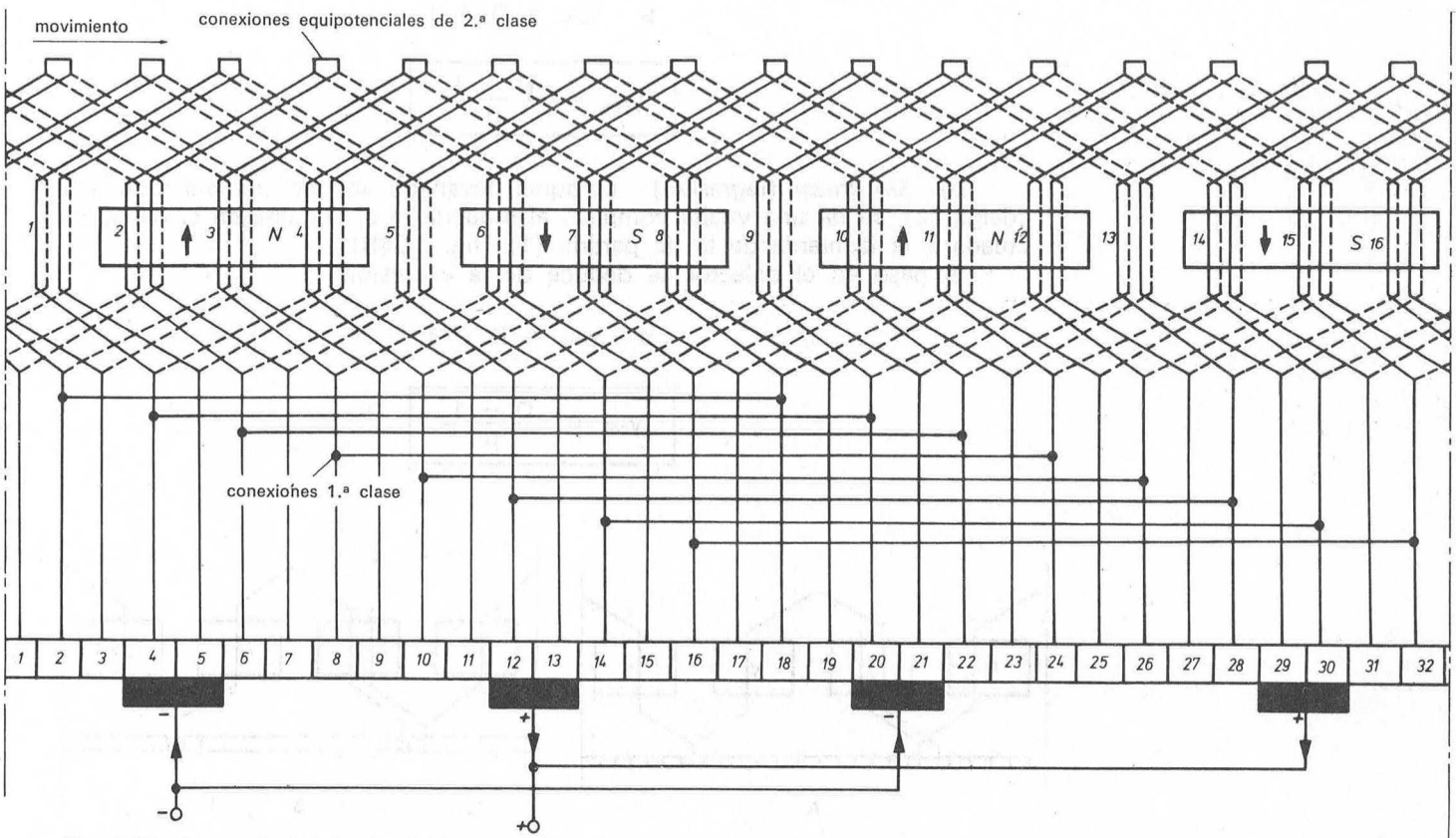


Fig. 3.33 Devanado imbricado doble en anillo.

7.º Número de escobillas:

$$2\ e = 2\ p = 4$$

El paso de escobillas:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\ p} = \frac{32}{4} = 8$$

Cada escobilla cubre dos delgas; así, la primera cubre las delgas 4 y 5; la segunda, las delgas 12 y 13; etc.

8.º En el esquema rectangular del devanado (fig. 3.33) pueden apreciarse las conexiones equipotenciales de 1.ª clase en la parte próxima a las delgas; y las de 2.ª clase, en la parte superior.

El número de ranuras en campo magnético es de 12, que supone el 75 % del total.

3.8 Estudio del devanado ondulado en serie

Es el devanado con dos derivaciones y con paso en el colector aproximadamente igual al doble del paso polar. En el devanado ondulado se avanza por las caras posterior y anterior. El valor del paso resultante es igual a la suma de los pasos parciales.

$$\boxed{y_{col.} = y_1 + y_2}$$

3.8.1 *Tipos de devanado ondulado*

Los devanados en serie se dividen en:

a) *Cruzado* (progresivo). Es aquel devanado en que, partiendo de una delga (1), se da una vuelta completa al inducido y se termina en la delga situada a la derecha de la de partida (2) (fig. 3.34A).

Dado que el paso resultante es próximo al doble del paso polar, para recorrer una vuelta completa del inducido más una delga, se cumplirá que:

$$p \cdot y_{col.} = D + 1$$

$$\boxed{y_{col.} = \frac{D + 1}{p}}$$

b) *Sin cruzar* (regresivo). Es aquel devanado en que, partiendo de una delga (2), se da una vuelta completa al inducido y se termina en la delga situada a la izquierda de la de partida (1) (fig. 3.34B).

El paso en el colector se deduce de la expresión:

$$p \cdot y_{col.} = D - 1$$

$$\boxed{y_{col.} = \frac{D - 1}{p}}$$

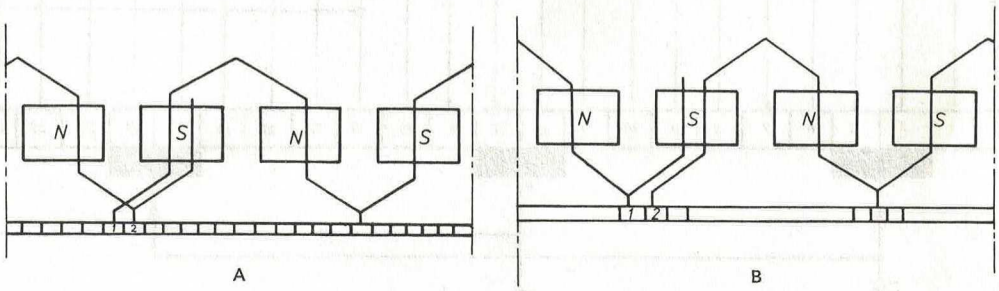


Fig. 3.34 Tipos de devanados ondulados en serie: A, *cruzado;* B, *sin cruzar.*

3.8.2 *Normas necesarias en un devanado ondulado en serie normal*

1.ª En un devanado ondulado en serie, el número total de ramas en derivación es siempre dos, sea cual sea el número de polos:

$$2\,c = 2$$

El número de escobillas puede reducirse a dos, y el paso de escobillas será:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p}$$

2.ª Dado que el paso en el colector debe ser un número entero, sólo se cumplirá cuando el número de delgas y el número de pares de polos sean primos entre sí, según se deduce de la expresión general del paso resultante:

$$y_{col.} = \frac{D \pm 1}{p}$$

para lo cual

$$\left.\begin{matrix} D \\ P \end{matrix}\right\} \text{ primos entre sí}$$

Teniendo en cuenta que:

$$D = K \cdot U$$

se deduce que tanto el número de *ranuras* como el de *secciones por bobina* han de ser primos con el *número de pares de polos.*

$$\left.\begin{matrix} K \\ U \end{matrix}\right\} \text{ primos con } (p)$$

Ejemplos, serían: (p = 2; U = 1, 3), (p = 3; U = 1, 2), (p = 4; U = 1, 3).

3.8.3 *Devanado ondulado en serie con una sección muerta*

En algunas ocasiones no se cumplen las condiciones de que *K* y *U* sean primos de *p*; y, sin embargo, puede realizarse el devanado, siempre que se *inutilice una sección,* con objeto de que el paso resultante sea un número entero.

La sección muerta se sitúa, como las demás, en las ranuras para equilibrar el peso del inducido, pero no debe conectarse a ninguna delga.

Este tipo de devanados no es aconsejable y excepcionalmente puede realizarse en máquinas pequeñas.

3.8.4 *Cálculo de un devanado ondulado en serie*

El proceso necesario en el cálculo de estos devanados es similar al explicado en los devanados imbricados.

Una diferencia importante es la ausencia de conexiones equipotenciales en los devanados serie, ya que, en caso de desequilibrio magnético, se reparte por igual en todas las ramas de derivación.

A continuación, se procede a calcular dos devanados ondulados en serie; el primero, de tipo normal; y el segundo, de sección muerta.

Primer ejercicio de aplicación

Calcular el devanado de una máquina de c. c. partiendo de:

2 p = 4
K = 17
U = 1
2 capas (B = K)

Ondulado en serie sin cruzar.

Solución:

1.º Posibilidad de realización:

$$\left.\begin{matrix} K = 17 \\ U = 1 \end{matrix}\right\} \text{ son primos con } p = 2$$

puede realizarse.

2.º El paso de bobina debe tomarse próximo al paso polar, por no salir el cociente un número entero:

$$y_p = \frac{K}{2\,p} = \frac{17}{4} = 4{,}25$$

$$y_p \approx y_k = 4$$

3.º Número de delgas del colector:

$$D = S = B \cdot U = 17 \times 1 = 17$$

El paso en el colector:

$$y_{col.} = \frac{D - 1}{p} = \frac{17 - 1}{2} = 8$$

4.º Paso posterior:

$$y_1 = y_k \cdot U = 4 \times 1 = 4$$

5.º Paso anterior:

$$y_2 = y_{col.} - y_1 = 8 - 4 = 4$$

6.º Conexiones equipotenciales: *no necesita.*

7.º Número de escobillas:

$$2\,e = 2\,p = 4$$

aunque pueden ponerse también dos escobillas en lugar de cuatro.

El paso de escobillas:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p} = \frac{17}{4} \approx 4$$

8.º Para situar las escobillas, es necesario conocer el sentido de la corriente en cada sección, mediante la regla de la mano derecha (fig. 3.35). Así, en la delga 5, se observa que la corriente entra al inducido; por tanto, le corresponde una escobilla negativa, mientras que, en la delga 1, la corriente sale del inducido y, por tanto, se colocará una escobilla positiva. También se colocará una escobilla que cubra las delgas 9-10 y 13-14, puesto que en ellas se produce la inversión del sentido de la corriente.

9.º El esquema del devanado se representa en la figura 3.35, en un instante en que quedaban bajo polos 12 ranuras y, por tanto, 5 situadas en las zonas neutras.

En estos devanados el número de escobillas puede reducirse a 2, que estén separadas un ángulo:

$$\boxed{\alpha = \frac{360^\circ}{2\,p}}$$

Segundo ejercicio de aplicación

Calcular el siguiente devanado de inducido a partir de los siguientes datos:

$2\,p = 4$
$K = 13$
$U = 2$
2 capas ($B = K$)

Ondulado en serie sin cruzar con una sección muerta.

Solución:

1.º Posibilidad de realización:

$$\left.\begin{matrix} K = 13 \\ U = 2 \end{matrix}\right\} \text{ no son primos con } p = 2$$

para realizar este devanado es necesario dejar de conectar una bobina *(sección muerta).*

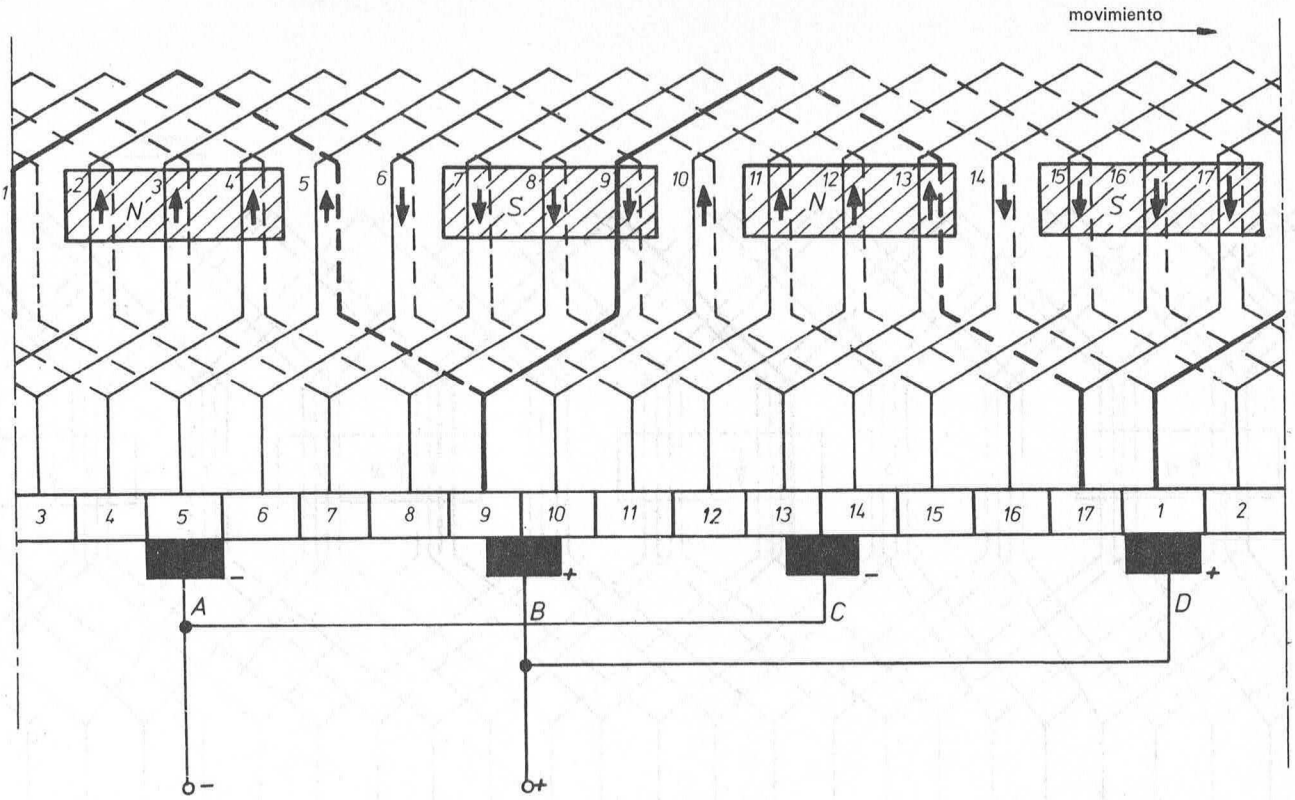


Fig. 3.35 Devanado ondulado en serie.

2.º Paso de bobina:

$$y_k \approx y_p; \quad y_p = \frac{K}{2\,p} = \frac{13}{4} = 3{,}25$$

Se elige $y_k = 3$.

3.º Número de delgas del colector:

$$D = (K \cdot U) - 1 = (13 \times 2) - 1 = 25$$

El paso en el colector:

$$y_{col.} = \frac{D - 1}{p} = \frac{25 - 1}{2} = 12$$

4.º Paso posterior:

$$y_1 = y_k \cdot U = 3 \times 2 = 6$$

5.º Paso anterior:

$$y_2 = y_{col.} - y_1 = 12 - 6 = 6$$

6.º Conexiones equipotenciales: *No necesita.*

7.º Número de escobillas:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p} = \frac{25}{4} \approx 6$$

8.º El esquema del devanado se representa en la figura 3.36.

La sección muerta está alojada en las ranuras 6 y 9. Los extremos de la sección muerta no se conectan a ninguna delga, como puede comprobarse en la figura.

El número de ranuras en campo magnético, en el instante en que se ha representado el esquema, es de 8.

3.9 Estudio del devanado ondulado en serie-paralelo

3.9.1 *Necesidad de este devanado*

Igual que se dan los devanados imbricados múltiples, también existen los devanados ondulados múltiples (llamados por esto serie-paralelo).

La diferencia principal de forma de este devanado comparado con el serie es que, al dar una vuelta completa, se termina en una sección distanciada *a*

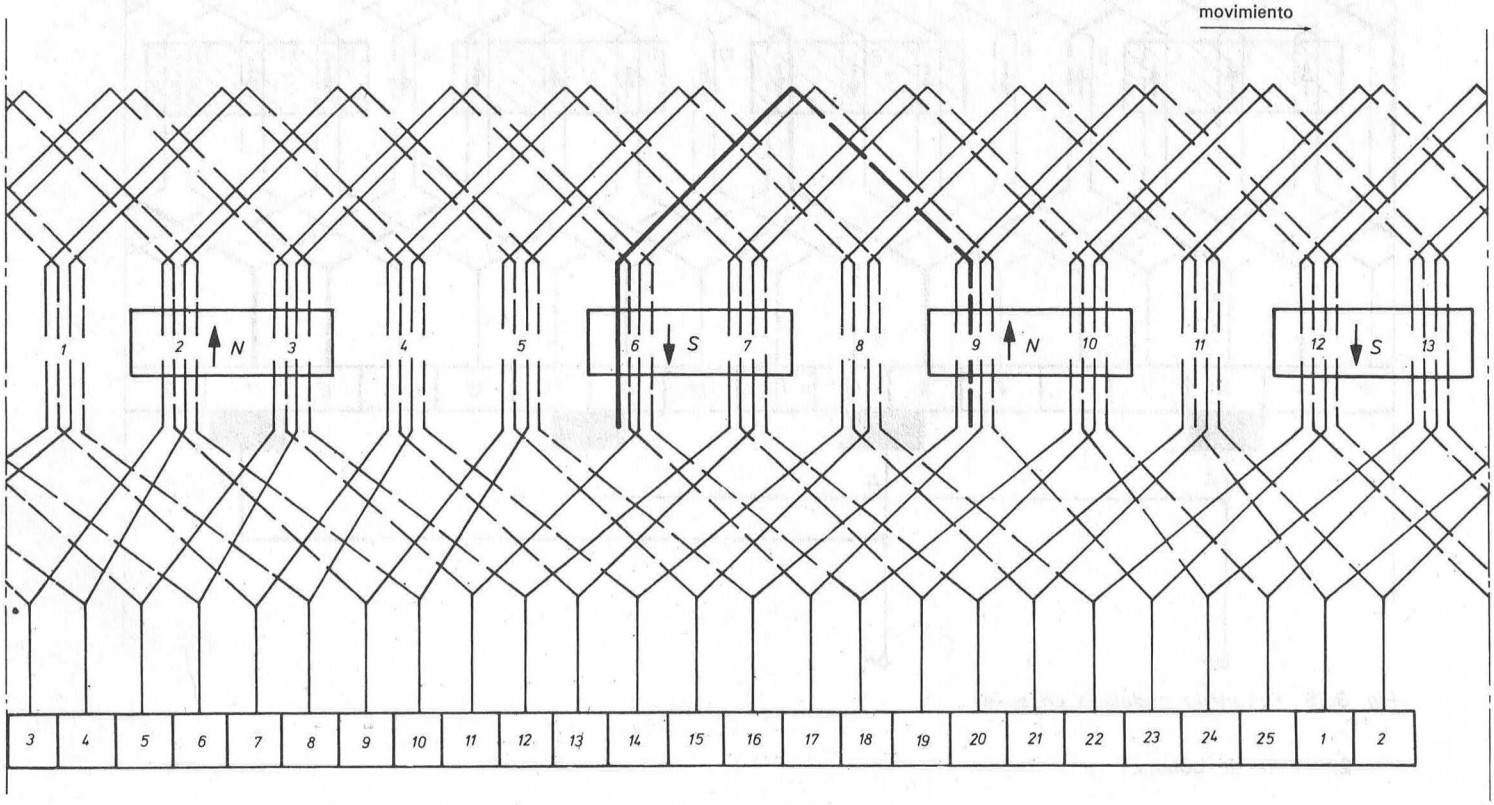


Fig. 3.36 Devanado ondulado en serie con una sección muerta.

delgas de la de partida; si *a* vale 2, 3, ..., se obtendrán los devanados serie-paralelo doble, triple, ..., respectivamente (fig. 3.37).

3.9.2 *Devanado ondulado en serie-paralelo*

Es el devanado con más de dos derivaciones y con paso en el colector aproximadamente igual al doble del paso polar.

Como sucedía en el devanado ondulado serie, aquí también existen dos tipos de ejecución:

a) *Cruzado,* cuyo paso en el colector vale:

$$y_{col.} = \frac{D + a}{p}$$

en donde:

a = grado de multiplicidad (2, 3...)

b) *Sin cruzar,* con paso en el colector:

$$y_{col.} = \frac{D - a}{p}$$

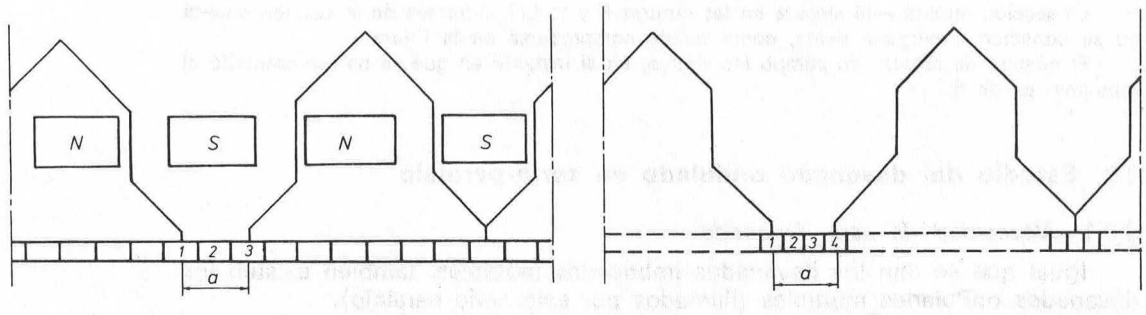


Fig. 3.37 Devanados ondulados múltiples: A, *doble;* B, *triple.*

3.9.3 *Normas necesarias en el devanado ondulado en serie-paralelo*

1.ª El número total de ramas en paralelo es el doble de *a*

$$2c = 2 \cdot a$$

El número de escobillas puede reducirse a dos, con la condición de que cada escobilla cubra *a* delgas que pertenezcan a los *a* devanados independientes que se ponen en el inducido.

El paso en escobillas será:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2p}$$

2.º *a)* Para evitar desigualdad en las distintas ranuras en derivación, debe cumplirse:

$$\frac{p}{a} = \text{número entero} \qquad \frac{K}{a} = \text{número entero}$$

b) Para poder realizarse el devanado, deben ser primos entre sí $\frac{p}{a}$ y el número de secciones del devanado *U*:

$$\left.\begin{matrix}\frac{p}{a}\\ U\end{matrix}\right\} \text{primos entre sí}$$

c) Es aconsejable colocar conexiones equipotenciales de 2.ª clase entre los diferentes devanados independientes.

El paso de conexiones equipotenciales será:

$$y_{equip.} = \frac{K}{a}$$

3.9.4 *Cálculo de un devanado en serie-paralelo*

El proceso de cálculo es similar al devanado serie y viene explicado a continuación.

Ejercicio de aplicación

Realizar el esquema, previo cálculo, del devanado inducido según los datos siguientes:

2 p = 4
K = 20
U = 1
2 capas (B = K)

Ondulado serie-paralelo doble sin cruzar (a = 2).
Conexiones equipotenciales de 2.ª clase.

Solución:

1.º Posibilidad de realización:

$$\frac{P}{a} = \frac{2}{2} = 1$$

(número entero).

$$\frac{K}{a} = \frac{20}{2} = 10$$

(número entero).

$$\left.\begin{matrix}\frac{p}{a} = 1\\ U = 2\end{matrix}\right\} \text{son primos entre sí}$$

Como cumple todos los requisitos, *puede realizarse.*

2.º Paso de bobina:

$$y_k = \frac{K}{2\,p} = \frac{20}{4} = 5$$

3.º Número de delgas del colector:

$$D = K \cdot U = 20 \times 1 = 20$$

Paso en el colector:

$$y_{col.} = \frac{D - a}{p} = \frac{20 - 2}{2} = 9$$

4.º Paso posterior:

$$y_1 = y_k \cdot U = 5 \times 1 = 5$$

5.º Paso anterior:

$$y_2 = y_{col.} - y_1 = 9 - 5 = 4$$

6.º Conexiones equipotenciales de 2.ª clase.

Se colocan en las cabezas posteriores de las bobinas, y su paso se determina por la expresión:

$$y_{equip.} = \frac{K}{a} = \frac{20}{2} = 10$$

En el esquema se han representado solamente las conexiones que unen las secciones 1-11, 4-14 y 7-17, con objeto de simplificar el dibujo.

7.º Número de escobillas:

$$2\,e = 2\,p = 4$$

si bien pueden reducirse a dos escobillas, siempre que cada una cubra dos delgas de los dos devanados independientes.

El paso de escobillas:

$$y_{esc.} = \frac{D}{2\,p} = \frac{20}{4} = 5$$

En el esquema (fig. 3.38), se observa que una escobilla negativa cubre las delgas 7-8-9 y otra positiva cubre las delgas 12-13-14, cumpliéndose, por tanto, con las normas de este apartado.

8.º El número de ranuras bajo polo tomado en el instante de representar el esquema es de 12 (fig. 3.38), y el resto está en zonas neutras.

3.10 **Resumen para la elección de un devanado de inducido**

Haciendo una recopilación de las principales normas necesarias en cada tipo de devanado, se llega a las siguientes conclusiones:

1.ª Cuando la máquina haya de suministrar fuertes intensidades, se colocarán devanados imbricados simples o dobles.

2.ª Las máquinas destinadas a funcionar con tensiones elevadas estarán dotadas de devanados ondulados.

3.ª En máquinas de potencia media se emplean tanto devanados ondulados como imbricados.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Informarse sobre los tipos de devanados empleados en las máquinas de tracción eléctrica.

— Explicar las diversas operaciones que lleva consigo la ejecución de un devanado de inducido.

— Recopilar información sobre los devanados inducidos empleados en los motores de arranque de los automóviles.

CUESTIONARIO

3.1 Describir el proceso de ejecución de un devanado imbricado en un taller moderno.

3.2 ¿Qué ventajas presentarán los inducidos dentados sobre los lisos?

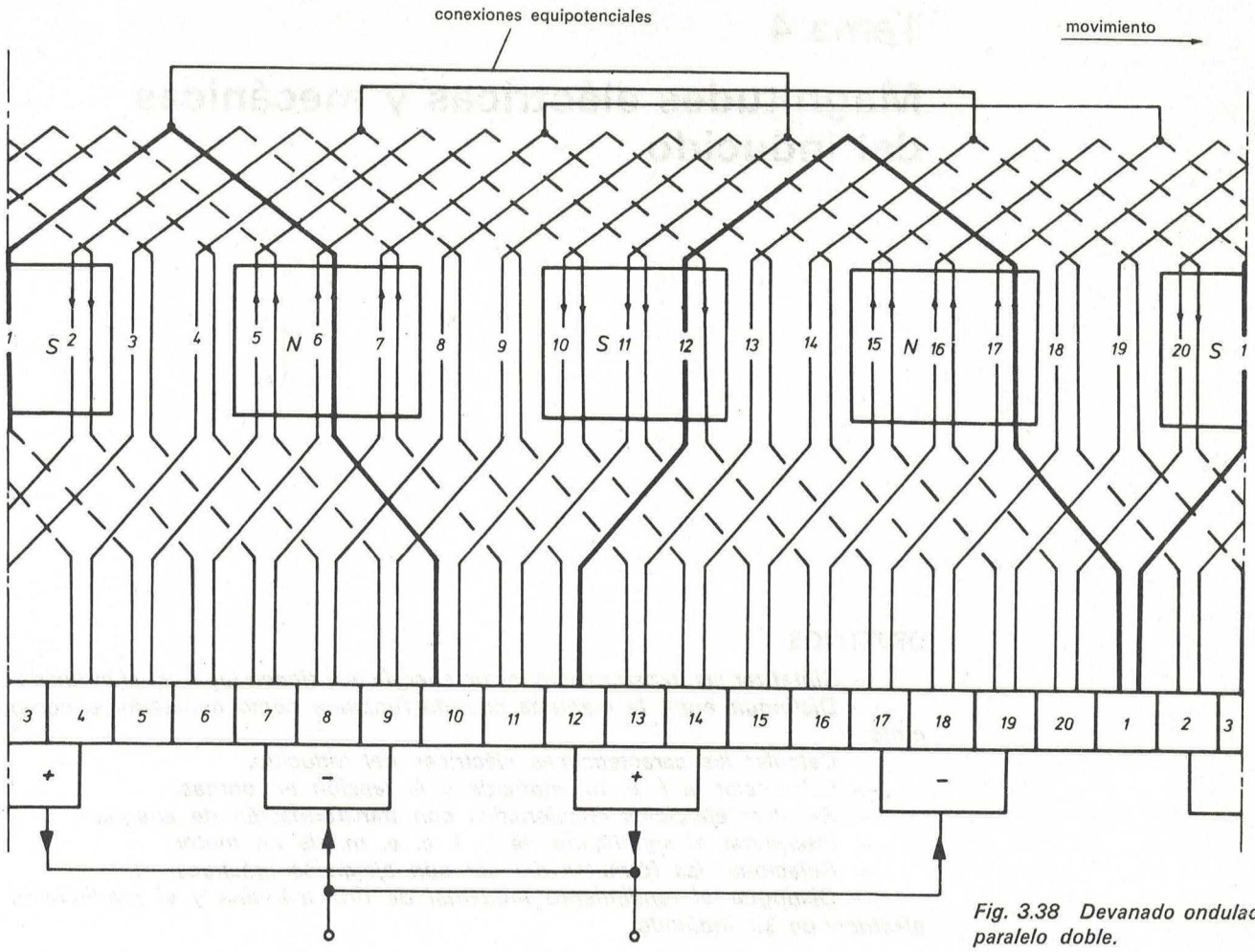


Fig. 3.38 Devanado ondulado serie-paralelo doble.

3.3 ¿Es aconsejable el montaje de una línea de escobillas en lugar de escobillas individuales?

3.4 ¿Cómo se prepara un molde para una bobina de un inducido normal?

3.5 ¿Cuáles son las principales averías que surgen en el devanado inducido?

3.6 ¿Es normal el funcionamiento de una máquina de c. c. cuando por alguna rama en derivación circulan corrientes de 200 A?; ¿y de 600 A?

3.7 Las características eléctricas de una máquina pueden modificarse rebobinando el inducido, una vez variados algunos términos. Aplíquese al caso de un inducido de un generador para variar su tensión de 100 a 200 V.

3.8 Explicar las causas que motivan el empleo de conexiones equipotenciales en los devanados imbricados dobles.

3.9 Realizar el esquema de un devanado imbricado doble progresivo correspondiente al inducido de una máquina tetrapolar. Datos del inducido: 2 capas, 19 ranuras y una sección por bobina.

3.10 Calcular un devanado de un inducido con los datos siguientes: 2 p = 4, K = 27, U = 1, 2 capas, ondulado en serie sin cruzar.

3.11 Calcular un devanado de un inducido con los datos siguientes: 2 p = 6, K = 33, U = 1, 2 capas, imbricado simple progresivo, conexiones equipotenciales de 1.ª clase.

3.12 Calcular y dibujar el esquema de un devanado inducido con los datos siguientes: 2 p = 4, K = 19, U = 1, 2 capas, ondulado en serie cruzado.

3.13 Realizar el esquema de un devanado inducido con los datos siguientes: 2 p = 4, K = 18, U = 1, 2 capas, ondulado doble sin cruzar, conexiones equipotenciales de 2.ª clase.

3.14 Realizar el cálculo del siguiente devanado: 2 p = 4, K = 18, U = 1, 2 capas, ondulado en serie sin cruzar con una sección muerta.

3.15 Calcular el devanado de un inducido con los datos siguientes: 2 p = 4, K = 26, U = 2, 2 capas, imbricado doble sin cruzar, con conexiones equipotenciales de 1.ª y 2.ª clase.

BIBLIOGRAFIA

RAPP J., *Teoría y cálculo de los bobinados eléctricos,* Editorial Vagma, Bilbao 1966.

CORTES M., *Máquinas eléctricas de corriente continua,* Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1965.

ROLDAN J., *Manual del bobinador,* Ediciones CEAC, Barcelona 1972.

SINTES F., *Bobinados de corriente continua,* Montesó, Barcelona 1964.

Tema 4

Magnitudes eléctricas y mecánicas del inducido

OBJETIVOS

— *Sintetizar las transformaciones de energía que tienen lugar en el inducido.*
— *Distinguir entre la máquina cuando funciona como generador o como motor.*
— *Calcular las características eléctricas del inducido.*
— *Diferenciar la f. e. m. inducida y la tensión en bornas.*
— *Resolver ejercicios relacionados con transformación de energía.*
— *Interpretar el significado de la f. c. e. m. de un motor.*
— *Relacionar las fórmulas del par con ejercicios prácticos.*
— *Distinguir el rendimiento industrial de una máquina y el rendimiento eléctrico de su inducido.*

GUION

— Conversión de la energía en el inducido.
— Resistencia interior del inducido.
— Intensidad de corriente en una rama del inducido.
— F. e. m. inducida de una máquina de c. c.
— La máquina de c. c. como generador.
— La máquina de c. c. como motor.
— Sentidos de giro del generador-motor.
— Par interno del inducido de una máquina de c. c.
— Rendimiento eléctrico del inducido.

PUNTOS CLAVE

— Reversibilidad de la máquina de c. c.
— Hallar las expresiones que relacionan las magnitudes electromagnéticas en las dínamos.
— Calcular el par motor o resistente de una máquina.

EXPOSICION DEL TEMA

4.1 Conversión de la energía en el inducido

El inducido es la parte de la máquina de c. c. que transforma la energía eléctrica en mecánica, y viceversa. Tanto si funciona como generador o como motor, produce f. e. m. y desarrolla a la vez fuerzas mecánicas; por ello, el estudio del inducido es *común* a ambas máquinas.

Según el principio de Física sobre la energía, en toda transformación de energía de un tipo a otro, se ofrece una *reacción.*

4.1.1 *Principio de la energía aplicado al generador*

Cuando la máquina funciona como generador, produce una *f. e. m. de signo positivo* y reacciona con un par negativo, llamado *par resistente;* se llama

resistente por oponerse al par positivo dado por la máquina que mueve al generador (fig. 4.1).

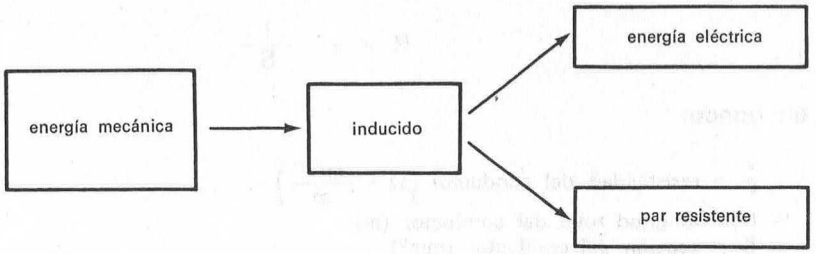


Fig. 4.1 Transformación de la energía en el generador.

4.1.2 *Principio de la energía aplicado al motor*

Si la máquina funciona como motor, producirá un *par motor positivo,* a la vez que ofrece una reacción, llamada *fuerza contraelectromotriz* (f. c. e. m.). Se llama f. c. e. m. por ser de signo opuesto a la tensión de red (fig. 4.2).

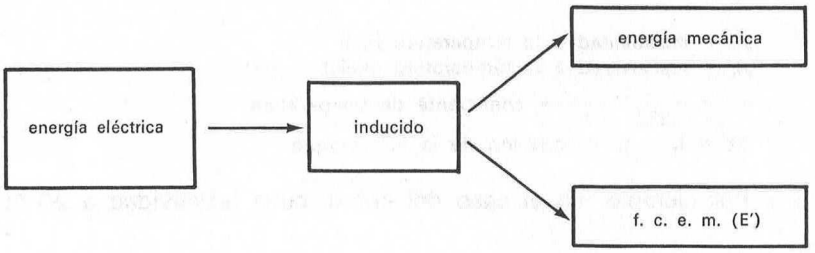


Fig. 4.2 Transformación de la energía en el motor.

4.2 **Resistencia interior del inducido**

El devanado del inducido de una máquina de c. c. está formado por un conjunto de espiras, normalmente de *hilo de cobre,* que presentan una cierta resistencia óhmica (fig. 4.3).

Como es sabido, la conexión entre el colector y el circuito exterior se hace a través de las *escobillas,* que suelen ser de carbón o metalografíticas y, por tanto, también ofrecerán su resistencia.

Además de las resistencias anteriores, existe la *resistencia de contacto* entre las escobillas y el colector, que también habrá de considerarse en el cómputo total.

La resistencia global del inducido es la suma de las tres resistencias: *devanado, escobillas* y *contacto con el colector.*

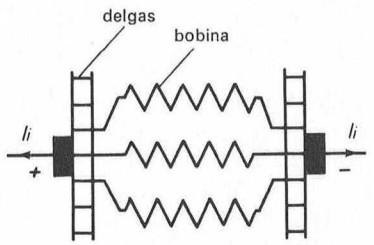


Fig. 4.3 Devanado de un inducido.

4.2.1 *Resistencia del devanado inducido*

Llamando R a la resistencia total del conductor empleado en la construcción del devanado, y $2\,c$ al número de circuitos derivados que se forman en el devanado (fig. 4.4), la resistencia de cada rama en derivación será: $\frac{R}{2\,c}$.

Por otra parte, estas $2\,c$ ramas están conectadas en paralelo y son del mismo valor; por lo que el valor de la resistencia resultante será:

$$r_i = R_{AB} = \frac{\frac{R}{2\,c}}{2\,c} = \boxed{\frac{R}{(2\,c)^2}}$$

Luego la resistencia interior del devanado inducido es igual a la resistencia total del conductor utilizado para su construcción, dividido por el cuadrado del número de ramas en paralelo del devanado.

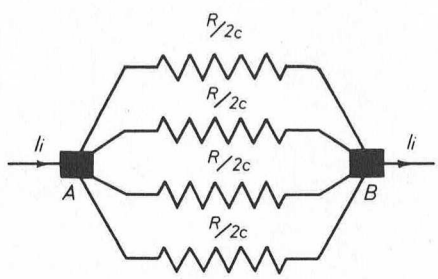


Fig. 4.4 Resistencia interior del devanado inducido.

4.2.1.1 *Variación de la resistencia por causa de la temperatura*

La resistencia del hilo *R* es:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

en donde:

ρ = resistividad del conductor $\left(\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}\right)$
l = longitud total del conductor (m)
S = sección del conductor (mm^2)
R = resistencia total del conductor (Ω)

En los cálculos relacionados con las máquinas, la resistencia se suele referir a la temperatura que adquiere la máquina en servicio normal; en caso de no conocerse el valor exacto, se elige como temperatura 75 °C (convencional).

Así, pues, la resistividad del conductor adquiere un nuevo valor:

$$\rho_{tf} = \rho_{ti} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

en donde:

ρ_{tf} = resistividad a la temperatura final
ρ_{ti} = resistividad a la temperatura inicial
$\alpha = \frac{1}{235 + t_i}$ = coeficiente de temperatura
$\Delta t = t_f - t_i$ = variación de la temperatura

Por ejemplo, en el caso del cobre, cuya resistividad a 20 °C es:

$$\rho_{20°} = 0{,}0175\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$$

A 75 °C, tomará el valor:

$$\rho_{75°} = \rho_{20°} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 0{,}0175 \cdot \left[1 + \frac{1}{235 + 20} \cdot (75 - 20)\right]$$

$$= 0{,}0175 \cdot \left(1 + \frac{55}{255}\right) = 0{,}0212\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$$

Ejercicio de aplicación

Al conectar un motor eléctrico a la red, la resistencia interior del inducido es de 1,8 Ω y la temperatura 10 °C. Al cabo de un tiempo de funcionamiento, vuelve a medirse la resistencia, y resulta ser de 2,2 Ω. ¿Cuál es la temperatura máxima alcanzada por el motor en ese tiempo? El devanado es de hilo de cobre.

Solución:

La temperatura alcanzada por una máquina puede medirse directamente con termómetros que registren zonas de la máquina, o bien, por variación de resistencia en la zona próxima al devanado.

Así, pues, según la expresión anterior:

$$R_{tf} = R_{ti} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

$$2{,}2 = 1{,}8 \left(1 + \frac{1}{235 + 10} \cdot \Delta t\right)$$

$$2{,}2 = 1{,}8 + \frac{1{,}8 \cdot \Delta t}{245}$$

$$2{,}2 - 1{,}8 = \frac{1{,}8 \cdot \Delta t}{245}$$

$$\Delta t = 54{,}4\ °C$$

Por lo que:

$$\Delta t = t_f - t_i$$

$$t_f = \Delta t + t_i = 54{,}4 + 10 = 64{,}4\ ^{o}C$$

4.2.2 *Resistencia de las escobillas*

Las materias primas empleadas en la fabricación de escobillas son buenos conductores de la electricidad: carbón, grafito, cobre, latón, etc.; por otra parte, sus secciones están dimensionadas ampliamente (fig. 4.5), la longitud del circuito es mínima y las mismas escobillas están conectadas entre sí en derivación, lo que dará lugar a valores de resistencias mínimas.

Los valores de estas resistencias varían desde 0,2 a 5 mΩ; la resistencia de las escobillas metálicas es inferior a la de las de carbón.

Dada la dificultad que presenta la medición de las resistencias de las escobillas, se sustituirá por la medición global del conjunto de resistencias, ya que en definitiva la incógnita es la resistencia total del inducido.

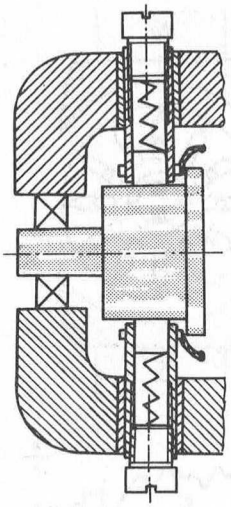


Fig. 4.5 Escobillas.

4.2.3 *Resistencia de contacto*

En el circuito inducido aparece un contacto deslizante, debido al movimiento del colector de delgas con respecto a las escobillas. En el contacto deslizante existe una discontinuidad, debido a dos causas:

1.ª *De tipo eléctrico,* puesto que hay variación de corriente.

2.ª *De tipo mecánico,* ya que la unión entre las dos piezas (colector y escobillas) nunca será perfecta.

Las causas anteriores dan lugar a una separación de las superficies que, en las condiciones más favorables, puede llegar a 1 μ, con la consiguiente dificultad para el paso de la corriente (resistencia de contacto).

La *resistencia de contacto* se define como el *cociente entre la tensión de los bornes del contacto y la intensidad.*

Dadas las dificultades que surgen en la medición de la resistencia de contacto, convencionalmente se admiten, como caídas de tensión, los valores:

a) $R \cdot I = 2$ V, para escobillas de carbón.

b) $R \cdot I = 0{,}6$ V, para escobillas metálicas.

Los valores de caídas de tensión citados son independientes del número de escobillas. Ejemplo: si una dínamo produce 100 A y tiene escobillas de grafito, la pérdida de potencia por esta causa es:

$$P_p = V \cdot I = (R \cdot I) \cdot I = 2 \times 100 = 200\ W$$

4.2.4 *Resistencia global del inducido*

La dificultad surgida en la medición de resistencias del inducido por separado motiva la búsqueda de otros métodos para salvar las dificultades. El sistema más práctico es la medición de la *resistencia global* entre los bornes del circuito exterior de la máquina, para lo cual se unirán, a través de conductores, las escobillas de la misma polaridad.

La medición de la resistencia global se realiza por el método del voltímetro y del amperímetro (fig. 4.6), una vez que se ha hecho circular una corriente por el inducido. La intensidad procede de una fuente exterior.

El valor de la resistencia global suele tomar valores próximos a 1 Ω, por lo que se necesitarán aparatos de medida de fondos de escala muy pequeños.

Normalmente, estas mediciones se hacen con puente para medidas de resistencia (Wheatstone).

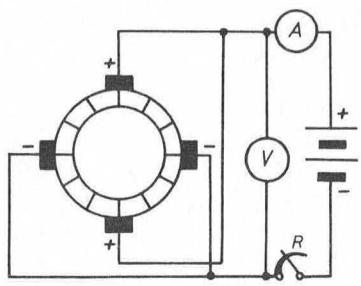


Fig. 4.6 Esquema utilizado en la medición de la resistencia global del inducido.

4.3 Intensidad de corriente en una rama del devanado inducido

En el tema dedicado a devanados del inducido, se explicaba la subdivisión de éste por las escobillas *2 c* ramas en paralelo.

La intensidad que recorre cada conductor coincide con la que circula por su rama y toma el valor:

$$I_{conductor} = I_{rama} = \frac{I_{inducido}}{2\ c}$$

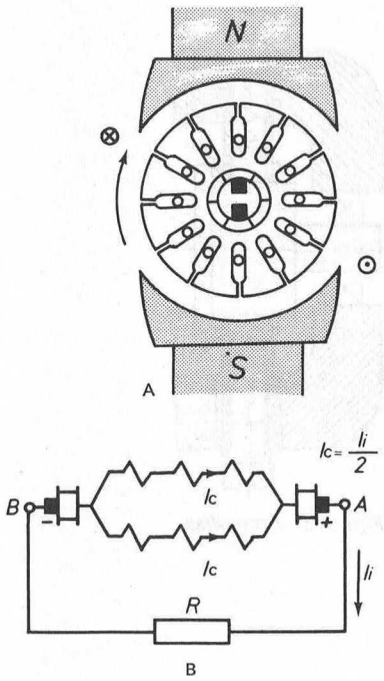


Fig. 4.7 Devanado bipolar: A, *esquema real;* B, *esquema simplificado.*

La máquina representada en la figura 4.7 tiene dos ramas en paralelo, siendo la corriente que pasa por cada conductor del inducido la mitad de la total:

$$I_c = \frac{I_i}{2\ c} = \frac{I_i}{2}$$

La corriente que circula por cada conductor del devanado de la máquina tetrapolar (fig. 4.8) es la cuarta parte de la total:

$$I_c = \frac{I_i}{2\ c} = \frac{I_i}{4}$$

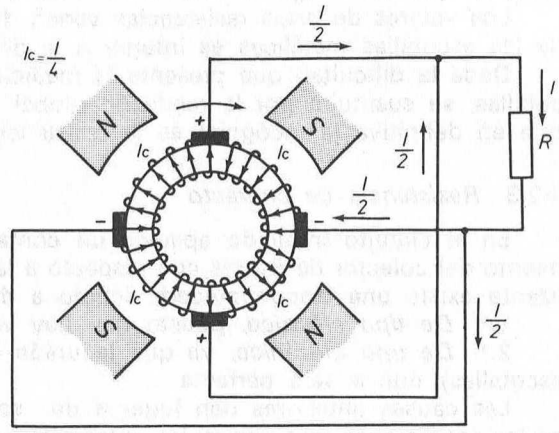


Fig. 4.8 Devanado inducido de una máquina tetrapolar.

Ejercicio de aplicación

Una dínamo tetrapolar alimenta un motor de c. c. (fig. 4.9), y éste, a su vez, suministra una potencia útil de 5 CV; el rendimiento del motor es del 85 % y la tensión de alimentación 440 V.

Averiguar la densidad de corriente a que trabajan los conductores del devanado en el generador. Datos del devanado inducido: 2 c = 2 p; diámetro del conductor, 0,8 mm.

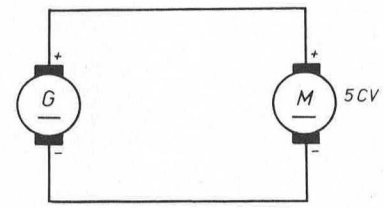


Fig. 4.9 Motor de c. c. alimentado por una dínamo.

Solución:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}$$

en donde:

P_u = potencia útil del motor (W)
P_t = potencia absorbida por el motor (W)

$$P_t = \frac{P_u}{\eta} = \frac{5 \times 736}{0{,}85} = 4\,329\ \text{W}$$

La intensidad que suministra el inducido será:

$$I_i = \frac{P_t}{V} = \frac{4\,329}{440} = 9{,}83\ \text{A}$$

La corriente que circula por cada conductor:

$$I_c = \frac{I_i}{2\ c} = \frac{9{,}83}{4} = 2{,}45\ \text{A}$$

La densidad de corriente del conductor:

$$J = \frac{I_c}{S} = \frac{2{,}45}{\frac{\pi \cdot 0{,}8^2}{4}} = 4{,}9\ \text{A/mm}^2$$

4.4 F. e. m. inducida en una máquina de corriente continua

La deducción del valor de la f. e. m. inducida puede obtenerse por diferentes métodos, según sea la expresión del punto de partida.

4.4.1 *Deducción de la f. e. m. a partir de un sistema de espiras giratorias*

En el Tema 2, apartado 2.4, se explicó la obtención de f. e. m. para un inducido con cualquier número de espiras:

$$E_m = 2 \cdot N \cdot n \cdot \Phi_t$$

en donde:

n = número de conductores activos del inducido
N = velocidad angular (r. p. s.)
Φ_t = flujo máximo cortado (Wb)
E_m = f. e. m. inducida (V)

Teniendo en cuenta los nuevos términos que sobre devanados, velocidad y flujo polar se analizarán posteriormente, la expresión anterior se ajustará a esos nuevos términos:

a) El número de espiras que suma la f. e. m. en cada instante; su valor es: $\frac{n/2}{2\ c}$, siendo *2 c* el número de circuitos derivados del devanado inducido.

b) El flujo total Φ_t, cuyo valor es el producto del flujo por polo multiplicado por el número de pares de polos: $\Phi_t = \Phi \cdot p$

c) La velocidad, que suele expresarse en r. p. m.; por tanto, será: $\frac{N}{60}$

Al sustituir estas expresiones, resultará:

$$E_m = 2 \cdot \left(2 \cdot \frac{n/2}{2\ c}\right) \cdot \frac{N}{60} \cdot \Phi \cdot p = n \cdot \frac{N}{60} \cdot \Phi \cdot \frac{p}{c}$$

A su vez:

$$n = 2\ n_e$$

También puede expresarse de la forma:

$$\boxed{E_m = \Phi \cdot N \cdot (2\ n_e) \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}}$$

n_e = número de espiras activas del inducido
n = número total de conductores del inducido
N = velocidad de giro del inducido (r. p. m.)
Φ = flujo por polo (Wb)
p = pares de polos de la máquina
c = pares de circuitos derivados del devanado inducido
E_m = f. e. m. generada en el inducido (V)

4.4.2 *Deducción de la f. e. m. a partir de la ley de inducción electromagnética*

El valor de la f. e. m. media inducida en un conductor que se desplaza en un campo magnético es:

$$e_m = \beta_m \cdot l \cdot v$$

en donde:

β_m = inducción media debajo de polo (T)
l = longitud activa del conductor (m)
v = velocidad de corte (m/s)

En el circuito inducido de una máquina, el número de conductores que suma su f. e. m. en cada instante es:

$$\frac{n}{2\ c}$$

Por tanto, la f. e. m. inducida será:

$$E = e_m \cdot \frac{n}{2\ c}$$

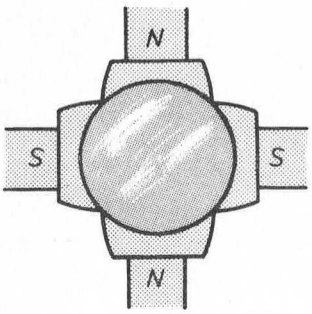


Fig. 4.10 Aprovechamiento total del circuito inductor.

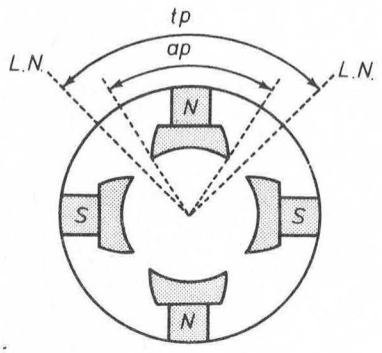


Fig. 4.11 Circuito inductor de una máquina real.

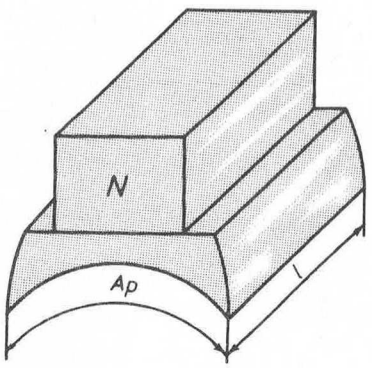


Fig. 4.12 Vista de una pieza polar.

La expresión anterior sería correcta cuando las expansiones polares abarcaran la periferia completa del inducido (360°) (fig. 4.10); sin embargo, la disposición constructiva exige una separación entre polos consecutivos (figura 4.11), impidiendo que estén todos los conductores a la vez en el campo magnético, con la consiguiente disminución de la f. e. m. El factor de corrección (k) que ha de tenerse en cuenta es la relación entre el ancho del polo y el paso polar:

Así, pues:

$$k = \frac{a_p}{t_p}$$

en donde:

a_p = ancho del polo

t_p = paso polar = $\frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$

El valor correcto de la f. e. m. será:

$$E = k \cdot e_m \cdot \frac{n}{2\ c} = \frac{a_p}{t_p} \cdot \beta_m \cdot l \cdot v \cdot \frac{n}{2\ c}$$

La velocidad lineal v del conductor se debe relacionar con la real de la máquina N, que suele expresarse en r. p. m.:

$$v = \omega \cdot \frac{D}{2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{N}{60} \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

en donde:

N = velocidad de giro (r. p. m.)
D = diámetro del conductor (m)
ω = velocidad angular (rad/s)

Al sustituir:

$$E = \frac{a_p}{\frac{\pi \cdot D}{2\ p}} \cdot \beta_m \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} \cdot \frac{n}{2\ c}$$

$$= a_p \cdot l \cdot \beta_m \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

Observando la figura 4.12:

$$S = a_p \cdot l; \qquad \Phi = S \cdot \beta_m = (a_p \cdot l) \cdot \beta_m$$

en donde:

S = superficie polar (m^2)
Φ = flujo polar (Wb)

Queda finalmente:

$$\boxed{E = \Phi \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}}$$

Ejercicios de aplicación

1.° El inducido de una dínamo bipolar dispone de 600 conductores que forman un devanado imbricado simple y giran a 500 r. p. m.; genera una f. e. m. de 250 V. Averiguar el flujo por polo.

Solución:

El generador está formado por dos polos y dos circuitos derivados en el inducido: 2 p = 2 c; por tanto, p = c = 1.

Despejando el flujo de la expresión general:

$$\Phi = \frac{E \cdot 60}{N \cdot n \cdot \frac{p}{c}} = \frac{250 \times 60}{500 \times 600 \times 1} = 0{,}05 \text{ Wb}$$

2.º El inducido de una máquina tetrapolar (fig. 4.13) consta de 3 000 conductores, según devanado ondulado en serie, y produce una f. e. m. de 500 V, por la acción de un campo magnético de 0,01 Wb, por polo. Averiguar su velocidad.

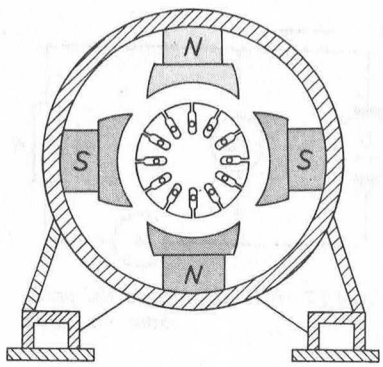


Fig. 4.13 Máquina tetrapolar.

Solución:

En el devanado ondulado: 2 c = 2; al ser una máquina tetrapolar 2 p = 4; por tanto:

$$\frac{p}{c} = \frac{2}{1} = 2$$

Y la velocidad:

$$N = \frac{E \cdot 60}{\Phi \cdot n \cdot \frac{p}{c}} = \frac{500 \times 60}{0{,}01 \times 3\,000 \times 2} = 500 \text{ r. p. m.}$$

3.º Un inducido de una máquina hexapolar (fig. 4.14) dispone de un devanado imbricado simple con 1 000 conductores, un flujo de 2×10^6 Mx por polo y gira a 5 r. p. s. Calcular: *a)* la f. e. m. producida; *b)* la f. e. m. que produciría si se sustituyera el devanado por otro de tipo ondulado en serie.

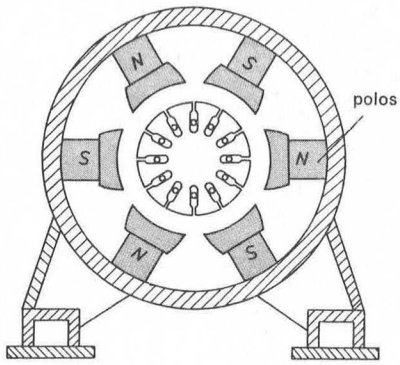


Fig. 4.14 Máquina hexapolar.

Solución:

a) *Con devanado imbricado:*

$$2\,c = 2\,p = 6$$

$$\Phi = 2 \times 10^6 \text{ Mx} = 2 \times 10^6 \times 10^{-8} \text{ Wb} = 2 \times 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$N = 5 \text{ r. p. s.} = 5 \times 60 \text{ r. p. m.} = 300 \text{ r. p. m.}$$

Y la f. e. m.:

$$E = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = (2 \times 10^{-2}) \times 1\,000 \times 300 \times \frac{3}{3} \times \frac{1}{60} = 100 \text{ V}$$

b) *Con devanado ondulado:*

$$2\,c = 2; \quad c = 1$$

Y la f. e. m.:

$$E = (2 \times 10^{-2}) \times 1\,000 \times 300 \times \frac{3}{1} \times \frac{1}{60} = 300 \text{ V}$$

4.5 La máquina de c. c. como generador

La máquina de c. c. se representa esquemáticamente por un círculo con dos escobillas para el inducido y una bobina para el circuito inductor (fig. 4.15).

La diferencia entre generador y motor se hace notar por la letra mayúscula *G* o *M* que indique el círculo.

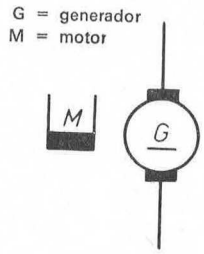


Fig. 4.15 Representación esquemática de una máquina de c. c.

4.5.1 *Tensión en bornes de un generador*

Cuando el inducido de un generador sea arrastrado por un motor primario con la acción del campo inductor, se inducirá en su devanado una f. e. m.:

$$E = \Phi \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} \text{ (V)}$$

El generador puede funcionar en vacío, carga o cortocircuito.

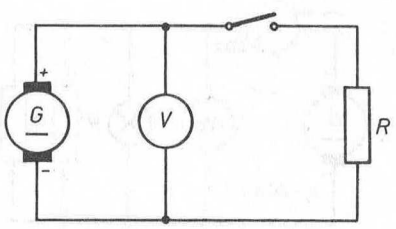


Fig. 4.16 Funcionamiento del generador en vacío.

4.5.1.1 *Funcionamiento del generador en vacío*

En este caso, el inducido gira a la velocidad nominal, induciéndose por tanto una f. e. m., si bien el circuito exterior permanece desconectado (fig. 4.16).

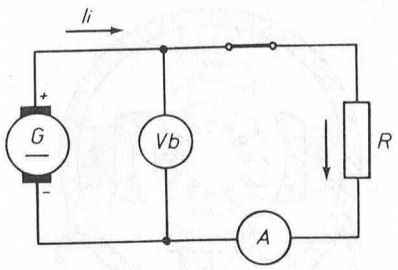


Fig. 4.17 Funcionamiento del generador en carga.

El voltímetro (V) indicará la tensión en bornes de escobillas y coincidirá con la f. e. m.

$$E = V$$

Este sistema de funcionamiento permite, pues, averiguar la f. e. m. generada por la dínamo.

La potencia útil que suministra el generador en vacío es nula y, por tanto, también lo será el rendimiento.

4.5.1.2 *Funcionamiento del generador en carga*

Tiene lugar cuando la dínamo genera una f. e. m. y alimenta los receptores conectados al circuito exterior (fig. 4.17).

Al cerrarse el circuito, circulará una corriente I_i, que vendrá dada por la ley de Ohm:

$$I_i = \frac{V_b}{R}$$

en donde:

V_b = tensión en bornes (V)
R = resistencia total del circuito exterior (Ω)
I_i = corriente que circula por el inducido (A)

No debe confundirse la f. e. m. inducida en vacío con la tensión que ahora marcará el voltímetro (V_b), por las siguientes causas:

1.ª Cuando el generador trabaja en carga, surge el fenómeno de la *reacción del inducido* (que se tratará en el tema próximo), dando lugar a una disminución del flujo útil con respecto al de vacío.

2.ª La corriente que absorben los receptores circula por el devanado del inducido y las escobillas, originando una caída de tensión, debido a sus resistencias eléctricas.

Las causas citadas llevan consigo una disminución de la f. e. m., de forma que en el circuito exterior se dispondrá de una tensión en bornas (V_b):

$$V_b = E - r_i \cdot I_i - 2\ U_e$$

en donde:

E = f. e. m. inducida en carga (V)
$r_i \cdot I_i$ = caída de tensión en el devanado inducido (V)
$2\ U_e$ = caída de tensión en escobillas (V)

Ejercicios de aplicación

1.º Una dínamo bipolar, con un flujo por polo de 5 mWb, gira a 600 r. p. m. y dispone de 4 000 conductores en el devanado inducido, con 2 circuitos derivados. Sabiendo que la resistencia interna es de 0,1 Ω averiguar la tensión en bornas cuando suministre una corriente de 50 A (fig. 4.18). Prescindir de la reacción del inducido.

Solución:

Para hallar V_b, es necesario calcular antes la f. e. m.

$$E = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = (5 \times 10^{-3}) \times 600 \times 4\,000 \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{60} = 200\ V$$

$2\ U_e = 2$ V (suele tomarse como valor convencional).

La tensión útil:

$$V_b = E - r_i \cdot I_i - 2\ U_e = 200 - 0{,}1 \times 50 - 2 = 193\ V$$

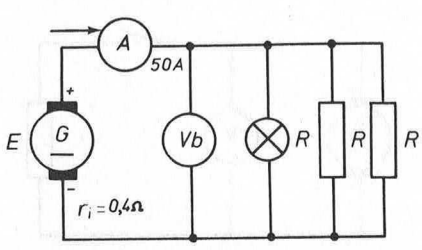


Fig. 4.18 Esquema de un circuito en carga

2.º En la dínamo del ejercicio anterior, ¿existe alguna solución para conseguir una tensión en bornas de 200 V?

Solución:

Analizando la expresión general de f. e. m. inducida, se observa que hay varias respuestas:

a) Aumentar la velocidad, permaneciendo constante los términos restantes. La f. e. m. que debe generar el inducido para conseguir una tensión en bornas de 200 V será:

$$E = V_b + r_i \cdot I_i + 2\ U_e = 200 + 0{,}1 \times 50 + 2 = 207\ V$$

La velocidad se obtiene despejándola de la ecuación general:

$$N = \frac{E \cdot 60}{\Phi \cdot n \cdot \frac{p}{c}} = \frac{207 \times 60}{(5 \times 10^{-3}) \times 4\,000 \times 1} = 621 \text{ r. p. m.}$$

b) Aumentar el flujo, sin variar los términos restantes.
La f. e. m. es:

$$E = 207 \text{ V}$$

El flujo:

$$\Phi = \frac{E \cdot 60}{N \cdot n \cdot \frac{p}{c}} = \frac{207 \times 60}{600 \times 4\,000 \times 1} = 5{,}175 \text{ mWb}$$

c) Variar el término $\frac{p}{c}$ o el número de conductores (n), si bien esta solución es bastante difícil de realizar.

3.º Una dínamo gira a 1 000 r. p. m. y alimenta una línea que consume 440 kW a 440 V (fig. 4.19). Averiguar la disminución de velocidad que tendrá lugar cuando su carga disminuya a 88 kW, permaneciendo constante la tensión en bornes. La resistencia interna es de 0,06 Ω; no considerar la reacción del inducido.

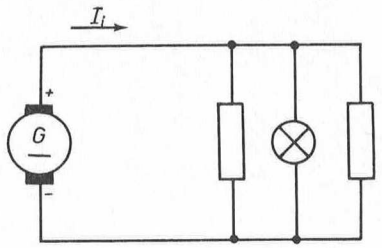


Fig. 4.19 Esquema de generador y línea con receptores.

Solución:

En la primera posición, la corriente que absorbe la línea será:

$$I_{i1} = \frac{P_1}{V_b} = \frac{440\,000}{440} = 1\,000 \text{ A}$$

La f. e. m inducida:

$$E_1 = V_b + r_i \cdot I_{i1} + 2\,U_e = 440 + (0{,}06 \times 1\,000) + 2 = 502 \text{ V}$$

En la segunda posición, la corriente que suministra el generador:

$$I_{i2} = \frac{P_2}{V_b} = \frac{88\,000}{440} = 200 \text{ A}$$

La f. e. m. inducida es:

$$E_2 = V_b + r_i \cdot I_{i2} + 2\,U_e = 440 + (0{,}06 \times 200) + 2 = 454 \text{ V}$$

Según la expresión general de f. e. m.:

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= \Phi \cdot N_1 \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} \\ E_2 &= \Phi \cdot N_2 \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} \end{aligned}\right\}$$

Como el flujo permanece constante y los restantes términos son idénticos en ambas posiciones, al dividir ambas expresiones, resultará:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Al despejar N_2:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{E_2}{E_1} = 1\,000 \times \frac{454}{502} = 900 \text{ r. p. m.}$$

4.º Un generador, cuya resistencia interior es de 0,02 Ω suministra 200 A a 220 V a un circuito exterior cuando gira a 1 000 r. p. m. (fig. 4.20). Hallar la intensidad que suministrará cuando su velocidad aumente a 1 500 r. p. m., suponiendo el flujo constante.

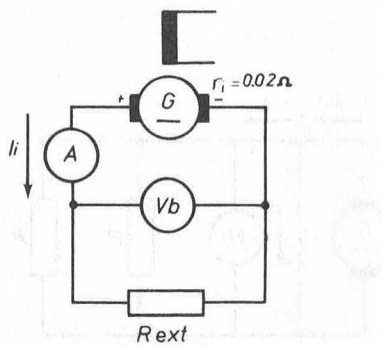


Fig. 4.20 Generador funcionando en carga.

Solución:

En el primer caso, la f. e. m. es:

$$E_1 = V_b + r_i \cdot I_{i1} + 2\,U_e = 220 + (0{,}02 \times 200) + 2 = 226 \text{ V}$$

La resistencia total del circuito exterior será:

$$R_{ex.} = \frac{V_b}{I_{i1}} = \frac{220}{200} = 1{,}1\ \Omega$$

La f. e. m. en el segundo caso será:

$$E_2 = R_{ex.} \cdot I_{i2} + r_i \cdot I_{i2} + 2\ U_e = I_{i2} \cdot (1{,}1 + 0{,}02) + 2 = 1{,}12 \cdot I_{i2} + 2$$

Teniendo en cuenta la relación de ff. ee. mm.:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 226 \times \frac{1\,500}{1\,000} = 339\ V$$

Igualando la ecuación anterior:

$$E_2 = 1{,}12 \cdot I_{i2} + 2 = 339\ V$$

$$I_{i2} = \frac{339 - 2}{1{,}12} = 300{,}89\ A$$

5.º Hallar el número de conductores de un devanado imbricado simple, correspondiente al inducido de un generador octopolar que suministra una potencia de 787,5 kW a 525 V, cuando gira a 300 r. p. m. El flujo por polo es 9×10^6 Mx, y las pérdidas por efecto Joule en el inducido para esa carga son 19,5 kW. Tómese la caída de tensión por escobillas de 2 V.

Solución:

La corriente que circula por el inducido es:

$$I_i = \frac{P}{V_b} = \frac{787\,500}{525} = 1\,500\ A$$

La caída de tensión en el devanado inducido se deduce a partir de las pérdidas:

$$P_J = r_i \cdot I_i^2 = (r_i \cdot I_i) \cdot I_i$$

$$r_i \cdot I_i = \frac{P_J}{I_i} = \frac{19\,500}{1\,500} = 13\ V$$

La f. e. m. inducida:

$$E = V_b + r_i \cdot I_i + 2 = 525 + 13 + 2 = 540\ V$$

El número de conductores (n) se deduce de la expresión general de la f. e. m.:

$$n = \frac{E \cdot 60}{\Phi \cdot N \cdot \frac{p}{c}} = \frac{540 \times 60}{\frac{9 \times 10^6}{10^8} \times 300 \times \frac{4}{4}} = 1\,200\ \text{conductores}$$

4.5.1.3 *Funcionamiento del generador en cortocircuito*

Este tipo de marcha tiene lugar cuando, por avería, se unen los bornes opuestos del generador a través de un conductor que ofrezca la mínima resistencia al paso de la corriente (fig. 4.21).

Si la corriente de cortocircuito I_{cc} se cierra totalmente por el conductor accidental, la intensidad I será nula, quedando:

$$I_i = I_{cc} + I = I_{cc}$$
$$E = V_b + r_i \cdot I_{cc} + 2\ U_e = r_i \cdot I_{cc} + 2\ U_e$$

El valor de la corriente de cortocircuito será:

$$\boxed{I_{cc} = \frac{E - 2\ U_e}{r_i}}$$

Como el valor de r_i suele ser siempre muy pequeño, la corriente de cortocircuito alcanzará valores elevados, con el consiguiente peligro para la máquina. Para evitarlo, se adoptarán medidas de protección.

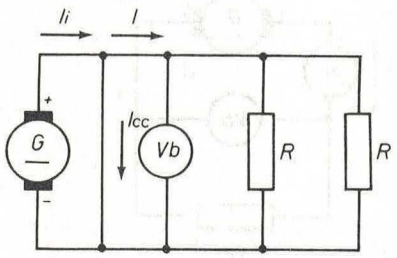


Fig. 4.21 Funcionamiento del generador en cortocircuito.

Ejercicio de aplicación

Un generador tetrapolar suministra una potencia de 40 kW a 200 V. Los datos del inducido son: 2 100 conductores, 2 circuitos derivados, velocidad de giro 500 r. p. m., flujo por polo 6 mWb y caída de tensión en escobillas 2 V. Hallar la relación entre la corriente nominal y la de cortocircuito, prescindiendo de la reacción de inducido.

Solución:

La f. e. m. generada por la dínamo es:

$$E = \Phi \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = (6 \times 10^{-3}) \times 500 \times 2\,100 \times \frac{2}{1} \times \frac{1}{60} = 210 \text{ V}$$

La caída de tensión interior:

$$r_i \cdot I_i = E - V_b - 2\,U_e = 210 - 200 - 2 = 8 \text{ V}$$

La corriente nominal:

$$I_i = \frac{P}{V_b} = \frac{40\,000}{200} = 200 \text{ A}$$

La resistencia interior:

$$r_i = \frac{r_i \cdot I_i}{I_i} = \frac{8}{200} = 0{,}04\ \Omega$$

Al producirse cortocircuito, la corriente tomará un valor muy elevado:

$$I_{cc} = \frac{E - 2\,U_e}{r_i} = \frac{200 - 2}{0{,}04} = 4\,950 \text{ A}$$

Por tanto, la relación entre ambas corrientes:

$$\frac{I_{cc}}{I_i} = \frac{4\,950}{200} = 24{,}75$$

De forma que un cortocircuito da lugar al paso de una corriente casi 25 veces mayor que la nominal, si antes no actúan los dispositivos de protección.

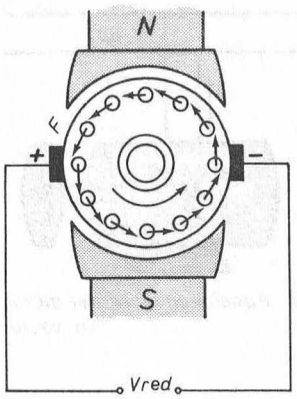


Fig. 4.22 Funcionamiento de la máquina de c. c. como motor.

4.6 La máquina de c. c. como motor

Si en lugar de suministrar energía mecánica al inducido (a través de un motor primario), se le aplica una tensión entre escobillas, se crearán unas fuerzas mecánicas (*F*) en los conductores del devanado, que provocarán su movimiento. Este tipo de funcionamiento corresponde a la máquina cuando actúa como motor de corriente continua (fig. 4.22).

4.6.1 *Fuerza contraelectromotriz del inducido*

El movimiento del inducido genera una f. e. m. que, por oponerse a la tensión aplicada entre escobillas, se llama fuerza contraelectromotriz (*E'*), de valor igual a la f. e. m. (*E*):

$$E' = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} \text{ (V)}$$

El sentido de la fuerza contraelectromotriz (f. c. e. m.), según la ley de Lenz, es opuesto a la tensión de red, por ser ella la que motiva el giro del inducido.

4.6.2 *Tensión aplicada a un motor*

La tensión de red V_b aplicada al inducido debe contrarrestar la f. c. e. m. del motor y las caídas de tensión en el inducido y en las escobillas. La expresión general será:

$$\boxed{V_b = E' + r_i \cdot I_i + 2\,U_e}$$

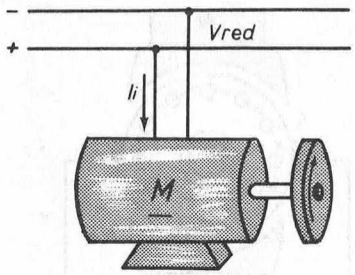


Fig. 4.23 Funcionamiento del motor en vacío.

en donde:

E' = f. c. e. m. inducida (V)
$r_i \cdot I_i$ = caída de tensión en el devanado inducido (V)
$2\ U_e$ = caída de tensión total en escobillas (V)

El motor puede funcionar en vacío, carga y cortocircuito.

4.6.2.1 *Funcionamiento del motor en vacío*

Un motor funciona en vacío cuando no suministra energía mecánica a un sistema exterior, a pesar de estar girando a su velocidad nominal (fig. 4.23).

La tensión de red se repartirá entre la f. c. e. m. y las caídas de tensión, si bien estas últimas serán mínimas, por serlo la intensidad absorbida, pudiendo despreciarse:

$$V_b = E'_o + r_i \cdot I_{io} + 2\ U_{eo} \approx E'_o$$

Así, pues, en vacío, puede decirse que la tensión aplicada a un motor es igual a su f. c. e. m.

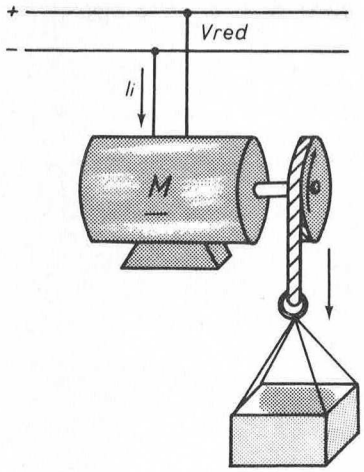


Fig. 4.24 Funcionamiento del motor en carga.

4.6.2.2 *Funcionamiento del motor en carga*

Tiene lugar cuando el inducido gira a su velocidad nominal y suministra energía mecánica a un sistema exterior a través de un acoplamiento (fig. 4.24).

La tensión de red será:

$$V_b = E' + r_i \cdot I_i + 2\ U_e$$

en donde:

E' = f. c. e. m. inducida en carga (V)

Al igual que sucedía en el generador, el valor de la f. c. e. m. disminuye con respecto al caso de *en vacío,* haciendo variar las restantes características del motor.

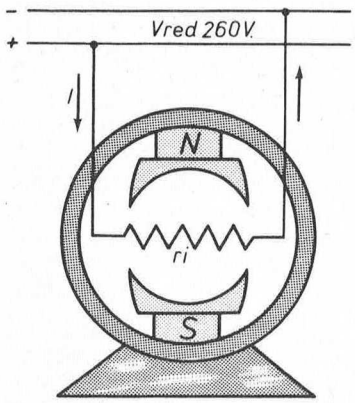


Fig. 4.25 Ejercicio de un motor bipolar.

Ejercicios de aplicación

1.º Averiguar la caída de tensión en el devanado del inducido de un motor bipolar (figura 4.25) que dispone de 3 000 conductores, devanado ondulado en serie, gira a 500 r. p. m., cuyo flujo por polo es 0,01 Wb y está conectado a una red de 260 V. La caída de tensión en escobillas es de 2 V.

Solución:

La f. c. e. m. del motor es:

$$E' = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = 0{,}01 \times 3\,000 \times 500 \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{60} = 250\ V$$

A su vez, la tensión de red:

$$V_b = E' + r_i \cdot I_i + 2\ U_e$$

De donde la caída de tensión interna es:

$$r_i \cdot I_i = V_b - E' - 2\ U_e = 260 - 250 - 2 = 8\ V$$

2.º Un generador de f. e. m. 280 V y resistencia interna de 0,08 Ω alimenta un motor de r_i = 0,04 Ω, a través de una línea bifilar de 200 m de longitud (fig. 4.26). El conductor empleado en la línea es hilo de cobre de 50 mm² de sección y resistividad 0,0175 Ω mm²/m. Sabiendo que el motor absorbe 100 A, averiguar la f. c. e. m. del motor para esa carga.

Solución:

La tensión en bornas del generador es:

$$V_G = E_G - r_i \cdot I_i - 2\ U_e = 280 - (0{,}08 \times 100) - 2 = 270\ V$$

En la línea, se produce la caída de tensión:

$$U_L = R_L \cdot I = \left(\rho \cdot \frac{l}{S}\right) \cdot I = \left(0{,}0175 \cdot \frac{400}{50}\right) \cdot 100 = 14 \text{ V}$$

en donde:

R_L = resistencia de línea
ρ = resistividad del cobre (0,0175 Ω mm²/m)
l = longitud de los conductores de ida y vuelta (400 m)
S = sección del conductor (50 mm²)
I = intensidad de corriente que circula por el circuito (100 A)

La tensión que llega al motor V_b será:

$$V_b = V_G - U_L = 270 - 14 = 256 \text{ V}$$

La f. c. e. m. del motor:

$$E' = V_b - r_i \cdot I_i - 2\ U_e = 256 - (0{,}04 \times 100) - 2 = 250 \text{ V}$$

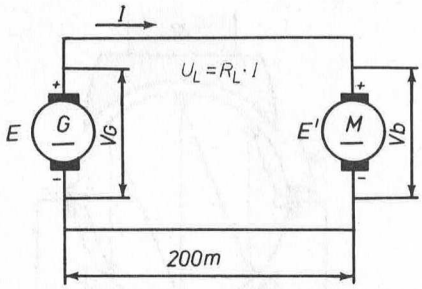


Fig. 4.26 Ejercicio sobre motor alimentado por generador a través de una línea.

4.6.2.3 *Funcionamiento del motor en cortocircuito*

Como en el caso del generador, también aquí pueden surgir averías que impidan el giro del eje por bloqueo del rotor (fig. 4.27). Este tipo de avería es el del funcionamiento del motor en *cortocircuito.*

La f. c. e. m. es nula, puesto que el inducido no gira y la tensión de la red contrarrestará únicamente la caída de tensión interna y en escobillas:

$$V_b = E' + r_i \cdot I_{cc} + 2\ U_e = r_i \cdot I_{cc} + 2\ U_e$$

por ser $E' = 0$.

La corriente que circula por el inducido en tales condiciones es bastante elevada, resultando muy peligrosa para la máquina:

$$\boxed{I_{cc} = \frac{V_b - 2\ U_e}{r_i}}$$

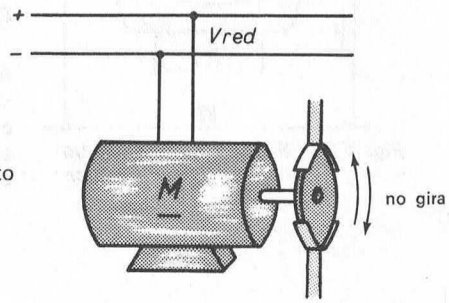


Fig. 4.27 Funcionamiento del motor en cortocircuito.

Ejercicio de aplicación

Hallar la corriente que absorberá, de una red de 200 V, un motor de 20 CV, rendimiento 80 % y resistencia interna de 0,05 Ω en los casos:

a) funcionamiento nominal,
b) en cortocircuito.

Solución:

a) La corriente nominal se obtiene a partir de la expresión general de la potencia:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}; \quad P_t = \frac{P_u}{\eta} = \frac{20 \times 736}{0{,}80} = 18\,400 \text{ W}$$

en donde:

P_u = potencia útil mecánica (W)
P_t = potencia absorbida eléctrica (W)

Intensidad nominal:

$$I = \frac{P_t}{V_b} = \frac{18\,400}{220} = 92 \text{ A}$$

b) En cortocircuito, la f. c. e. m. es nula, siendo el valor de la corriente:

$$I_{cc} = \frac{V_b - 2\ U_e}{r_i} = \frac{200 - 2}{0{,}05} = 4\,360 \text{ A}$$

Esta corriente daría lugar a la destrucción de la máquina y, para evitarlo, se deben adoptar las medidas de protección necesarias.

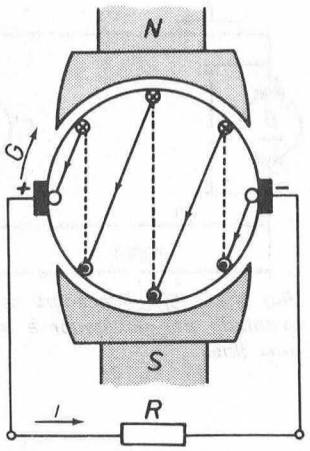


Fig. 4.28 Sentido de la f. e. m. inducida en un generador.

4.7 Sentidos de giro del generador-motor

Cuando a una máquina de c. c. se le suministre energía mecánica, haciendo girar su inducido, producirá energía eléctrica. El sentido de la f. e. m. inducida viene dado por la regla de Fleming de la mano derecha (fig. 4.28).

Si a la misma máquina se le aplica energía eléctrica procedente de otro generador, se pondrá en movimiento y suministrará energía mecánica. El sentido del movimiento, en este caso, se obtiene al aplicar la regla de Fleming de la mano izquierda (fig. 4.29).

Si ambas máquinas están conectadas a la misma red (fig. 4.30), se observará que el sentido de *giro del motor* es *opuesto* al *del generador,* ya que se mantienen tanto la polaridad en las escobillas como el sentido de la corriente en los conductores.

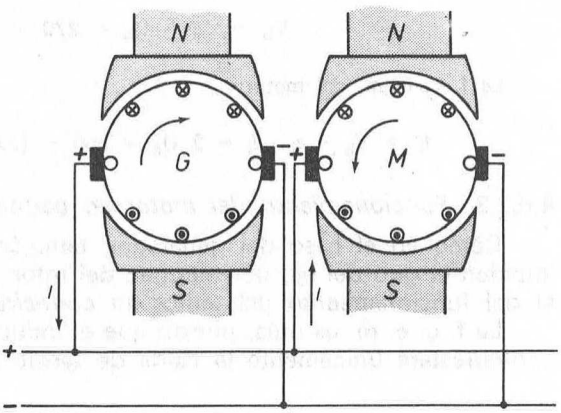


Fig. 4.30 Sentidos de giro del generador y motor conectados a la misma red.

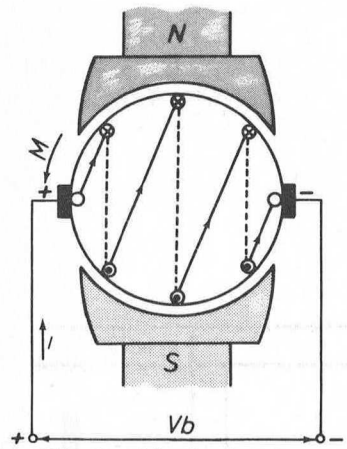


Fig. 4.29 Sentido de giro de un motor.

Por tanto, si en una máquina que pase a funcionar de generador a motor se quiere mantener el sentido de giro, será necesario invertir el sentido del campo del motor o el de la corriente que absorba de la red.

Ejercicio de aplicación

El devanado de una máquina de c. c., que funciona indistintamente como generador o motor (fig. 4.31), tiene una resistencia interna de 0,1 Ω y caída de tensión en escobillas de 2 V. Cuando funciona como generador, suministra una tensión de 440 V a una red; y si funciona como motor, se alimenta de la red de 440 V. Averiguar la velocidad en el caso de funcionar como motor, sabiendo que, al hacerlo como generador, es de 900 r. p. m.; en ambos casos, la corriente del inducido es de 80 A.

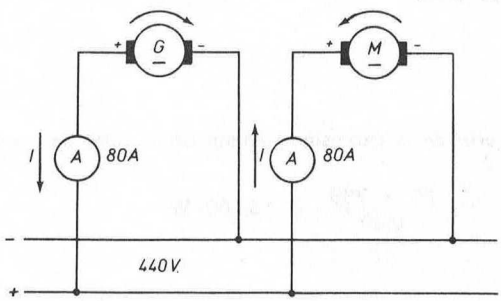


Fig. 4.31 Ejercicio sobre una máquina generador-motor.

Solución:

Si funciona como generador:

$$E_G = \Phi \cdot N_G \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

Si funciona como motor:

$$E'_M = \Phi \cdot N_M \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

La relación entre ambas expresiones:

$$\frac{E_G}{E'_M} = \frac{N_G}{N_M}$$

El valor de ambas:

$$E_G = V_b + r_i \cdot I_i + 2\ U_e = 440 + (0{,}1 \times 80) + 2 = 450\ V$$

$$E'_M = V_b - r_i \cdot I_i - 2\ U_e = 440 - (0{,}1 \times 80) - 2 = 430\ V$$

La velocidad del motor:

$$N_M = N_G \cdot \frac{E'_M}{E_G} = 900 \times \frac{430}{450} = 860\ \text{r. p. m.}$$

Así, pues, la velocidad de la máquina como motor es menor que en el caso del generador.

4.8 Par interno del inducido de una máquina de c. c.

Tanto en el generador como en el motor, al girar el inducido dentro de un campo magnético y ser recorridos sus conductores por una corriente eléctrica, actuarán unas fuerzas electromagnéticas sobre estos que producirán un *par interno* en la periferia del inducido (fig. 4.32).

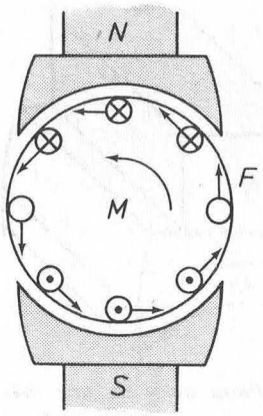


Fig. 4.32 Par interno en el inducido.

4.8.1 *Deducción de la fórmula del par*

La fuerza que actúa en cada conductor, según la ley de Laplace (Tema 11), es:

$$F_c = \beta_m \cdot I_c \cdot l$$

en donde:

β_m = inducción magnética media (T)
I_c = intensidad de corriente que circula por el conductor (A)
l = longitud activa del conductor (m)
F_c = fuerza ejercida sobre el conductor (N)

La fuerza ejercida sobre el conductor origina un par, que será el producto de dicha fuerza por la distancia al punto de aplicación o centro del inducido:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{2}$$

en donde:

M_c = par ejercido por un conductor (mN)
D = diámetro del inducido (m)

El par total será la suma de los pares que actúan sobre cada conductor que esté en campo magnético. Igual que sucedía en la deducción de la f. e. m. inducida, es necesario introducir el coeficiente que relaciona el ancho de polo y el paso polar; así, pues:

$$M_i = n \cdot \left(\frac{a_p}{t_p}\right) \cdot F_c \cdot \frac{D}{2} = n \cdot \frac{a_p}{\frac{\pi \cdot D}{2\ p}} \cdot \beta_m \cdot I_c \cdot l \cdot \frac{D}{2}$$

en donde:

n = número de conductores
a_p = ancho de polo
t_p = paso polar $\left(\frac{\pi \cdot D}{2\ p}\right)$

La corriente que circula por cada conductor es el cociente entre la total del inducido y el número de circuitos derivados:

$$I_c = \frac{I_i}{2\ c}$$

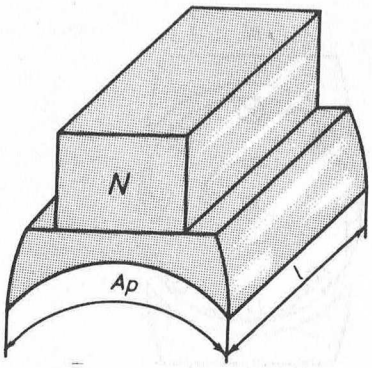


Fig. 4.33 Pieza polar de una máquina de c. c.

En la figura 4.33, se representan las dimensiones de la superficie media de un polo. El producto de dicha superficie por la inducción media es el flujo polar:

$$\Phi = \beta_m \cdot S = \beta_m \cdot a_p \cdot l$$

Al sustituirlos quedará:

$$M_i = (\beta_m \cdot a_p \cdot l) \cdot \frac{I_i}{2\,c} \cdot n \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{2\,p}{\pi \cdot D} = \Phi \cdot I_i \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi}$$

Así, pues:

$$\boxed{M_i = \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi} \cdot n \cdot \Phi \cdot I_i \text{ (mN)}}$$

en donde:

M_i = par interno total (mN)
Φ = flujo por polo (Wb)
I_i = corriente del inducido (A)
n = número de conductores del inducido
p = pares de polos de la máquina
c = pares de circuitos derivados del devanado inducido

Por ser fijos en cada máquina los términos *n*, *p* y *c*, puede simplificarse la fórmula anterior introduciendo la constante:

$$K = n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi}$$

Convirtiéndose la fórmula anterior en:

$$\boxed{M_i = K \cdot \Phi \cdot I_i}$$

4.8.2 *Adaptación de la fórmula del par a magnitudes y unidades prácticas*

La fórmula anterior del par interno está en función de las magnitudes electromagnéticas, por lo que no resulta muy práctica de manejar. Por ello, es conveniente buscar una relación entre dicha fórmula y otras magnitudes más utilizadas en máquinas, como son *velocidad, potencia* y *par en el eje.*

A la vez que se produce un par interno en el inducido, también se induce una f. e. m., que viene relacionada con el flujo, según la expresión:

$$E = \Phi \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

$$\Phi = \frac{E \cdot 60}{n \cdot N \cdot \frac{p}{c}}$$

Al sustituir el valor del flujo en la expresión del par:

$$M_i = \left(\frac{E \cdot 60}{n \cdot N \cdot \frac{p}{c}} \right) \cdot I_i \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi} = \frac{60}{2\,\pi} \cdot \frac{E \cdot I_i}{N}$$

Al ser la potencia transformada en el inducido el producto de la f. e. m. por la corriente del inducido, quedará:

$$M_i = \frac{60}{2\,\pi} \cdot \frac{P_i}{N} \text{ (mN)}$$

O bien, adaptada a otras unidades más prácticas y teniendo en cuenta que:

1 kg fuerza = 9,81 neutonios

resultará:

$$M_i = \frac{60}{2\,\pi} \cdot \frac{P_i}{N} \cdot \frac{1}{9{,}81} = 0{,}975 \cdot \frac{P_i}{N}$$

$$\boxed{M_i = 0{,}975 \cdot \frac{P_i}{N}\ (m \cdot kg)}$$

en donde:

P_i = potencia transformada en el inducido (W)
N = velocidad (r. p. m.)
M_i = par interno (m · kg)

Si la potencia se expresa en CV, será:

$$M_i = 0{,}975 \times 736 \cdot \frac{P_i}{N} = 716 \cdot \frac{P_i}{N}$$

$$\boxed{M_i = 716 \cdot \frac{P_i}{N}\ (m \cdot kg)}$$

en donde:

P_i = potencia transformada en el inducido (CV)
N = velocidad (r. p. m.)
M_i = par interno (m · kg)

Resumen. El par interno del inducido es el cociente entre la potencia transformada en el inducido y su velocidad de giro.

Ejercicio de aplicación

El inducido de una máquina hexapolar tiene una longitud de 60 cm; dispone de un devanado imbricado simple (2 c = 2 p), formado por 800 conductores, que dan lugar a una resistencia interna total, en caliente, de 0,19 Ω.

Sabiendo que, al funcionar como motor absorbe 200 A, de una red de 440 V, averiguar el par interno del inducido, utilizando las dos fórmulas explicadas.

Solución:

1.º Según la primera expresión del par interno:

$$M_i = \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi} \cdot n \cdot \Phi \cdot I_i$$

$$= \frac{3}{3} \times \frac{1}{2\,\pi} \times 800 \times (30 \times 10^{-3}) \times 200 = 763{,}9\ m \cdot N$$

o bien:

$$M_i = 763{,}94 \times \frac{1}{9{,}8} = 78\ m \cdot kg$$

2.º Según la otra expresión:

$$M_i = 0{,}975 \cdot \frac{P_i}{N} \cdot (m \cdot kg)$$

El valor de f. c. e. m. del motor:

$$E' = V_b - r_i \cdot I_i - 2\,U_e = 440 - 0{,}19 \times 200 - 2 = 400\ V$$

La potencia transformada:

$$P_i = E' \cdot I_i = 400 \times 200 = 80\,000\ W$$

La velocidad se deduce de la expresión general de la f. e. m. inducida:

$$N = \frac{E' \cdot 60}{n \cdot \Phi \dfrac{p}{c}} = \frac{400 \times 60}{800 \times (30 \times 10^{-3}) \times 1} = 1\,000\ r.\ p.\ m.$$

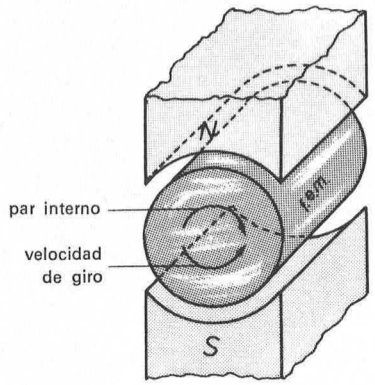


Fig. 4.34 Par útil del motor.

Y el par interno:

$$M_i = 0{,}975 \times \frac{80\,000}{1\,000} = 78 \text{ m} \cdot \text{kg}$$

4.8.3 *Par útil en el eje del motor*

Cuando la máquina funciona como motor, el par interno M_i de carácter positivo (fig. 4.34) se emplea para contrarrestar el par útil (par en el eje) y el par debido a las pérdidas por razonamiento y en el hierro.

Así, pues:

$$M_i = M_u + M_p$$

Por tanto, el par útil será algo inferior al par interno:

$$\boxed{M_u = M_i - M_p}$$

en donde:

M_u = par útil (m · kg)
M_p = par que cubre las pérdidas (m · kg)

La relación que existe entre el par útil M_u, la velocidad N y la potencia mecánica P_m es:

$$M_u = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{2\,\pi \cdot \frac{N}{60}} \quad (\text{m} \cdot \text{N})$$

La fórmula del par útil, expresado en unidades prácticas m · kg, se convierte en:

$$\boxed{M_u = \frac{60}{2\,\pi \cdot 9{,}8} \cdot \frac{P_m}{N} = 0{,}975 \cdot \frac{P_m}{N}}$$

en donde:

M_u = par útil en el eje del motor (m · kg)
P_m = potencia útil cedida (W)
N = velocidad del eje (r. p. m.)

Comparando las fórmulas de los pares internos y útiles, se comprueba que ambos están relacionados con las potencias (transformada o útil) y la velocidad.

Ejercicio de aplicación

Un motor de c. c., especial para grúas, consume 355 A de una red, a 230 V, y suministra un servicio continuo de 100 HP a una velocidad de 460 r. p. m.

La caída de tensión a 90 °C es 14 V. Calcular el rendimiento industrial, el par motor útil, el par debido a las pérdidas y la resistencia interior a 20 °C. El coeficiente de dilatación para el hilo de cobre, a 20 °C, es 1/255.

Solución:

El rendimiento industrial es el cociente entre la potencia útil y la absorbida de la red:

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$$

$$\eta_M = \frac{P_u}{P_t} \cdot 100 = \frac{100 \times 746}{355 \times 230} \times 100 = 91{,}36\ \%$$

El par efectivo en el eje del motor es:

$$M_u = 0{,}975 \cdot \frac{P_m}{N} = 0{,}975 \times \frac{100 \times 746}{460} = 158 \text{ m} \cdot \text{kg}$$

El valor de la f. c. e. m. es:

$$E' = V_b - (r_i \cdot I_i) - 2\,U_e = 230 - 14 - 2 = 214 \text{ V}$$

El par interno:

$$M_i = 0{,}975 \cdot \frac{E_i \cdot I_i}{N} = 0{,}975 \times \frac{214 \times 355}{460} = 161 \text{ m} \cdot \text{kg}$$

Por tanto, el par debido a las pérdidas:

$$M_p = M_i - M_u = 161 - 158 = 3 \text{ m} \cdot \text{kg}$$

La resistencia interior del devanado en caliente será:

$$r_i = \frac{r_i \cdot I_i}{I_i} = \frac{14}{355} = 0{,}0394\ \Omega$$

La resistencia interior a una temperatura de 20 °C es:

$$r_{90\,°C} = r_{20\,°C} \cdot [1 + \alpha\ (\Delta t)]$$

$$r_{20\,°C} = \frac{r_{90\,°C}}{1 + \alpha\ (90 - 20)} = \frac{0{,}0394}{1 + \frac{1}{255} \times 70} = 0{,}0309\ \Omega$$

4.8.4 *Par resistente del generador*

Al funcionar la máquina como generador, sigue existiendo el par interno, pero con carácter negativo, por oponerse al par que proporciona la máquina que lo acciona (fig. 4.35).

El par efectivo en el eje que proporciona la máquina motriz debe contrarrestar el par resistente y el de las pérdidas para que pueda ponerse el inducido en movimiento:

$$M_u = M_i + M_p$$

en donde:

M_u = par motor de la máquina motriz (m · kg)
M_i = par resistente (m · kg)

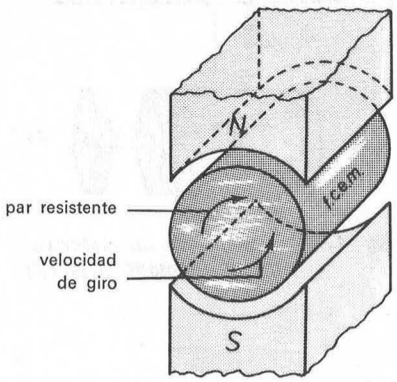


Fig. 4.35 Par resistente del generador.

4.8.5 *Potencia transformada en el inducido*

La potencia que se transforma en el inducido puede deducirse de la expresión que liga la tensión en bornas con la f. e. m. La fórmula, válida tanto para generador (signo menos) como para motor (signo más), será:

$$V_b = E \pm (r_i \cdot I_i) \pm 2\ U_e$$

Multiplicando todos los términos por la corriente del inducido I_i, se convierte en:

$$V_b \cdot I_i = (E \cdot I_i) \pm (r_i \cdot I_i^2) \pm (2\ U_e \cdot I_i)$$

$$E \cdot I_i = (V_b \cdot I_i) \pm (r_i \cdot I_i^2) \pm (2\ U_e \cdot I_i)$$

En el generador, la potencia transformada en el inducido $E \cdot I_i$ es la suma de la potencia útil en bornas $V_b \cdot I_i$, las pérdidas por efecto Joule $r_i \cdot I_i^2$ y la de escobillas $2\ U_e \cdot I_i$.

En el motor, la potencia transformada en el inducido $E \cdot I_i$ es la diferencia entre la potencia en bornes $V_b \cdot I_i$ y las pérdidas.

4.9 Rendimiento eléctrico del inducido

Además del *rendimiento industrial,* o simplemente rendimiento, de una máquina (definido por el cociente entre la potencia útil suministrada y la potencia absorbida), existe el *rendimiento eléctrico del inducido,* que solamente tiene en cuenta las potencias eléctricas que intervienen en el inducido, sin contar el resto de pérdidas. Las expresiones que determinan este rendimiento son diferentes según se trate de generador o de motor.

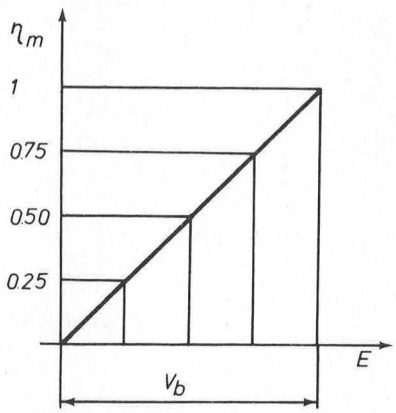


Fig. 4.36 Gráfico del rendimiento del inducido de un motor.

4.9.1 *Rendimiento eléctrico del inducido de un generador*

Cuando la máquina actúa como *generador,* el rendimiento del inducido η_G es el cociente entre la potencia útil $V_b \cdot I_i$, cedida por el inducido, y su potencia transformada $E \cdot I_i$:

$$\eta_G = \frac{V_b \cdot I_i}{E \cdot I_i} = \frac{V_b}{E}$$

4.9.2 *Rendimiento eléctrico del inducido de un motor*

Al funcionar como *motor,* el rendimiento del inducido η_M es el cociente entre la potencia útil conseguida $E' \cdot I_i$ y la potencia suministrada a dicho inducido $V_b \cdot I_i$:

$$\eta_M = \frac{E' \cdot I_i}{V_b \cdot I_i} = \frac{E'}{V_b}$$

El rendimiento del inducido del motor en función de la f. c. e. m. está representado en la figura 4.36; se observa que el valor máximo se da para un valor de la f. c. e. m. próximo a la tensión de red.

El rendimiento eléctrico del inducido es siempre mayor que el rendimiento industrial de la máquina, por no tenerse en cuenta todas las pérdidas.

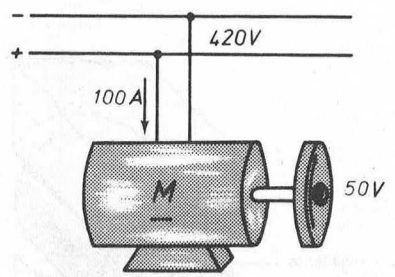


Fig. 4.37 Esquema de un motor conectado a la red.

Ejercicios de aplicación

1.º Un motor, de resistencia interna de 0,1 Ω, absorbe 100 A de una red de 420 V y suministra una potencia de 50 CV. Hallar los rendimientos del inducido e industrial (fig. 4.37).

Solución:

La f. c. e. m. es:

$$E' = V_b - (r_i \cdot I_i) - 2\ U_e = 420 - (0{,}1 \times 100) - 2 = 408\ V$$

El rendimiento del inducido, expresado en tanto por ciento:

$$\eta_i = \frac{E'}{V_b} \cdot 100 = \frac{408}{420} \times 100 = 97{,}14\ \%$$

El rendimiento industrial:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{50 \times 736}{420 \times 100} = 87{,}61\ \%$$

A la vista de los resultados, se comprueba que es mayor el rendimiento del inducido que el total.

2.º Para determinar las características de generadores, se dispone de un grupo de máquinas formado por un motor de c. c. acoplado por el eje a una dínamo. Al conectar el motor a la red, consume 10 A a 440 V, y la dínamo alimenta varios receptores con un consumo total de 3 000 W (fig. 4.38). Teniendo en cuenta que son dos máquinas idénticas y, por tanto, de iguales características, averiguar su rendimiento aproximado.

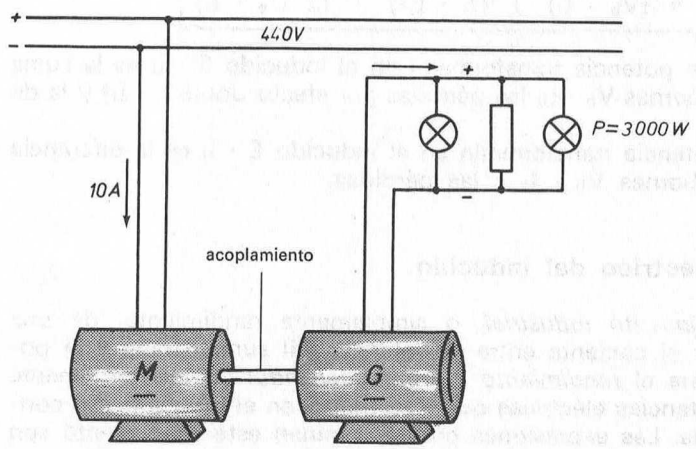


Fig. 4.38 Grupo motor-generador.

Solución:

La potencia absorbida por el motor de la red:

$$P_{ab} = V_b \cdot I = 440 \times 10 = 4\,400 \text{ W}$$

El rendimiento global del grupo se obtiene como si se tratase de una sola máquina que proporciona 3 000 W y absorbiera 4 400 W.

Así, pues:

$$\eta_{global} = \frac{P_{recep.}}{P_{ab}} = \frac{3\,000}{4\,400} = 0{,}6818$$

A su vez, la expresión del rendimiento global puede descomponerse en dos términos:

$$\eta_{global} = \frac{P_{recep.}}{P_{ab}} = \frac{P_{u\,(motor)}}{P_{ab}} \cdot \frac{P_{recep.}}{P_{u\,(motor)}} = \eta M \cdot \eta G$$

obteniéndose, como rendimiento global, el producto de los rendimientos de generador y motor.

Al ser las dos máquinas iguales, también lo es su rendimiento, si bien se comete un pequeño error, ya que el motor trabaja a un régimen de carga superior al del generador. Así, pues:

$$\eta_{global} = \eta M \cdot \eta G = \eta M^2 = \eta G^2$$

De donde:

$$\eta M = \eta G = \sqrt{\eta_{global}} = \sqrt{0{,}6818} = 0{,}8257$$

El rendimiento para el generador o el motor, expresado en tanto por ciento, es del 82,75 %.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Explicar el significado de la f. e. m. de un generador y la f. c. e. m. de un motor, según las leyes físicas. Citar otros generadores-receptores donde se manifiestan estas magnitudes eléctricas.

— Construir un gráfico que relacione la potencia que puede transformar un inducido en función de la f. c. e. m. en el caso de funcionar como motor, analizando las diversas partes del gráfico.

CUESTIONARIO

4.1 ¿Puede distinguirse entre generador y motor en una máquina de c. c. que carezca de placa de características?

4.2 El inducido de una máquina bipolar dispone de 500 espiras, de 1,5 m de longitud cada una, y un diámetro del conductor de 4 mm, según devanado ondulado serie. La resistividad es de 0,0175 Ω mm^2/m, para el cobre, a 20 °C y $\alpha = \frac{1}{235 + t_i}$. ¿Cuál será su resistencia interna a la temperatura convencional (75 °C)?

4.3 Una dínamo tetrapolar alimenta 100 lámparas de 100 W a 220 V. El inducido contiene un devanado imbricado (2 c = 2 p) y el diámetro de cada conductor es de 2 mm.

Averiguar la densidad de corriente a que trabaja el conductor.

4.4 Hallar la f. e. m. que se induce en una máquina hexapolar que gira a 600 r. p. m. y dispone de un inducido con 1 000 conductores y conexión imbricada (2 c = 2 p).

Las dimensiones del polo son de 40 cm de ancho y 1 m de largo, y la inducción de 1,5 T.

4.5 Calcular la f. e. m. de un generador, de resistencia interna 0,3 Ω, que alimenta 10 lámparas en derivación, de 100 W cada una, a 220 V.

4.6 Un generador, cuya f. e. m. es de 450 V y resistencia interna de 0,05 Ω a 75 °C, alimenta un motor a través de una línea de 100 m de longitud. El motor suministra una potencia de 10 CV y tiene un rendimiento del 88 %.

Si la caída de tensión máxima en la línea es del 10 % con respecto a la tensión en bornas del generador, averiguar la sección del conductor de línea, de resistividad 0,0175 Ω mm^2/m.

4.7 Si en el ejercicio anterior se rompe un conductor de línea y hace contacto con el otro, a una distancia de 50 m del generador, ¿cuál será la corriente que proporcionará el generador?

4.8 Un motor eléctrico absorbe 8 A y suministra una potencia de 2 CV, con rendimiento del 85 %. Averiguar la f. c. e. m. del inducido, si la resistencia interior es de 0,5 Ω.

4.9 Un motor tetrapolar se conecta a una red de 500 V, de la que absorbe 50 A. Tiene en su inducido 800 conductores de conexión ondulada (2 c = 2) y resistencia interior de 0,2 Ω, y está en un campo magnético de 30 mWb por polo. Calcular la velocidad del motor.

4.10 Un motor bipolar desarrolla 5 CV a 500 r. p. m. cuando absorbe de la red 20 A a 220 V. Hallar el rendimiento y el par útil.

4.11 Un motor gira a 2 000 r. p. m. y desarrolla un par interno de 10 m · kg. Hallar la velocidad del motor cuando su par aumente a 15 m · kg, permaneciendo constante la corriente absorbida por el motor.

4.12 Un motor tetrapolar, a 440 V, absorbe 50 A con un flujo por polo de 20 mWb y desarrolla una potencia efectiva de 26 CV. Hallar el par total y el útil, si dispone de 900 conductores en el inducido imbricado simple, y $r_i = 0{,}4\ \Omega$.

4.13 Un grupo motor-generador está conectado por el lado del motor a una red de 440 V, de donde absorbe 50 A. El generador alimenta un circuito destinado a la carga de acumuladores, que consumen 17 kW. Averiguar el rendimiento del generador sabiendo que el del motor es del 86 %.

4.14 Un salto de agua, de 100 m de altura y caudal de 14 l/s, alimenta una turbina que está acoplada a una dínamo. La energía eléctrica producida sirve para el circuito de alumbrado, formado por lámparas de 100 W en derivación.

Si en la línea hay una pérdida del 5 % de potencia, averiguar el número de lámparas que podrían conectarse. Los rendimientos de turbina y generador son del 85 % y 90 % respectivamente.

4.15 Determinar la corriente absorbida por un motor a 440 V, que gira a 500 r. p. m. Rendimiento del motor, 90 %, y desarrolla un par, en el eje, de 150 m · kg.

BIBLIOGRAFIA

CORTES M., *Máquinas eléctricas de c. c.,* Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1965.

Máquinas de c. c., Escuela del Técnico Electricista, Labor, Barcelona.

MOELLER-WERR, *Máquinas de c. c.,* Labor, Barcelona 1961.

TIBERIO F., *Pruebas sobre máquinas eléctricas,* Vicens-Vives, Barcelona 1965.

MORILLO J., *Curso de Electrotecnia I,* Dossat, S. A., Madrid.

LOPEZ J. A., *Tecnología básica electricidad,* C. E. S. E. D. E. P., Madrid 1971.

Tema 5

Circuito magnético de la máquina de corriente continua

OBJETIVOS

— *Recordar los conceptos básicos sobre electromagnetismo.*
— *Distinguir los procedimientos utilizados en el cálculo de cualquier circuito magnético.*
— *Realizar el estudio completo del circuito magnético de una máquina de corriente continua.*
— *Hallar los ampervueltas necesarios para el funcionamiento de una máquina en vacío.*
— *Analizar el fenómeno de la reacción del inducido al funcionar una máquina en carga.*
— *Calcular los ampervueltas necesarios para un funcionamiento normal de la máquina a plena carga.*

GUION

— Conceptos fundamentales sobre magnetismo.
— Cálculo de los circuitos magnéticos.
— Circuito magnético de una máquina de corriente continua.
— Fuerza magnetomotriz necesaria cuando la máquina funciona en vacío.
— Fuerza magnetomotriz necesaria cuando la máquina funciona en carga.
— Reacción del inducido.
— Ampervueltas totales en carga.

PUNTOS CLAVE

— Estudio detallado del circuito magnético correspondiente a una máquina de corriente continua.
— Valorar la importancia de la reacción de inducido que aparece en las máquinas de corriente continua al funcionar en carga.
— Razonar los sistemas empleados para contrarrestar los efectos de la reacción del inducido.

EXPOSICION DEL TEMA

5.1 Conceptos fundamentales sobre Magnetismo

La importancia del *circuito magnético,* en cualquier máquina, hace necesario un repaso de los conceptos básicos que intervienen en él, para finalizar con el cálculo del circuito de una máquina en general.

5.1.1 *Campo magnético generado por una corriente eléctrica*

En 1820, Oersted comprobó que el paso de una corriente eléctrica por un conductor creaba un campo magnético, formado por línesa de fuerza circulares y situadas en un plano perpendicular al conductor (fig. 5.1). El sentido de las

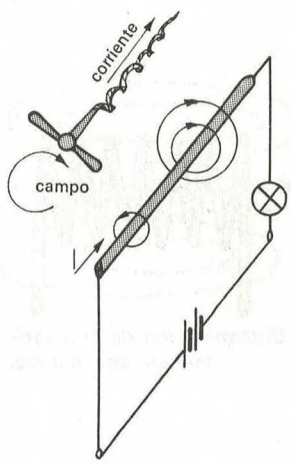


Fig. 5.1 Campo magnético creado por una corriente eléctrica.

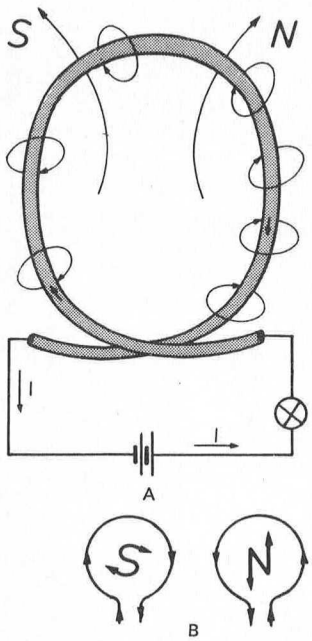


Fig. 5.2 Campo magnético creado por una espira: A, determinación del sentido del campo; B, norma para indicar las caras de una espira.

líneas de fuerza es el del giro de un sacacorchos que avanzase con la corriente (regla de Maxwell).

5.1.1.1 *Campo magnético creado por una espira*

Una *espira* es un conductor curvado, por lo que el sentido del campo será el resultante de aplicar la regla del sacacorchos a cada trozo del conductor (figura 5.2). El campo magnético resultante es similar al producido por un imán plano. Las caras de la espira son Norte y Sur, y su determinación se hace escribiendo en su interior las letras *N* o *S*, con sus flechas según el sentido de la corriente.

5.1.1.2 *Campo magnético creado por una bobina*

Una bobina está formada por un conductor arrollado en forma de hélice cilíndrica (fig. 5.3), o bien, por varias espiras en serie muy próximas entre sí.

El campo magnético en la bobina se obtiene aplicando las reglas anteriores a trozos de conductores o a las diferentes espiras. El campo resultante es similar al de un imán, apareciendo un *polo norte* en el extremo de la bobina por donde salen las líneas de fuerza, y un *polo sur* por donde entran.

El sentido del campo magnético se obtiene aplicando la regla del sacacorchos (fig. 5.4), haciéndole girar en el sentido de la corriente que circule por las espiras.

5.1.2 *Intensidad del campo magnético*

La intensidad del campo magnético (*H*) es la fuerza puntual que ejerce el campo sobre la unidad de masa magnética situada en dicho punto.

El valor de *H* en el interior de una bobina viene dado por la expresión:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

en donde:

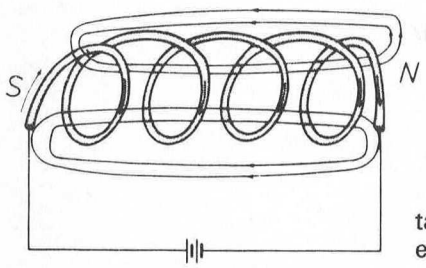


Fig. 5.3 Campo magnético creado por una bobina.

N = número de espiras
I = corriente que circula por la bobina (A)
l = longitud de la bobina (m)
H = intensidad del campo magnético (Av/m) (Giorgi)

La fórmula $\frac{N \cdot I}{l}$ sólo puede aplicarse con exactitud en bobinas infinitamente largas y, con cierta precisión, en aquellas bobinas cuyo diámetro de espiras sea despreciable frente a su longitud.

En el sistema c. g. s. la unidad de intensidad de campo es el *oerstedio* (Oe), siendo la relación entre unidades en los sistemas Giorgi y c. g. s.:

$$1 \text{ Av/m} = 4\ \pi \times 10^{-3} \text{ Oe}$$

5.1.3 *Inducción magnética* $(\vec{\beta})$

Si en el interior de una bobina se introduce un núcleo de material magnético, éste se imanta y da lugar a un elevado aumento del valor del campo magnético.

La acción del campo magnético se denomina ahora *inducción* (β), en lugar de *H*, y las líneas de fuerza son sustituidas por las *líneas de inducción.*

El vector inducción queda determinado por su módulo, dirección y sentido, como indica la bobina con núcleo de hierro de la figura 5.5.

En el sistema c. g. s. la unidad de inducción es el *gausio* (Gs) y en el Giorgi el *tesla* (T), siendo su relación:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$$

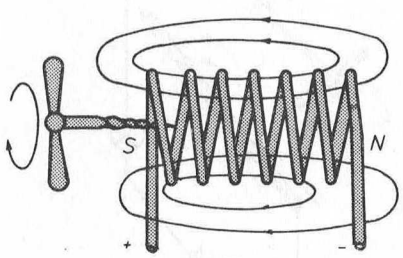


Fig. 5.4 Determinación de la polaridad en una bobina.

5.1.4 *Permeabilidad magnética*

La permeabilidad absoluta (μ) de una sustancia es el cociente entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético:

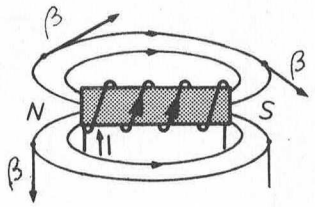
$$\mu = \frac{\beta}{H}$$

Las dimensiones de la permeabilidad se deducen de la expresión anterior:

$$[\mu] = \frac{[\beta]}{[H]} = \frac{\left[\frac{Wb}{m^2}\right]}{\left[\frac{A}{m}\right]} = \frac{Wb}{A \cdot m} = \frac{[H]}{[m]}$$

en donde:

H = henrio
m = metro



→ β { Dirección: tangente a la línea de inducción
Sentido: coincide con la línea
Módulo: depende de la intensidad del campo y del lugar

Fig. 5.5 Vector inducción $(\vec{B})$.

La permeabilidad en el vacío o en el aire (μ_o) es:

$$\mu_o = 4\ \pi \cdot 10^{-7}\ H/m$$

Y, por ello, la inducción en el vacío (β_o) será:

$$\beta_o = \mu_o \cdot H$$

La permeabilidad magnética relativa (μ_r) es la relación entre la permeabilidad absoluta (μ) y la permeabilidad en el vacío (μ_o):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

La permeabilidad relativa no tiene dimensiones, por ser un número abstracto, y suele utilizarse para indicar la permeabilidad de los materiales a través de tablas.

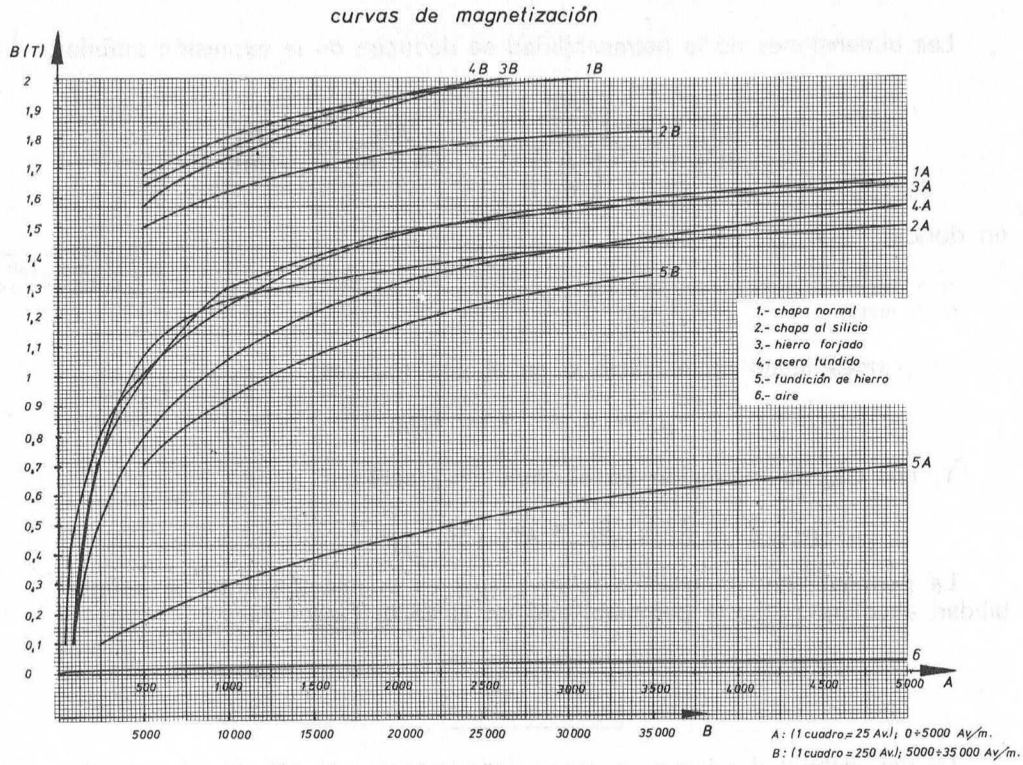
5.1.4.1 *Curva de magnetización*

La curva de imantación representa la inducción en función de la intensidad de campo en cada material. En el eje de ordenadas se representa β, y en el de abscisas, *H*.

En la tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos para diversas sustancias, comprobándose que en los materiales ferromagnéticos (hierro, níquel, cobalto, etc.), la función es ascendente, hasta llegar a la saturación, mientras que para sustancias diamagnéticas (hidrógeno, agua, grafito, etc.), o paramagnéticas (aire, estaño, aluminio, etc.), el comportamiento es similar al de vacío.

Tabla 5.6 Curvas de magnetización

β *(T)*	*H (Av/m)*					
	Chapa normal	*Chapa al silicio*	*Hierro forjado*	*Acero fundido*	*Fundición de hierro*	*Aire*
0,1	50	90	80	90	250	79 577
0,2	55	115	100	120	600	159 154
0,3	65	140	120	150	1 000	238 732
0,4	75	155	140	190	1 600	318 309
0,5	100	170	160	240	2 400	397 887
0,6	140	200	185	320	3 400	477 464
0,7	180	240	230	410	5 000	557 042
0,8	250	290	310	530	6 800	636 619
0,9	360	350	400	650	9 500	716 197
1	500	420	520	820	13 000	795 774
1,1	675	530	650	1 100	17 000	875 352
1,2	900	750	800	1 450	22 000	954 929
1,3	1 200	1 300	1 000	1 900	30 000	1 034 507
1,4	1 600	2 500	1 500	2 700		1 114 084
1,5	2 200	5 000	2 400	4 000		1 192 662
1,6	3 500	9 000	4 000	5 500		1 273 239
1,65	4 800	11 500	5 300	7 000		1 313 028
1,7	6 000	15 500	7 000	8 500		1 352 817
1,8	10 000	27 500	11 000	13 000		1 432 394
1,9	16 000		17 000	19 000		1 511 971
2	32 000		27 000	25 000		1 591 549



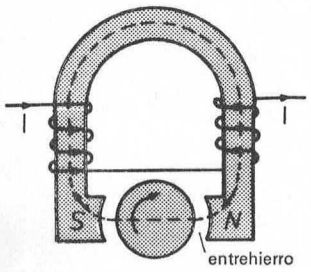


Fig. 5.7 Circuito magnético con entrehierro.

5.1.5 *Circuito magnético*

Es el conjunto de medios constituidos principalmente por sustancias ferromagnéticas, que forman un circuito cerrado y a través de los cuales puede pasar un flujo magnético.

En la figura 5.7 se muestra un circuito magnético con entrehierro. El paso de una corriente (I) dará lugar al establecimiento del circuito magnético, representado por las líneas de fuerza.

El conocimiento de un circuito magnético lleva consigo la determinación de los ampervueltas necesarios para mantener la circulación del flujo a lo largo del circuito magnético.

5.1.5.1 *Ley de Hopkinson*

Aplicando la expresión $\beta = \mu \cdot H$ a un circuito magnético homogéneo (figura 5.8), de longitud media de líneas de inducción l y sección S, resultará:

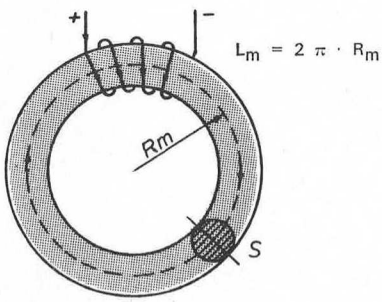


Fig. 5.8 Circuito magnético homogéneo.

$$\beta = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l_m}$$

El flujo creado será:

$$\Phi = \beta \cdot S = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l_m} \cdot S = N \cdot I \cdot \frac{1}{\frac{l_m}{\mu \cdot S}}$$

Simplificando los términos:

$$\frac{l_m}{\mu \cdot S} = R \quad \text{y} \quad N \cdot I = F$$

quedará:

$$\boxed{\Phi = \frac{F}{R}}$$

en donde:

F = fuerza magnetomotriz (Av)
R = reluctancia del circuito (Av/Wb)
Φ = flujo magnético (Wb)

Ley de Hopkinson. El número de líneas de inducción (Φ) que atraviesan una superficie (S) se obtiene por cociente entre la fuerza magnetomotriz (F) y la reluctancia que ofrece el circuito magnético (R) al paso de dichas líneas.

5.2 Cálculo de los circuitos magnéticos

El cálculo del circuito magnético de una máquina está basado en la aplicación de la ley de Hopkinson, tendiéndose en todos los casos a obtener el máximo flujo magnético con el mínimo de ampervueltas.

Los casos que se presentan a la hora del cálculo de un circuito magnético son dos: *directo* e *inverso.*

5.2.1 *Cálculo directo de un circuito magnético*

En un circuito magnético (fig. 5.9) del que se conocen el *flujo,* las *dimensiones* y los *materiales* con sus *curvas* de magnetización, el cálculo se hará por determinación de las diferentes inducciones:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}; \quad B_3 = \frac{\Phi}{S_3}; \quad B_4 = \frac{\Phi}{S_4}$$

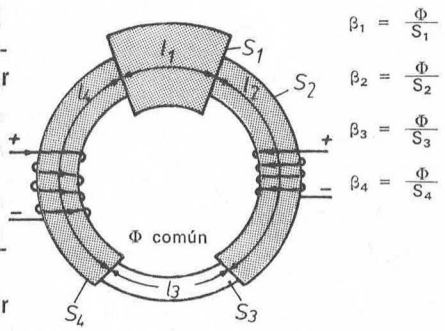


Fig. 5.9 Circuito magnético serie.

Con la inducción se obtienen, en las tablas de cada material, las intensidades de campo respectivas: H_1, H_2, H_3, H_4.

Como también se conocen las longitudes del circuito, se pueden obtener los ampervueltas parciales:

$$N_1 \cdot I_1 = H_1 \cdot l_1; \quad N_2 \cdot I_2 = H_2 \cdot l_2; \quad N_3 \cdot I_3 = H_3 \cdot l_3; \quad N_4 \cdot I_4 = H_4 \cdot l_4$$

El valor de la fuerza magnetomotriz se obtiene sumando los ampervueltas parciales:

$$F = \Sigma\, N \cdot I = (N_1 \cdot I_1) + (N_2 \cdot I_2) + (N_3 \cdot I_3) + (N_4 \cdot I_4)$$

o bien:

$$\boxed{F = (H_1 \cdot l_1) + (H_2 \cdot l_2) + (H_3 \cdot l_3) + (H_4 \cdot l_4)}$$

en donde:

H = campo magnético (Av/m)
l = longitud de cada circuito (m)
F = fuerza magnetomotriz (Av)

Ejercicio de aplicación

El circuito de la figura 5.10, construido con acero fundido, dispone de una bobina de 800 espiras, para producir un flujo de 1,35 mWb, cuando se conecta a una red de c. c. de 145 V. Averiguar la fuerza magnetomotriz y la resistencia de la bobina. Las dimensiones del circuito se indican en milímetros.

Solución:

La sección del circuito magnético es uniforme:

$$S = 30 \times 30 = 900 \text{ mm}^2$$

El valor de la inducción:

$$\beta = \frac{\Phi}{S} = \frac{1{,}35 \times 10^{-3}}{900 \times 10^{-6}} = 1{,}5 \text{ T}$$

En la tabla 5.6, para el acero, le corresponde a esa inducción un valor de intensidad de campo:

$$H = 4\,000 \text{ Av/m}$$

El trayecto medio de las líneas de inducción se deduce de la figura 5.10:

$$l_m = 2\,(150 - 30) + 2\,(200 - 30) = 240 + 340 = 580 \text{ mm} = 0{,}58 \text{ m}$$

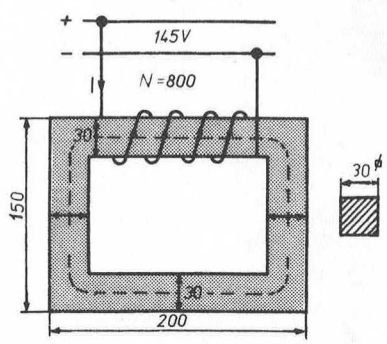


Fig. 5.10 Cálculo de un circuito magnético serie.

La fuerza magnetomotriz se obtiene multiplicando *H* por *l:*

$$F = H \cdot l = 4\,000 \times 0{,}58 = 2\,320 \text{ Av}$$

La corriente que circula por la bobina:

$$I = \frac{F}{N} = \frac{2\,320}{800} = 2{,}9 \text{ A}$$

Y el valor de la resistencia de la bobina:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{145}{2{,}9} = 50\ \Omega$$

5.2.2 *Cálculo inverso de un circuito magnético*

En este caso se conoce la *fuerza magnetomotriz* y se debe determinar el flujo. Al no conocer las permeabilidades, no puede resolverse directamente, sino que es necesario recurrir a un gráfico, obtenido al *fijar valores cualesquiera para el flujo.*

El gráfico 5.11 representa la *F* en ordenadas y el Φ en abscisas. En cada circuito existirá un valor de Φ que haya sido proporcionado por la *F*. Entrando por ordenadas con la verdadera *F*, se obtendrá en abscisas el valor del flujo Φ.

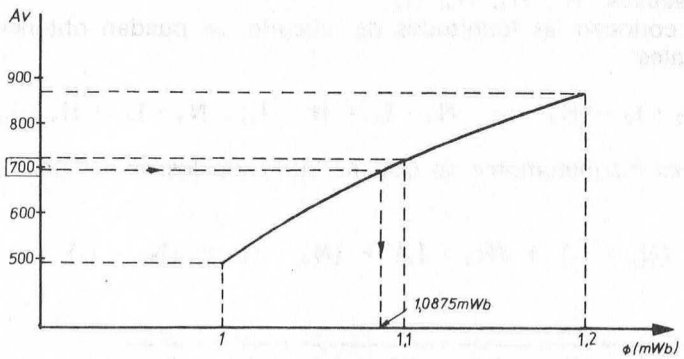


Fig. 5.11 Cálculo inverso de un circuito magnético.

Ejercicio de aplicación

Averiguar el flujo que atravesará un circuito magnético de acero fundido si dispone de una bobina de 350 espiras y su resistencia es de 100 Ω al conectarla a una red de 200 V de c. c. Datos del circuito magnético: sección, 10 cm² y longitud media del circuito magnético, 60 cm.

Solución:

Se halla el valor de *F*:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$$

$$F = N \cdot I = 350 \times 2 = 700 \text{ Av}$$

Se fija el flujo a un valor cualquiera (Φ_1) y se procede al cálculo de la F_1, pudiendo ocurrir que resulte superior, igual o inferior a la real:

$$\boxed{\Phi_1 = 1 \text{ mWb}}$$

$$\beta_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} = 1 \text{ T}$$

Según la tabla 5.6, para β_1 en acero fundido le corresponde: $H_1 = 820$ Av/m; por lo que se obtiene, para F_1:

$$F_1 = H_1 \cdot l_1 = 820 \times 0{,}6 = \boxed{492 \text{ Av}}$$

Al resultar un valor inferior al real, se vuelve a fijar el flujo, dándole un valor superior Φ_2:

$$\boxed{\Phi_2 = 1{,}2 \text{ mWb}}$$

$$\beta_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} = \frac{1{,}2 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} = 1{,}2 \text{ T}; \quad H_2 = 1\,450 \text{ Av/m}$$

Obteniéndose para F_2:

$$F_2 = H_2 \cdot l_2 = 1\,450 \times 0{,}6 = \boxed{870 \text{ Av}}$$

Por resultar un valor superior al real, se fija de nuevo el flujo Φ_3:

$$\boxed{\Phi_3 = 1{,}1 \text{ mWb}}$$

$$\beta_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{1{,}1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} = 1{,}1 \text{ T}; \quad H_3 = 1\,100 \text{ Av/m}$$

Y le corresponde una F_3:

$$F_3 = H_3 \cdot l = 1\,100 \times 0{,}6 = \boxed{660 \text{ Av}}$$

Al obtenerse para Φ_3 un valor inferior, se deduce que el valor real de Φ estará comprendido entre Φ_2 y Φ_3. Se construye un gráfico (fig. 5.11) con los valores (Φ_1, F_1), (Φ_2, F_2) y (Φ_3, F_3) y entrando con el valor de F = 700 Av, se obtiene Φ = 1,118 mWb.

Comprobación:

A partir del flujo Φ, se realiza el cálculo de la *F*:

$$\boxed{\Phi = 1{,}118 \text{ mWb}}$$

$$\beta = \frac{\Phi}{S} = \frac{1{,}118 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} = 1{,}118 \text{ T}$$

Según la tabla 5.6, para β = 1,118 T, le corresponde H = 1 160 Av/m, por lo que el valor de *F* será:

$$F = H \cdot l = 1\,160 \times 0{,}6 \approx 700 \text{ Av}$$

Observación:

Si bien este ejercicio es muy sencillo, por ser un circuito homogéneo, el sistema seguido es el indicado para *circuitos heterogéneos,* obteniéndose la *F* por suma de ampervueltas parciales. Para lograr mayor precisión, es aconsejable utilizar la interpolación gráfica.

5.2.3 *Cálculo de un circuito magnético derivado*

Al igual que sucedía en los circuitos eléctricos, también se utilizan los circuitos magnéticos derivados, como el indicado en la figura 5.12.

El flujo de la columna central Φ se bifurca en los flujos Φ_1 y Φ_2, que recorren los circuitos de las columnas laterales:

$$\boxed{\Phi = \Phi_1 + \Phi_2}$$

El cálculo de este circuito se hará de forma similar al circuito serie, con la única diferencia de la columna central, ya que en ella el flujo es el total, mientras que, en cada circuito lateral, el flujo es una fracción del total.

Como norma general, se aplicará la expresión:

$$F = \Sigma N \cdot I = (N_1 \cdot I_1) + (N_2 \cdot I_2) + (N_3 \cdot I_3) + \ldots$$

$$= (H_1 \cdot l_1) + (H_2 \cdot l_2) + (H_3 \cdot l_3) + \ldots$$

Ejercicio de aplicación

Se dispone de un circuito magnético (fig. 5.12), formado por un apilado de chapa normal y una bobina en el núcleo central. Averiguar la *F* necesaria para que en la columna central haya un flujo de 9 mWb, bifurcándose posteriormente en dos circuitos iguales.

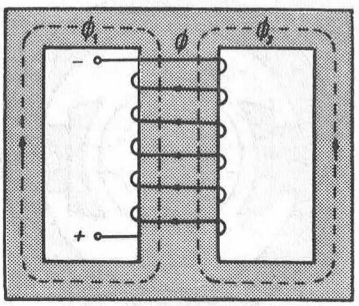


Fig. 5.12 Circuito magnético derivado.

Datos:

Sección columna central	S_C	= 60 cm²
Sección columnas laterales	S_L	= 25 cm²
Sección yugos	S_Y	= 30 cm²
Longitud columna central	l_C	= 40 cm
Longitud columna lateral	l_L	= 40 cm
Longitud yugo	l_Y	= 30 cm

Solución:

Las inducciones en las diferentes partes del circuito serán:

$$\beta_C = \frac{\Phi_T}{S_C} = \frac{9 \times 10^{-3}}{60 \times 10^{-4}} = 1{,}5 \text{ T}$$

$$\beta_L = \frac{\Phi_L}{S_L} = \frac{\frac{9}{2} \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-4}} = 1{,}8 \text{ T}$$

$$\beta_Y = \frac{\Phi_Y}{S_Y} = \frac{\frac{9}{2} \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-4}} = 1{,}5 \text{ T}$$

en donde:

β_C = β columna central
β_L = β columna lateral
β_Y = β yugo o culata

Según la tabla de magnetización, para chapa normal, las intensidades de campo serán:

$$H_C = 2\,200 \text{ Av/m}$$

$$H_L = 10\,000 \text{ Av/m}$$

$$H_Y = 2\,200 \text{ Av/m}$$

La longitud que se debe considerar para el cálculo de la *F* será la correspondiente a un circuito derivado (señalado por la línea de trazos), ya que los dos circuitos derivados son similares:

$$l_T = l_C + l_L + (2 \cdot l_Y)$$

El cálculo de la *F* será:

$$F = H_C \cdot l_C + H_L \cdot l_L + H_Y \cdot 2 \cdot l_Y$$
$$= 2\,200 \times 0{,}40 + 10\,000 \times 0{,}40 + 2\,200 \times 2 \times 0{,}30 = 6\,200 \text{ Av}$$

5.2.4 *Dispersión del flujo*

En los estudios citados anteriormente, se ha supuesto que todo el flujo atraviesa el circuito magnético, cuando en la realidad existe siempre una parte del flujo que se dispersa, dando lugar a variaciones en el cálculo del circuito.

5.2.4.1 *Coeficiente de dispersión del flujo*

Observando la figura 5.13, puede apreciarse la existencia de tres flujos diferentes:

Φ_T = flujo total creado en el polo,
Φ_d = flujo disperso que no atraviesa el inducido,
Φ_u = flujo útil aprovechado en el inducido.

Se define el coeficiente de dispersión (ν) como el cociente entre el flujo total y el flujo útil:

$$\nu = \frac{\Phi_T}{\Phi_u} = \frac{\Phi_u + \Phi_d}{\Phi_u} = 1 + \frac{\Phi_d}{\Phi_u}$$

en donde:

ν = coeficiente de Hopkinson

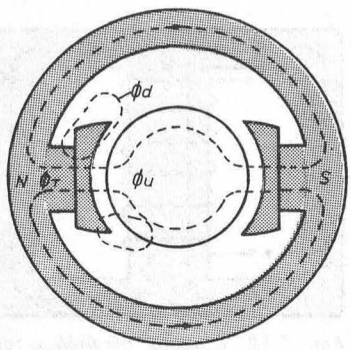


Fig. 5.13 Dispersión del flujo.

El coeficiente de Hopkinson se determina por medio de sondas magnéticas en diferentes partes de los circuitos inductor e inducido, y toma valores comprendidos entre 1,12 y 1,25.

5.3 Circuito magnético de una máquina de corriente continua

Anteriormente (apartado 4.4.1), se determinó la expresión general de la f. e. m. generada en el inducido de una máquina de c. c.

$$E = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

en donde, Φ es el flujo útil en el inducido.

Corresponde al devanado de excitación el crear una *F* capaz de establecer en el circuito magnético de la máquina el flujo Φ, el cual, a su vez, generará la f. e. m.

5.3.1 *Datos de partida*

Normalmente, se conocen las secciones y longitud media de los trayectos del flujo, así como el coeficiente de Hopkinson y las curvas de magnetización de los materiales que constituyen el circuito magnético; también se conocen los datos del inducido con la excepción del flujo.

En la figura 5.14 se representa un circuito magnético de una máquina hexapolar, que dispondrá de seis circuitos magnéticos similares.

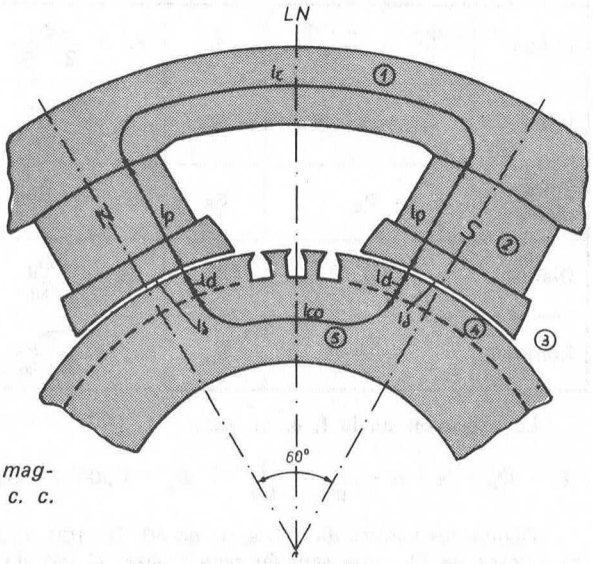


Fig. 5.14 Partes del circuito magnético de una máquina de c. c.

Para cualquier tipo de máquina de c. c., el circuito magnético lo constituyen las partes siguientes:

1 Culata
2 Polos
3 Entrehierro
4 Dientes
5 Corona

5.3.2 *Cálculo del circuito magnético*

La dificultad del cálculo se debe a la existencia de dos incógnitas *F* y Φ que, a su vez, dependen una de la otra.

Para solucionar el problema, *se fijan* arbitrariamente valores de *E*, y de ellos se obtendrán los correspondientes valores de Φ, que a su vez permitirán llegar a obtener la *F*.

Resumen:

$$\text{Se fija } E,\ E \rightarrow \Phi,\ \Phi \rightarrow \beta,\ \beta \rightarrow H,\ H \rightarrow F.$$

Ejercicio de aplicación

Prever la curva de magnetismo de una dínamo tetrapolar de 2,5 kW a 120 V y 1 500 r. p. m. Datos de partida:

a) Características del devanado inducido: n = 400, ondulado serie (2 c = 2).

b) Dimensiones y materiales del circuito:

Parte del circuito	*Material*	*Sección (cm^2)*	*Longitud (cm)*
Culata	Acero fundido	45	30
Polo	Acero fundido	60	9
Entrehierro	Aire	140	0,2
Diente	Chapa normal	41	3
Corona	Chapa normal	100	15

c) Tabla 5.6 de materiales. Coeficiente de Hopkinson: $\nu = 1{,}25$.
Cada bobina de excitación dispone de 1 000 espiras.

Solución:

La distribución del circuito por *par de polos* en unidades Giorgi será:

Parte del circuito	*Φ (Wb)*	*S (m^2)*	*β (T)*	*H (Av/m)*	*l (m)*	*F (Av)*
Culata	$\frac{\Phi_T}{2} = \frac{\nu \cdot \Phi_u}{2}$	S_c	$\beta_c = \frac{\Phi_T}{2 \cdot S_c}$	H_c	l_c	$H_c \cdot l_c$
Polo	$\Phi_T = \nu \cdot \Phi_u$	S_p	$\beta_p = \frac{\Phi_T}{S_p}$	H_p	l_p	$H_p \cdot 2 \cdot l_p$
Entre-hierro	Φ_u	S_δ	$\beta_\delta = \frac{\Phi_u}{S_\delta}$	H_δ	l_δ	$H_\delta \cdot 2 \cdot l_\delta$
Diente	Φ_u	S_d	$\beta_d = \frac{\Phi_u}{S_d}$	H_d	l_d	$H_d \cdot 2 \cdot l_d$
Corona	$\frac{\Phi_u}{2}$	S_{co}	$\beta_{co} = \frac{\Phi_u}{2 \cdot S_{co}}$	H_{co}	l_{co}	$H_{co} \cdot l_{co}$

La expresión de la f. e. m. es:

$$E = \Phi_u \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = \Phi_u \cdot 1\,500 \times 400 \times \frac{2}{1} \times \frac{1}{60} = 20\,000 \cdot \Phi_u$$

Fijando los valores de la f. e. m. en 40, 70, 100, 120 y 150 V, les corresponderán distintos valores de Φ_u, que servirán para realizar el cálculo completo.

A continuación se indica el cuadro resumen con los resultados obtenidos en los tramos del circuito.

N.º	*E (V)*	*40*	*70*	*100*	*120*	*150*
1	Φ_u (Wb)	2×10^{-3}	$3{,}5 \times 10^{-3}$	5×10^{-3}	6×10^{-3}	$7{,}5 \times 10^{-3}$
2	Φ_T (Wb)	$2{,}5 \times 10^{-3}$	$4{,}375 \times 10^{-3}$	$6{,}25 \times 10^{-3}$	$7{,}5 \times 10^{-3}$	$9{,}375 \times 10^{-3}$
3	β_c (T)	0,277	0,486	0,694	0,833	1,041
4	β_p (T)	0,416	0,729	1,04	1,25	1,56
5	β_δ (T)	0,142	0,25	0,357	0,428	0,535
6	β_d (T)	0,487	0,853	1,219	1,463	1,829
7	β_{co} (T)	0,100	0,175	0,250	0,300	0,375
8	H_c (Av/m)	143	218	390	563	938
9	H_p (Av/m)	195	425	938	1 635	4 750

N.º	E (V)	40	70	100	120	150
10	H_δ (Av/m)	$1{,}13 \times 10^5$	$1{,}99 \times 10^5$	$2{,}84 \times 10^5$	$3{,}4 \times 10^5$	$4{,}25 \times 10^5$
11	H_d (Av/m)	88	310	940	1 915	10 750
12	H_{co} (Av/m)	50	53	60	65	72
13	$H_c \cdot l_c$ (Av)	43	65	117	169	281
14	$H_p \cdot 2\, l_p$ (Av)	35	76,5	168	294	855
15	$H_\delta \cdot 2\, l_\delta$ (Av)	452	796	1 136	1 360	1 700
16	$H_d \cdot 2\, l_d$ (Av)	5	18	56	115	645
17	$H_{co} \cdot 2\, l_{co}$ (Av)	7,5	8	9	10	11
18	$F_{2\,p}$ (Av)	542,25	963,5	1 486	1 948	3 492
19	F_{polo} (Av)	271,75	481,75	743	974	1 746

Tomando los cinco valores del flujo útil en ordenadas y su fuerza magnetomotriz correspondiente en abscisas, quedará representada la curva de magnetismo (fig. 5.15):

$\Phi = f(F)$

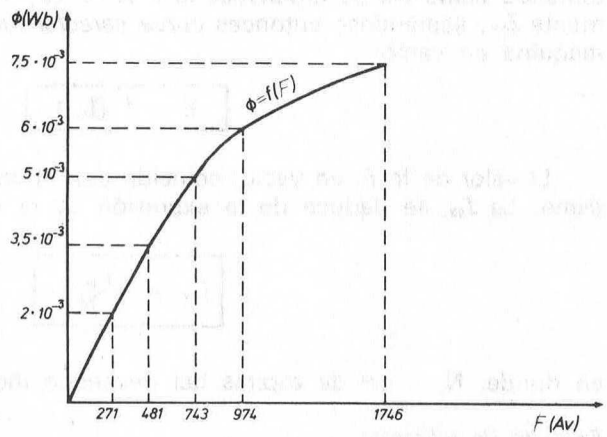


Fig. 5.15 Curva de magnetismo de una dínamo.

5.3.3 *Estudio de la curva de magnetismo correspondiente a una máquina de c. c.*

En la curva (fig. 5.16), caben destacar tres tramos diferentes:

a) Un primer tramo lineal (*OA*), llamado *recta del entrehierro,* en el que se mantiene la proporcionalidad entre el Φ y la *F*. Esto es debido a que la reluctancia que presenta el entrehierro es muy superior al resto de las reluctancias, necesitando prácticamente todos los ampervueltas, pudiéndose representar por la ecuación de una recta.

b) Codo de la curva (AB), en el que se pierde la proporcionalidad entre el Φ y la *F*, debido a que las demás reluctancias adquieren su valor y la función responde a una curva.

c) Ultimo tramo (*BC*), en el que se llega a la *saturación* del material, por lo que no aumentará la emisión de líneas de inducción, a pesar de aumentar la *F*.

Para comprender mejor el estudio de la curva, es conveniente observar los valores parciales del flujo y de los ampervueltas, indicados en la tabla de valores del ejercicio anterior.

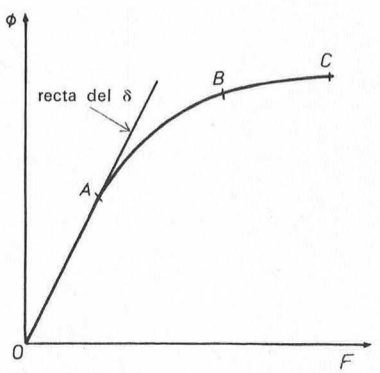


Fig. 5.16 Partes de la curva de magnetismo.

Resumen:

El máximo aprovechamiento de la *F* en una máquina se conseguirá cuando los entrehierros sean mínimos, se trabaje en la zona próxima a la saturación y se disminuya en lo posible el flujo disperso.

5.4 Fuerza magnetomotriz necesaria cuando la máquina funciona en vacío

En la marcha en vacío, la f. e. m. inducida coincide con la tensión en bornas (por no haber caída de tensión), y se obtiene a partir de la expresión:

$$V_b = E_o$$

$$E_o = \Phi_u \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = K \cdot \Phi_u$$

en donde:

$$K = n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = \text{cte.}$$

Así, pues, la E_o es directamente proporcional a Φ_u.

De igual modo sucede entre la F y la corriente que circula por la bobina de excitación ($I_{ex.}$):

$$F = N \cdot I_{ex.} = K_1 \cdot I_{ex.}$$

en donde, K_1 = constante (n.º de espiras por bobina).

Por lo que se mantendrá la proporcionalidad entre F y $I_{ex.}$.

Estas proporcionalidades permitirán representar la curva de magnetismo, tomando como eje de ordenadas la f. e. m. (E) y como eje de abscisas la corriente $I_{ex.}$, llamándose entonces *curva característica de vacío,* por funcionar la máquina en vacío:

$$E = f\ (I_{ex.})$$

El valor de la F, en vacío, coincide con el cálculo de la curva de magnetismo. La $I_{ex.}$ se deduce de la expresión de la F:

$$I_{ex.} = \frac{F_{polo}}{N}$$

en donde, N = n.º de espiras del devanado inductor.

Ejercicios de aplicación

1.º Averiguar la corriente de excitación de la dínamo del ejercicio anterior (apartado 5.3.2), si cada bobina polar es de 100 espiras; y representar la curva de vacío para los cinco valores señalados.

Solución:

El valor de $I_{ex.}$ se deduce aplicando la expresión:

$$I_{ex.} = \frac{F_{polo}}{N} = \frac{F_{polo}}{1\,000}$$

E (V)	40	70	100	120	150
F_{polo} (Av)	271,75	481,75	743	974	1 746
$I_{ex.}$ (A)	0,271	0,481	0,743	0,974	1,746

Con los valores de E y $I_{ex.}$ se representará la curva (fig. 5.17), que será *proporcional* a la de magnetismo (fig. 5.15), por serlo los valores de los ejes coordenados.

2.º Una bobina de excitación que rodea un núcleo polar está conectada a una red de 110 V para producir 10 000 Av. Averiguar la sección del conductor oportuno, si la longitud de la espira media es de 60 cm y la resistividad del cobre a la temperatura de trabajo es de 0,02 $\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$.

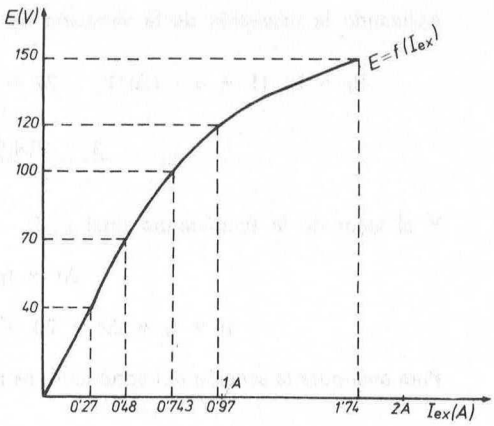


Fig. 5.17 Característica de vacío de una dínamo.

Solución:

La resistencia de la bobina es:

$$R = \left(\rho \cdot \frac{l_m}{S}\right) \cdot N$$

en donde:

l_m = longitud espira media
N = número de espiras

Despejando la sección:

$$S = \frac{\rho \cdot l_m \cdot N}{R}$$

A su vez, la corriente de excitación $I_{ex.}$ es:

$$I_{ex.} = \frac{V}{R}; \qquad R = \frac{V}{I_{ex.}}$$

Quedando para la sección:

$$S = \frac{\rho \cdot l_m \cdot N}{\frac{V}{I_{ex.}}} = \frac{\rho \cdot l_m \cdot (N \cdot I_{ex.})}{V} = \frac{\rho \cdot l_m}{V} \cdot (N \cdot I_{ex.})$$

en donde:

$N \cdot I_{ex.}$ = ampervueltas inductores

Sustituyendo los datos del enunciado:

$$S = \frac{0{,}02 \times (60 \times 10^{-2})}{110} \times 10\,000 = 1 \text{ mm}^2$$

3.º Una máquina de c. c. dispone de una bobina de campo de 2 060 m de longitud, construida con hilo de cobre de $\rho = 0{,}017\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$ a 0 °C, para conectar a una red de 110 V. Se mide la resistencia de la bobina con la máquina parada (temperatura ambiente de 20 °C) y da un valor de 19 Ω. Al cabo de varias horas de funcionamiento, la corriente absorbida por la bobina es de 5 A y la temperatura ambiente de 20 °C. Averiguar la temperatura alcanzada por la máquina en ese momento, y la sección del conductor de cobre, cuyo coeficiente de temperatura es:

$$\alpha = \frac{1}{234{,}5 + t_{inicial}}$$

Solución:

La resistencia en frío es de 19 Ω, mientras que la resistencia en caliente se obtendrá aplicando la ley de Ohm:

$$R_c = \frac{V}{I_{ex.}} = \frac{110}{5} = 22\ \Omega$$

Aplicando la expresión de la variación de resistencia con la temperatura:

$$R_f = R_c\,[1 + \alpha \cdot (\Delta t)]; \quad 22 = 19\left(1 + \frac{1}{234{,}5 + 20} \times \Delta t\right)$$

$$\Delta t = \frac{3 \times 254{,}5}{19} = 40{,}18\ ^{\circ}C$$

Y el valor de la temperatura final será:

$$\Delta t = t_f - t_i$$

$$t_f = t_i + \Delta t = 20 + 40{,}18 = 60{,}18\ ^{\circ}C$$

Para averiguar la sección del conductor, es necesario antes obtener la resistividad a 20 °C:

$$\rho_{20\,^{\circ}C} = \rho_{0\,^{\circ}C} \cdot [1 + \alpha\,(20\ ^{\circ}C - 0\ ^{\circ}C)] = 0{,}017\left(1 + \frac{1}{234{,}5} \times 20\right)$$

$$= 0{,}01844\ \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$$

y la sección:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0{,}01844 \times 2\,060}{19} = 2\ mm^2$$

5.5 Fuerza magnetomotriz necesaria cuando la máquina funciona en carga

Al funcionar la máquina en carga la tensión en bornas es inferior a la de vacío, por dos motivos:

1.º Caídas de tensión internas.
2.º Variaciones de la f. e. m. por reacción del inducido.

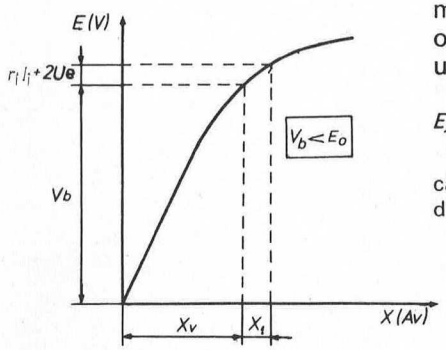
5.5.1 *Caídas de tensión internas*

Como ya se explicó en el tema anterior (apartado 4.5.1.2), al circular una intensidad por el inducido y escobillas, se produce una caída de tensión que se resta a la f. e. m.

$$\boxed{V_b = E_o - (r_i \cdot I_i) - 2\,U_e}$$

Para seguir disponiendo en el circuito exterior de una tensión en bornas igual a la de vacío (E_o), es necesario añadir, a los ampervueltas inductores (X_v), el término (X_1) (fig. 5.18).

Sin embargo, la realidad dice que la tensión en bornas, a pesar del aumento de X_1, no llega a ser la de vacío ($V_b < E_o$). Ello es debido a que aparece otro fenómeno más complejo llamado *reacción de inducido,* que lleva consigo una disminución de la tensión.



X_V = A_V de vacío
X_1 = A_V para compensar las caídas de tensión interna

Fig. 5.18 Ampervueltas necesarios para compensar las caídas de tensión internas.

Ejercicio de aplicación

Una dínamo genera en vacío una tensión de 475 V, mientras que, al funcionar a plena carga, suministra una corriente de 100 A, a la tensión de 440 V. Si la resistencia interior total del inducido es de 0,1 Ω, averiguar las caídas de tensión internas y por reacción de inducido.

Solución:

Aplicando la expresión de caídas de tensión internas:

$$E = V_b + (r_i \cdot I_i) + 2\,U_e = 440 + (0{,}1 \times 100) + 2 = 452\ V$$

El valor obtenido para E es inferior al conseguido en vacío E_o, sin haber variado los ampervueltas inductores. La diferencia entre los dos términos es la caída de tensión por reacción de inducido:

$$E_o - E = 475 - 452 = 23\ V$$

Así, pues, las caídas de tensión serán:

$$(r_i \cdot I_i) + 2 = 12 \text{ V}$$

por caídas internas.

$$E_0 - E = 23 \text{ V}$$

por reacción de inducido.

5.5.2 *Variaciones de la f. e. m. por reacción de inducido*

Se acaba de resolver un ejercicio en el que se pone de manifiesto la importancia de la caída de tensión en una máquina que trabaja en carga, por efecto de la reacción de inducido.

Dado que este fenómeno lleva consigo una disminución de la tensión en bornas, para seguir obteniendo la misma tensión que en vacío ($V_b = E_0$), será necesario aumentar los ampervueltas en el término (X_r) (fig. 5.19), de forma que los totales (X_T) serán:

$$\boxed{X_T = X_v + X_1 + X_r}$$

en donde:

X_T = Av totales inductores
X_v = Av necesarios en vacío
X_1 = Av para compensar las caídas de tensión interna
X_r = Av para compensar la reacción de inducido

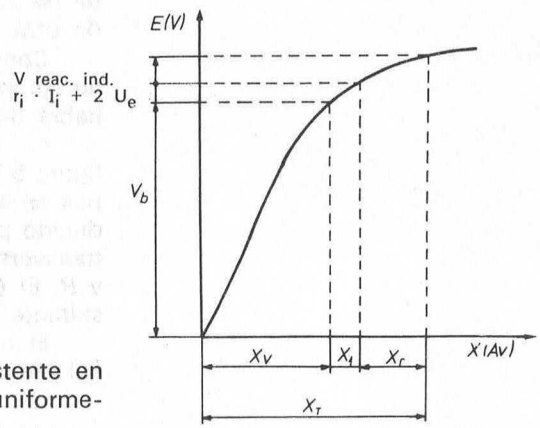


Fig. 5.19 Ampervueltas totales necesarios en carga.

5.6 Reacción del inducido

Cuando la máquina funciona en vacío, el campo magnético existente en la máquina es el producido por los polos (fig. 5.20), y se distribuye uniformemente por el inducido.

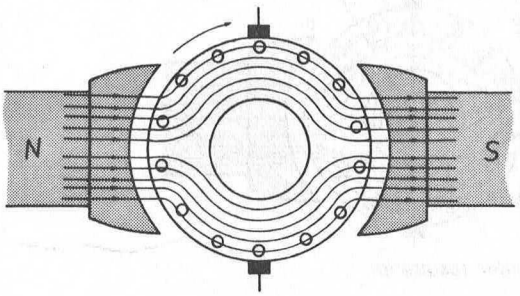
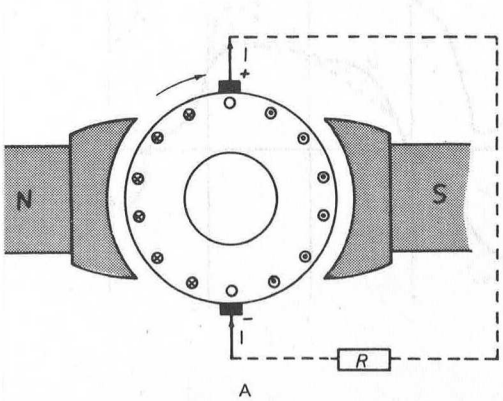
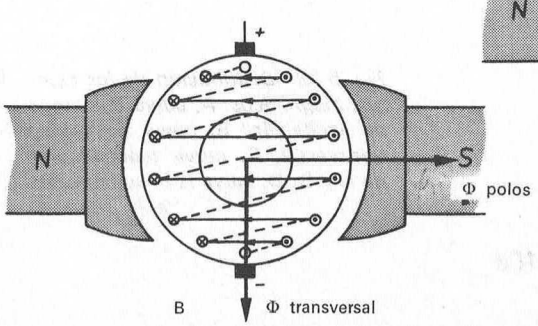


Fig. 5.20 Campo magnético uniforme en vacío.

Al funcionar la máquina en carga, circula una corriente por los conductores del inducido (regla de la mano derecha) (fig. 5.21A), que da lugar a un nuevo campo magnético en el inducido. El sentido del campo magnético puede determinarse imaginando el inducido formando una sola bobina, como la indicada en la figura 5.21B. Aplicando la regla del sacacorchos, se observa que el campo del inducido (Φ transversal) es perpendicular al campo inductor (Φ polos).

El campo transversal se cierra a través de los polos, según indica la figura 5.21C.





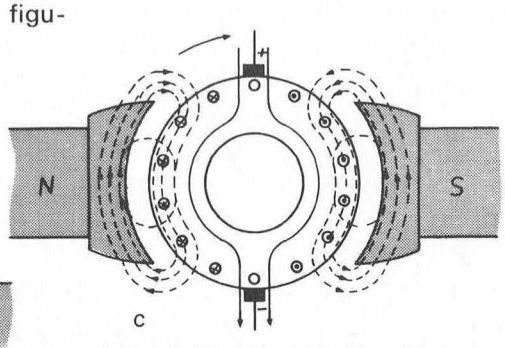


Fig. 5.21 Campo magnético por reacción de inducido: A, *sentido de la corriente en los conductores;* B, *flujo transversal creado por la bobina del inducido;* C, *circuito magnético del flujo transversal.*

5.6.1 *Campo resultante*

Al trabajar la máquina en carga, el campo resultante se obtendrá por composición de los campos inductor y de reacción del inducido (fig. 5.22). Si la máquina funciona como *generador,* las líneas de inducción se acumulan en las salidas de las expansiones polares (*a, d*) según el sentido del movimiento, y se restan en las entradas (*b, c*). Si se trata de *motor,* las líneas se acumulan en la entrada (*a, d*) y se restan en la salida (*b, c*), puesto que el sentido de giro del motor es opuesto al del generador, si se mantienen el sentido del campo y la polaridad en las escobillas.

5.6.2 *Efectos de la reacción del inducido*

La reacción del inducido da lugar a los problemas siguientes:

a) La composición de campos produce un campo resultante *distorsionado* y desplaza la *línea neutra* en un ángulo α, en el sentido del movimiento para el generador, y un retraso del mismo ángulo para el motor.

b) El desplazamiento de la línea neutra obliga a *modificar la posición de las escobillas,* porque conductores de un campo han pasado a formar parte de otro campo, con la consiguiente disminución de la f. e. m. resultante.

Como se estudiará en el tema de la conmutación (Tema 6), la posición de las escobillas ha de ser tal que provoque el mínimo de chispas, por lo que habrá de modificarse su posición, también por este motivo.

c) Disminución del flujo total, debido a la *saturación del hierro.* En la figura 5.23 se muestra el desarrollo de un par de polos y la distribución de campos en el inducido. El gráfico (*A*) corresponde a la distribución del campo producido por el devanado de excitación, mientras que el (*B*) representa el campo transversal. El (*C*) corresponde al gráfico teórico obtenido como suma de *A* y *B*. El (*D*) corresponde a la *suma real* de *A* y *B*, correspondiendo al flujo resultante.

El hecho de no coincidir las curvas (*C*) y (*D*) es debido a la saturación del hierro, que tiene lugar a partir del codo de la curva de magnetismo (apar-

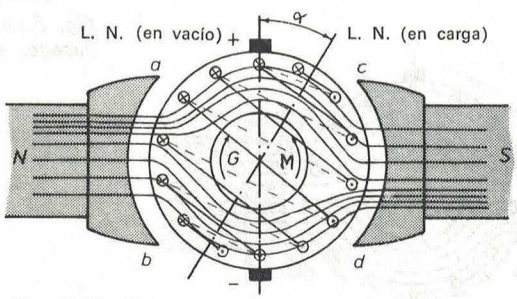


Fig. 5.22 Campo resultante.

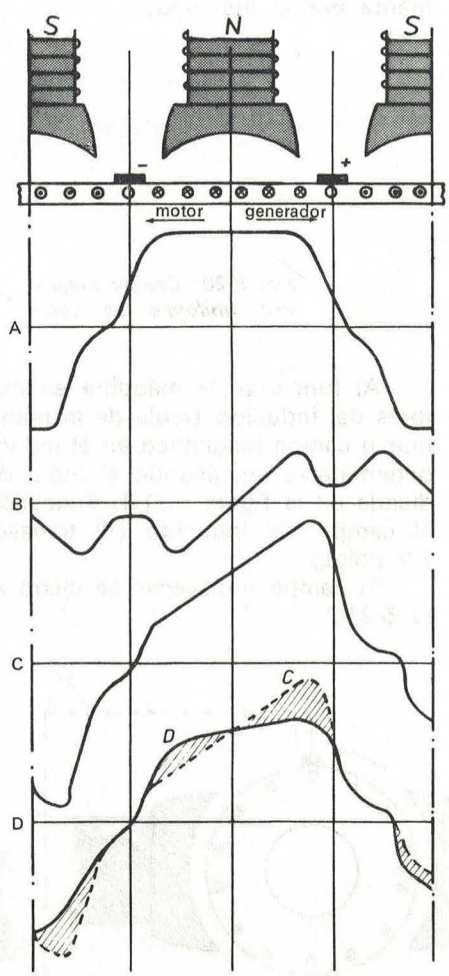
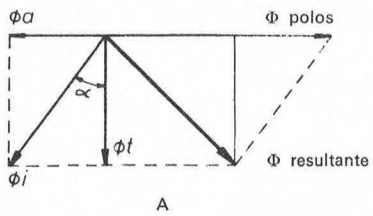


Fig. 5.23 Distribución de los campos magnéticos: A, *curva de campo de excitación;* B, *curva de campo transversal;* C, *curva teórica suma de* A *y* B; D, *curva real, superpuesta a la curva* C.

tado 5.3.3) y, por tanto, afecta a las zonas más altas de la curva (*D*). En (*D*) se ha superpuesto la curva *C* (señalada por trazos) para comprobar la diferencia entre ambas.



A

5.6.3 *Modificación de la posición de las escobillas*

Para evitar los inconvenientes surgidos por la reacción de inducido, se desviarán *(decalarán)* las escobillas el ángulo α (fig. 5.24), dando lugar a una nueva distribución en la corriente del inducido.

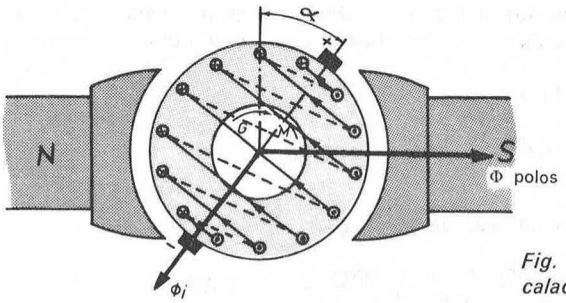


Fig. 5.24 Angulo de calado de las escobillas.

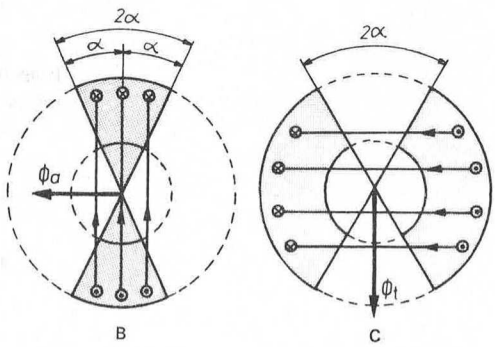


Fig. 5.25 Composición de flujos: A, *diagrama vectorial de flujos;* B, *flujo antagonista;* C, *flujo transversal.*

La nueva reacción del inducido puede estudiarse por un método sencillo, que consiste en *representar los campos magnéticos por vectores* (fig. 5.25A). Así, el flujo del inducido (Φ_i) se puede considerar formado por el flujo antagonista (Φ_a) y el flujo transversal (Φ_t); para ello, se supone al devanado del inducido descompuesto en dos bobinas parciales (*B*, *C*), que darían lugar a dichos flujos parciales (Φ_a, Φ_t).

5.6.4 *Flujo antagonista*

El flujo antagonista lleva dirección idéntica y sentido contrario al flujo inductor (polos), por lo que disminuirá el flujo inductor.

5.6.4.1 *Cálculo de los ampervueltas antagonistas*

El cálculo es sencillo, por ser su *efecto opuesto al producido por los ampervueltas inductores,* y se basa en la proporción siguiente:

$$\frac{N}{n} = \frac{360^\circ}{2\ \alpha}; \qquad n = \frac{N \cdot 2\ \alpha}{360^\circ}$$

en donde:

N = número total de conductores del inducido
n = número de conductores comprendidos en el ángulo 2 α

Al ser la corriente que pasa por cada conductor:

$$I_c = \frac{I_i}{2\ c}$$

se obtienen los ampervueltas antagonistas por par de polos:

$$X_a = n \cdot I_c = \frac{N \cdot 2\ \alpha}{360^\circ} \cdot \frac{I_i}{2\ c} = N \cdot I_i \cdot \frac{\alpha}{c \cdot 360^\circ} = K \cdot N \cdot I_i$$

$$\boxed{X_a = \frac{N \cdot \alpha \cdot I_i}{360^\circ \cdot c}}$$

en donde:

I_i = corriente total del inducido
c = pares de circuitos derivados del devanado
α = ángulo de calado de las escobillas
X_a = ampervueltas antagonistas por par de polos

Ejercicio de aplicación

Una dínamo tetrapolar alimenta un circuito exterior formado por 200 lámparas de 100 W a 125 V, disponiendo de 600 conductores en su inducido, y con las escobillas adelantadas 15° en el sentido del movimiento. Averiguar los ampervueltas antagonistas por polo que deberá neutralizar el circuito de excitación, si el devanado del inducido es:

a) Ondulado serie.
b) Imbricado simple.

Solución:

En ambos casos la intensidad suministrada por la máquina es la misma, para lo cual habrán de modificarse o la velocidad o el campo inductor, al pasar de un tipo a otro de devanado inducido.

La corriente que suministra el inducido es:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{200 \times 100}{125} = 160 \text{ A}$$

a) Los ampervueltas antagonistas por par de polos (X_a):

$$X_a = \frac{N \cdot \alpha \cdot I}{360 \cdot c} = \frac{600 \times 15 \times 160}{360 \times 1} = 4\,000 \text{ Av}$$

por ser 2 c = 2.

Por polo:

$$X_a = \frac{4\,000}{2} = 2\,000 \text{ Av}$$

$$X_a = \frac{N \cdot \alpha \cdot I}{360 \cdot c} = \frac{600 \times 15 \times 160}{360 \times 2} = 2\,000 \text{ Av}$$

por ser 2 c = 2 p = 4.

Por polo:

$$X_a = \frac{2\,000}{2} = 1\,000 \text{ Av}$$

5.6.5 *Flujo transversal*

Como se ha indicado en la figura 5.21C, el flujo transversal se cierra a través de los polos, sumándose en unas partes y restándose en otras.

El cálculo aislado del flujo transversal es bastante complejo, ya que se ha de recurrir a gráficos sobre campos magnéticos y tener presente el efecto de saturación del material.

5.7 Ampervueltas totales en carga

En una máquina que funcione en carga, y con las escobillas desviadas, los ampervueltas del circuito de excitación (X_v) (fig. 5.19) que producían la f. e. m. (V_b) *han de aumentarse hasta* (X_T), con el fin de compensar las caídas de tensión internas y los efectos de la reacción del inducido (X_a, X_T):

$$\boxed{X_T = X_v + X_1 + X_r}$$

$$\boxed{X_r = X_a + X_t}$$

en donde:

X_a = Av para compensar el flujo antagonista
X_t = Av para compensar el flujo transversal
X_T = Av totales inductores

Un problema que dificulta el buen funcionamiento de una máquina de c. c. es la variación de los efectos de reacción de inducido con la *carga,* de forma que sería necesario decalar las escobillas un ángulo diferente, según variara ésta. Este problema afecta principalmente a las máquinas grandes, si bien se

ha eliminado la mayoría de problemas relacionados con la reacción de inducido y la conmutación (Tema 6) disponiendo, en las máquinas, artificios que los contrarrestan, como son los polos de conmutación, devanados compensadores, etcétera, que se tratarán en el próximo tema.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Obtención de las curvas de magnetización en los materiales ferromagnéticos.
— Inconvenientes de la reacción de inducido en las máquinas de c. c.

CUESTIONARIO

5.1 Aplicar la regla del sacacorchos a las bobinas de campo de una máquina de corriente continua hexapolar, señalando los polos *N* y *S*, e indicar la forma de conectar las bobinas entre sí.

5.2 Por una bobina de 80 cm de longitud y 50 mm de diámetro, circula una corriente de 5 A. Averiguar *H* en el interior de la bobina y el flujo producido, si dispone de 400 espiras.

5.3 Una bobina toroidal, cuyo diámetro exterior es de 300 mm y el interior de 250 mm, está rodeada por 1 000 espiras y produce un campo magnético de 2 500 Av/m. Averiguar:

1.° La corriente absorbida por la bobina.
2.° La inducción media en su interior.
3.° El flujo que atraviesa el circuito.

Respuestas: 1.°, 2,16 A; 2.°, 3,14 mT; 3.°, 154 Mx.

5.4 Hallar la inducción en el interior de una bobina, con núcleo de aire, de 500 espiras y 1 m de longitud, cuando circula por ella una corriente de 3 A.

5.5 ¿Es exacta la fórmula del campo en el interior de una bobina: $H = \frac{N \cdot I}{l}$? Razonar la respuesta.

5.6 Construir la curva de magnetización de un material ferromagnético y hallar β_0 y la permeabilidad relativa (μ_r), a partir de la tabla de valores:

β (T)	0	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,9	2
H (Av/m)	0	250	375	500	1 000	2 500	7 000	10 000

5.7 Determinar (β) y (μ_r), en una bobina con 500 espiras y 80 cm de longitud, al ser recorrida por una corriente de 5 A. La bobina rodea un núcleo del mismo material que el citado en el ejercicio anterior, por lo que se utilizará la misma tabla de valores.

Respuestas: β = 1,63 T; μ_r = 340.

5.8 Una bobina de 600 espiras rodea un núcleo toroidal de hierro forjado y produce un flujo de 2,6 mWb, al conectarla a una red de la que absorbe 1 A. Averiguar la sección del circuito magnético si el trayecto medio de las líneas de inducción es de 60 cm. La curva de magnetización está representada en la tabla 5.6.

Respuesta: 20 cm².

5.9 Hallar la *F* necesaria para que un núcleo toroidal de material ferromagnético de 70 cm de longitud media del circuito y sección 5 cm² dé lugar a un flujo de 0,75 mWb. Utilizar la tabla del ejercicio n.° 6.

Respuesta: 1 750 Av.

5.10 Hallar el flujo que atravesará un circuito idéntico al del ejercicio anterior (n.° 9), cuando la *F* valga 700 Av, utilizando la misma curva de magnetismo.

5.11 Citar las reluctancias que intervienen en el circuito magnético de una máquina de c. c. y compararlas entre sí con la ayuda de su curva de magnetismo.

5.12 Averiguar la característica de vacío de la dínamo tetrapolar del ejercicio 5.3.2, cuando gire a 1 000 r. p. m.

5.13 Explicar detalladamente la medida en que viene afectado el flujo transversal de la reacción de inducido por efecto de saturación del hierro.

5.14 Representar los diagramas de flujos correspondientes a un motor, funcionando a plena carga, en los casos:

a) Sin desviar las escobillas.
b) Desviando las escobillas.

5.15 Averiguar los ampervueltas inductores (X_T) que deberá suministrar el circuito de excitación para obtener, en la dínamo del ejercicio 5.3.2, 120 V a plena carga (2,5 kW) y velocidad 1 500 r. p. m.

Datos. La resistencia interna del inducido es de 0,5 Ω, el ángulo de adelanto de las escobillas en carga es de 10° y los ampervueltas totales por reacción de inducido (X_r) son el doble de los antagonistas. El resto de los datos son los citados para el ejercicio 5.3.2.

BIBLIOGRAFIA

BIASUTTI G., *Electricidad,* Editorial Científico Médica, Barcelona 1970.
ALFARO E., *Curso de Electricidad,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.
NIARD J., *Curso de Electricidad I,* Toray-Masson, S. A., Barcelona 1971.
MORILLO J., *Curso de Electricidad I,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.
CORTES M., *Máquinas eléctricas de c. c.,* Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1965.

Tema 6
Conmutación

OBJETIVOS

— *Relacionar la energía electromagnética almacenada en una bobina y la conmutación.*
— *Analizar el proceso de la conmutación.*
— *Valorar la importancia de la conmutación ideal o lineal.*
— *Comprobar la imposibilidad de conseguir la conmutación lineal sobre la línea neutra.*
— *Computar los inconvenientes que surgen en la conmutación al decalar las escobillas.*
— *Citar los sistemas utilizados actualmente para conseguir una buena conmutación.*

GUION

— Introducción.
— Proceso de conmutación.
— Condiciones para conseguir una buena conmutación.
— Conmutación sobre la línea neutra.
— Conmutación real, cubriendo una escobilla varias delgas.
— Normas aconsejables para mejorar la conmutación.
— Medios utilizados para lograr una buena conmutación.

PUNTOS CLAVE

— Señalar la importancia de las chispas en la conmutación.
— Justificar la calidad de una conmutación lineal.
— Comparar los diferentes medios utilizados para mejorar la conmutación.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Leyes de Kirchhoff y aplicación a la resolución de circuitos.

EXPOSICION DEL TEMA

6.1 Introducción

En el Tema 2, se explicaba la determinación de la polaridad en las escobillas (apartado 2.3.2.2) y el sentido de la corriente en cada conductor del inducido, llegándose a la conclusión de que *la corriente se invierte en el conductor al pasar por la zona neutra.*

Posteriormente (apartado 3.3.2), en el estudio de los devanados reales de las máquinas, se definía la *rama* como el conjunto de secciones de un devanado que en un instante dado se encuentran en serie entre dos escobillas consecutivas de signos opuestos.

En definitiva, pues, se produce una *inversión de corriente* en las espiras del inducido cuando pasan de una rama a otra, dando lugar a un conjunto de fenómenos que se conoce por *conmutación.*

En el aspecto físico, el estudio de la conmutación es muy complejo, por mezclarse factores mecánicos, eléctricos, térmicos y electromagnéticos, pudiendo considerarse como un tema de investigación.

Antes de iniciar el estudio de la conmutación, se indica, a continuación, un breve estudio sobre la f. e. m. de autoinducción, por jugar un papel importante en la conmutación.

6.1.1 *F. e. m. de autoinducción*

Cuando varía la corriente en un circuito, también lo hace el flujo, y en la bobina aparece una f. e. m. de autoinducción, que vale:

$$e_a = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

A su vez, el coeficiente de autoinducción (L) es el cociente entre el flujo a través del circuito (Φ) y la corriente que circula por él (I):

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

en donde:

Φ = flujo a través del circuito (Wb)
I = corriente que recorre el circuito (A)
L = coeficiente de autoinducción o inductancia (H)

Sustituyendo en la expresión de la f. e. m.:

$$e_a = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

en donde:

Δt = tiempo (s)
e_a = f. e. m. de autoinducción (V)

Y en valor absoluto:

$$|e_a| = \left| L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|$$

Ejercicio de aplicación

Averiguar la f. e. m. de autoinducción que aparece en una bobina que rodea a un núcleo de hierro, si hay una variación de 40 A en 0,1 s y la inductancia es de 0,5 H.

Solución:

$$e_a = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = -0{,}5 \times \frac{40}{0{,}1} = -200 \text{ V}$$

El valor absoluto es +200 V, ya que el signo menos indica el sentido de la f. e. m., que tiende a oponerse a la tensión aplicada, que a su vez, motivó el paso de la corriente.

6.1.1.1 *Energía almacenada por una bobina*

Cuando la corriente aumenta en el circuito, la bobina almacena energía y la devolverá al cesar la corriente. El comportamiento de la bobina es similar al de un volante de inercia en mecánica, que adquiere la energía $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ al ponerse en movimiento y la devuelve al cesar la velocidad, evitando una parada rápida.

El valor de la energía potencial es:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

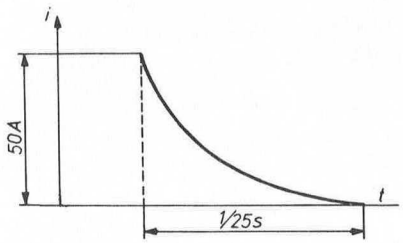


Fig. 6.1 Corriente de apertura en un circuito inductivo.

en donde:

L = inductancia (H)
I = intensidad (A)
W = energía (J)

Al abrir un circuito en el que exista inductancia, la energía almacenada, $\frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$, se manifiesta en forma de *una chispa que va destruyendo* los contactos.

Ejercicio de aplicación

En un circuito inductivo de inductancia 200 mH, circula una corriente de 20 A y, al producirse la ruptura, la corriente tarda 1/25 de segundo en anularse. Calcular la energía disipada y la potencia consumida por la chispa.

Solución:

El cese de la corriente en un circuito inductivo se muestra en la figura 6.1, pudiéndose apreciar que la corriente no se anula instantáneamente, sino que tarda un tiempo que depende de las características del circuito.

La energía disipada es:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \times (200 \times 10^{-3}) \times 20^2 = 40 \text{ J}$$

La potencia:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{40}{\frac{1}{25}} = 1\,000 \text{ W}$$

Se comprueba que la potencia disipada es muy elevada en estos circuitos, debido al breve tiempo en que se manifiesta la apertura del circuito.

6.1.2 *Producción de chispas en el colector*

La inversión de corriente que se produce en una sección cualquiera del devanado inducido de una máquina de c. c. da lugar a la aparición de chispas entre el colector y las escobillas, que pueden alcanzar valores peligrosos para la máquina.

La calidad de la conmutación depende del *grado de chisporroteo,* siendo sus características más peculiares el color y la zona de actuación. Ejemplo: cuando aparece un fuerte chisporroteo debajo de todo el borde de la escobilla, con chispas de gran tamaño, se ennegrece el colector y las escobillas se queman rápidamente.

En resumen, puede decirse de la conmutación que es la mejor o peor manera de producir chispas en el colector.

6.2 Proceso de conmutación

Para simplificar el estudio, se parte de una máquina bipolar, con el devanado imbricado en anillo formado por 8 bobinas (fig. 6.2), por lo que circulará la mitad de la corriente total por cada rama.

La conmutación se producirá cuando, en una bobina cualquiera (*X*), se produzca su inversión de corriente, permaneciendo el tiempo que dure la conmutación cortocircuitada por la escobilla. Se supone que el ancho de la escobilla coincide con el de una delga y que se desprecia la anchura del aislante entre delgas consecutivas del colector.

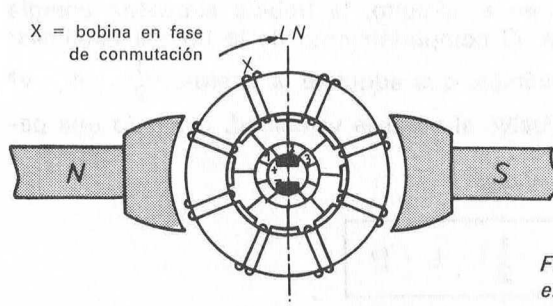


Fig. 6.2 Devanado en anillo.

6.2.1 *Estudio de la variación de corriente en función del tiempo*

La variación de corriente en la bobina (*X*) se estudia en tres instantes (figura 6.3).

6.2.1.1 *Instante inicial*

Tiene lugar cuando la escobilla está en contacto sólo con la delga 2 (figura 6.3A). El sentido de la corriente (*i*) se fija arbitrariamente, habiéndose elegido positivo ($\vec{i}$), por lo que resultará:

$$i = +I$$

$$i_2 = I + i = I + I = 2\,I$$

$$i_1 = 0$$

$$t = 0$$

en donde:

t = instante inicial del período de conmutación
i = corriente que circula por la bobina (X) que conmuta
i_1 = corriente en la delga 1
i_2 = corriente en la delga 2
I = corriente que circula por cada rama del devanado inducido

6.2.1.2 *Instante intermedio*

Se elige cuando se ha producido un desplazamiento del inducido con respecto a la escobilla, que permanece fija, y se ha establecido contacto con las delgas 2 y 1 (fig. 6.3B), formando un circuito cerrado sobre sí mismo. Aplicando la ley de Kirchhoff y suponiendo que (i) es positivo:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= I - i \\ i_2 &= I + i \end{aligned}\right\} \; i_1 + i_2 = (I - i) + (I + i) = 2\,I$$

en donde:

T = tiempo de duración de la conmutación

El tiempo (*t*) será:

$$\boxed{0 < t < T}$$

6.2.1.3 *Instante final*

Cuando la escobilla está bajo la delga 1 (fig. 6.3C), cumpliéndose que:

$$i = -I$$

$$i_1 = I - i = I - (-I) = 2\,I$$

$$i_2 = 0$$

$$t = T$$

6.2.1.4 *Resumen del proceso de la conmutación*

En el período de tiempo (*T*), se ha producido la inversión de corriente en la bobina (*X*), cumpliéndose en cada momento que la corriente que salía por la escobilla era la total de la máquina (2 I).

Si, en lugar del devanado en anillo, fuese en tambor, imbricado u ondulado (fig. 6.4), se aplicará la misma teoría y los resultados serían similares.

6.2.2 *Diagrama de la variación de corriente en la bobina cortocircuitada*

Según el estudio que acaba de hacerse, en un tiempo (*T*) la corriente (*i*) varía desde (+I) hasta (−I); por tanto, puede representarse en un gráfico (fi-

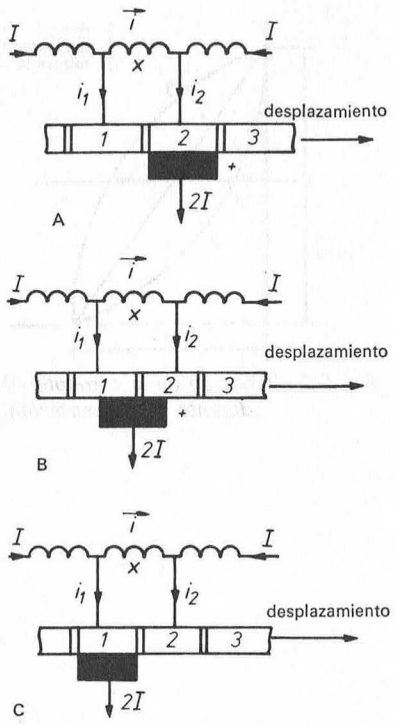


Fig. 6.3 Proceso de conmutación: A, *instante inicial;* B, *instante intermedio;* C, *instante final.*

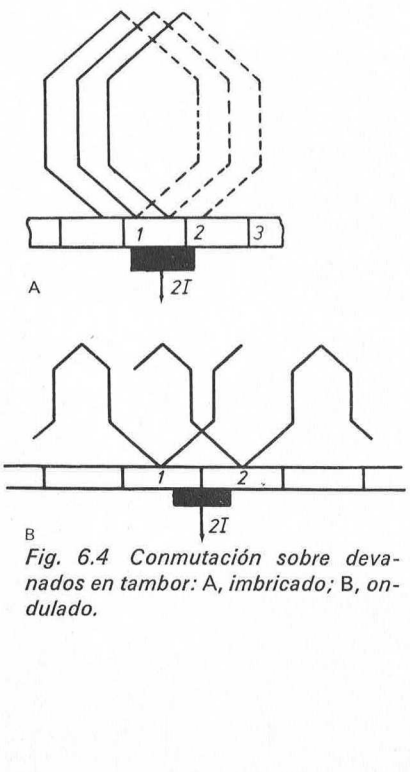


Fig. 6.4 Conmutación sobre devanados en tambor: A, *imbricado;* B, *ondulado.*

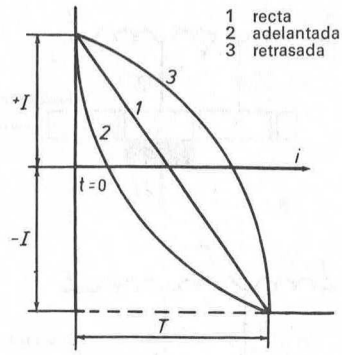


Fig. 6.5 Variación de la corriente (i) durante la conmutación.

gura 6.5), tomando en ordenadas el valor de las corrientes y en abscisas el tiempo.

La corriente (*i*) pasará, durante la conmutación, por una de las tres posiciones señaladas en la figura:

1.ª *Recta,* la variación de la corriente es lineal.

2.ª *Convexa,* la variación de la corriente se adelanta con respecto a la recta.

3.ª *Cóncava,* la variación de la corriente se retrasa con respecto a la recta.

Antes de estudiar la posición más apropiada de las escobillas para realizar la conmutación, es necesario conocer las ff. ee. mm. que se inducen en la bobina que está conmutando y las corrientes que circulan por el circuito: bobina-delgas-escobillas.

6.2.3 *F. e. m. del circuito de conmutación*

Durante el proceso de conmutación aparecen dos ff. ee. mm.:

a) La f. e. m. de autoinducción e_a, debido a la rápida variación de corriente (desde +I a −I) que se produce en el período *T* de conmutación.

El valor absoluto de e_a será:

$$e_a = \left| L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = L \cdot \frac{[I - (-I)]}{T} = \boxed{L \cdot \frac{2\,I}{T}}$$

en donde:

L = inductancia (H)
I = corriente de cada rama (A)
T = período de conmutación (s)
e_a = f. e. m. (V)

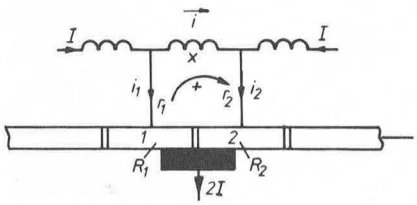


Fig. 6.6 Circuito cerrado formado durante la conmutación.

b) La f. e. m. inducida *e*, debido a la existencia de un flujo transversal en la línea neutra. En el Tema 5 se explicó el origen del flujo transversal (apartado 5.6). El sentido de la f. e. m. *e* depende de la polaridad del campo magnético, siendo, en este caso, del mismo sentido que e_a.

6.2.4 *Ecuación general de la conmutación*

Cuando la escobilla hace contacto sobre dos delgas consecutivas (1 y 2) (fig. 6.6), se forma un circuito cerrado, constituido por la bobina (*X*), los conductores que la unen a las delgas (r_1, r_2) y las delgas en contacto con la escobilla (R_1, R_2).

Aplicando la 2.ª ley de Kirchhoff, resultará:

$$\boxed{\Sigma\, e = \Sigma\, r \cdot i}$$

Se ha elegido como sentido de corrientes positivo el que coincide con el giro de las agujas del reloj: ↷ +.

Sustituyendo los términos:

$$e_a + e = (X \cdot i) + [i_2 \cdot (r_2 + R_2)] - [i_1 \cdot (r_1 + R_1)]$$

Teniendo en cuenta que los términos r_1 y r_2 son prácticamente iguales:

$$r_1 = r_2 = r$$

Será:

$$e_a + e = (X \cdot i) + (i_2 \cdot r) + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot r) - (i_1 \cdot R_1)$$
$$= X \cdot i + [r \cdot (i_2 - i_1)] + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1)$$

A su vez:

$$\left.\begin{aligned} i_2 &= I + i \\ i_1 &= I - i \end{aligned}\right\} \; i_2 - i_1 = I + i - I - (-i) = 2\,i$$

Al sustituir:

$$e_a + e = (X \cdot i) + (r \cdot 2\,i) + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1)$$
$$= [i \cdot (X + 2\,r)] + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1)$$

De forma que la ecuación general de la conmutación será:

$$e_a + e = [i\ (X + 2\ r)] + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1)$$

6.3 Condiciones para conseguir una buena conmutación

La condición fundamental que permitirá conseguir una buena conmutación es que *exista proporcionalidad* entre las corrientes i_1 e i_2 con sus secciones de contacto S_1 y S_2 durante el período de conmutación. En definitiva, que las densidades de corriente J_1 y J_2 sean siempre constantes y, a ser posible, iguales.

6.3.1 *Densidades de corriente*

Las densidades de corriente se obtienen por cociente entre las corrientes que llegan a las delgas y sus secciones de contacto con la escobilla; así:

$$J_1 = \frac{i_1}{S_1}; \qquad J_2 = \frac{i_2}{S_2}$$

en donde:

S_1 = superficie de contacto entre la escobilla y la delga 1
S_2 = superficie de contacto entre la escobilla y la delga 2

En el primer instante de la conmutación, la i_2 es máxima, la sección S_2 es máxima (coincide con el ancho de escobilla) (fig. 6.3A), mientras que $J_1 = 0$.

A medida que se desplaza el colector, a velocidad constante, va disminuyendo la sección S_2 y va aumentando S_1 (fig. 6.3B), siendo necesario que i_2 disminuya e i_1 aumente en las mismas proporciones para que la densidad de corriente J_2 sea constante e igual a J_1.

Si se cumple en todo momento que $J_1 = J_2 =$ constante, al final de la conmutación el valor de i_2 será mínimo y no dará lugar a la producción de chispas.

6.3.2 *Diagramas de las variaciones de corrientes en la conmutación*

En la figura 6.7 se representa un diagrama de la variación de corrientes durante el período de conmutación. La figura 6.7A indica la corriente que llega a la delga 1 (i_1), en el eje de ordenadas y, en el eje de abscisas (x_1), el tiempo de conmutación ($0 \rightarrow T$). En la figura 6.7B, el eje de ordenadas (y_2) está invertido y corresponde a la corriente i_2 que llega a la delga 2, mientras que el tiempo se representa por el eje de abscisas (x_2). En la figura 6.7C se han superpuesto los diagramas anteriores y corresponde al diagrama general de la conmutación; en el instante (t_a) se indica sobre el diagrama la distribución de corrientes (i_1, i_2, i).

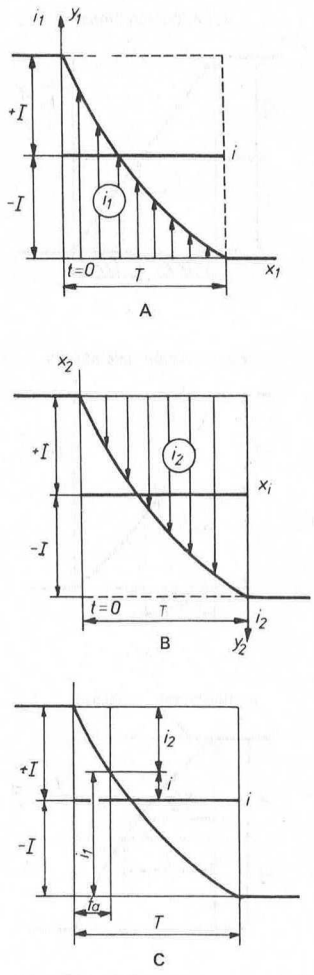


Fig. 6.7 Diagrama general de la conmutación: A, *diagrama parcial de* i_1; B, *diagrama parcial de* i_2; C, *diagrama conjunto de* i_1, i_2, i.

6.3.3 *Conmutación lineal*

Para que se mantenga la proporcionalidad entre las corrientes i_1 e i_2 con sus secciones respectivas S_1 y S_2, es necesario que la curva de conmutación se convierta en una línea recta:

$$J_1 = \frac{i_1}{S_1} = K_1; \qquad \boxed{i_1 = K_1 \cdot S_1}$$ Ecuación de la recta

$$J_2 = \frac{i_2}{S_2} = K_2; \qquad \boxed{i_2 = K_2 \cdot S_2}$$ Ecuación de la recta

en donde K_1 y K_2 son constantes.

En definitiva, pues, la conmutación *ideal* es la *lineal* (fig. 6.8A) y la inversión de corriente en la bobina (i) se produce para $T/2$.

Si en una conmutación se produce la inversión de la corriente (i) antes de $T/2$, será *adelantada* (fig. 6.8B), mientras que, si tiene lugar después de $T/2$, será *retrasada* (fig. 6.8C).

Una vez conocidos los diferentes tipos de conmutación y las ventajas que ofrece la *conmutación lineal,* es lógico pensar que las casas constructoras de



Fig. 6.8 Conmutaciones posibles: A, *lineal;* B, *adelantada;* C, *retrasada.*

máquinas de c. c. tenderán a conseguirla, para evitarse los enormes problemas de una mala conmutación.

6.4 Conmutación sobre la línea neutra

Si fuera posible que la f. e. m. inducida e y la f. e. m. de autoinducción e_a fuesen nulas en la zona neutra, la ecuación general de la conmutación quedaría:

$$[i \cdot (X + 2\,r)] + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1) = 0$$

Como, además, el valor de las resistencias de las conexiones ($2\,r$) es muy pequeño y lo mismo sucede con la resistencia de la bobina (X), puede simplificarse la ecuación anterior en la siguiente:

$$(i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1) = 0$$

$$\boxed{i_2 \cdot R_2 = i_1 \cdot R_1}$$

Teniendo en cuenta las densidades de corriente (J):

$$i_1 = J_1 \cdot S_1; \qquad i_2 = J_2 \cdot S_2$$

$$J_2 \cdot S_2 \cdot R_2 = J_1 \cdot S_1 \cdot R_1$$

A su vez:

$$R_1 = \frac{\rho_0}{S_1} \quad \text{y} \quad R_2 = \frac{\rho_0}{S_2}$$

en donde:

ρ_0 = resistencia específica de contacto

Al sustituir:

$$J_2 \cdot S_2 \cdot \frac{\rho_0}{S_2} = J_1 \cdot S_1 \cdot \frac{\rho_0}{S_1}$$

Queda, finalmente:

$$\boxed{J_2 = J_1}$$

que responde a la condición de conmutación ideal o *lineal.*

6.4.1 *Imposibilidad de lograr la conmutación lineal sobre la línea neutra*

Sin embargo, en la línea neutra, *nunca es nula la* e_a, por tener la bobina una inductancia (L) y haber inversión de corriente ($-$I a $+$I) en un tiempo muy pequeño ($T \approx 0{,}001$ s).

Por otra parte, la f. e. m. inducida por la existencia de un flujo transversal (e) tampoco es nula y se suma a la de autoinducción.

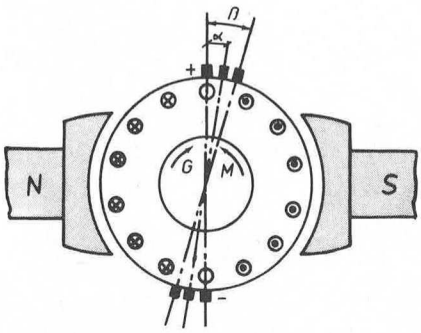


Fig. 6.9 Conmutación con las escobillas desviadas.

6.4.2 *Resumen sobre la conmutación en la línea neutra*

En la línea neutra nunca será perfecta la conmutación, y puede admitirse como válida cuando la $e_a \leqslant 1$ V. Normalmente, la conmutación es *retrasada,* por causa de la e_a, que retarda la inversión de la corriente (i) en la bobina.

6.5 Conmutación con las escobillas decaladas

En el estudio de la reacción del inducido se vio la necesidad de desviar las escobillas un ángulo α, sobre la línea neutra (apartado 5.6.3), como indica la figura 6.9.

Si se desvían las escobillas el mismo ángulo α, desaparecerá la f. e. m. inducida e, por no haber flujo transversal en esa zona y, por tanto, *mejorará la*

conmutación, ya que, según la ecuación general de la conmutación, lo ideal es que $J_1 = J_2$, y para ello deben ser nulas las ff. ee. mm. e_a y e.

Si se desvían las escobillas un ángulo β mayor que α, la f. e. m. e existirá de nuevo, pero con signo opuesto, por haberse inducido en un campo magnético opuesto y, por ello, será de sentido contrario a e_a, pudiendo encontrarse una posición tal que $-e = e_a$ y, por tanto:

$$\boxed{-e + e_a = 0}$$

6.5.1 *Conmutación sin chispas*

Desviando las escobillas un ángulo β, superior al decalaje por reacción del inducido (α), se puede conseguir la conmutación ideal y, por consiguiente, evitar las chispas en el colector.

El sentido de desviación de las escobillas coincide con el de giro en el generador y opuesto al de giro en el motor.

6.5.2 *Inconvenientes del decalaje de escobillas en la conmutación*

La modificación de las escobillas en un ángulo β, sobre la línea neutra, trae consigo los siguientes problemas:

1.º Disminución de la f. e. m. útil que produce la máquina.

2.º No ser constante la e_a durante todo el período de conmutación y, por ello, no hay ninguna posición en que la f. e. m. e neutralice a la e_a.

3.º Gran variación de la e_a con la carga, puesto que en valor absoluto es $e_a = \frac{2 \cdot I}{T}$, de forma que cuando varíe la carga, habrá de *modificarse la posición* de las escobillas para compensar las ff. ee. mm.

Esta solución es prácticamente imposible de realizar; como último recurso, se situarían las escobillas en un lugar fijo para cualquier carga, siempre que la e_a no fuera superior a unos 2 V.

6.6 Conmutación real, cubriendo una escobilla varias delgas

En la práctica, cada escobilla cubre de 2 a 3 delgas del colector, siendo necesario que cumpla idénticas condiciones que para 1 sola delga; por tanto, se tenderá a la conmutación lineal.

6.6.1 *Diagrama de la conmutación*

En la figura 6.10 se representan varias bobinas (X_1, X_2, X_3, X_4) que conmutan a la vez, debido a que la escobilla (E) cubre algo más de 3 delgas. Se ha supuesto que el inducido dispone de 24 delgas.

En un instante cualquiera, como el de la figura 6.10A, comienza la conmutación en la bobina X_1, cumpliéndose que:

$$i_1 = 0$$

$$i_2 = ix_1 - ix_2 = I - ix_2$$

$$i_3 = ix_2 - ix_3$$

$$i_4 = ix_3 - ix_4$$

$$i_5 = ix_4 + I$$

en donde:

I = corriente que circula por una rama del devanado inducido

Al sumar las corrientes:

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 = I - ix_2 + ix_2 - ix_3 + ix_3 - ix_4 + ix_4 + I = 2 \cdot I$$

$$\boxed{\Sigma\, i = 2 \cdot I}$$

De forma que por la escobilla saldrá la corriente $2 \cdot I$, como sucedía en los casos anteriores.

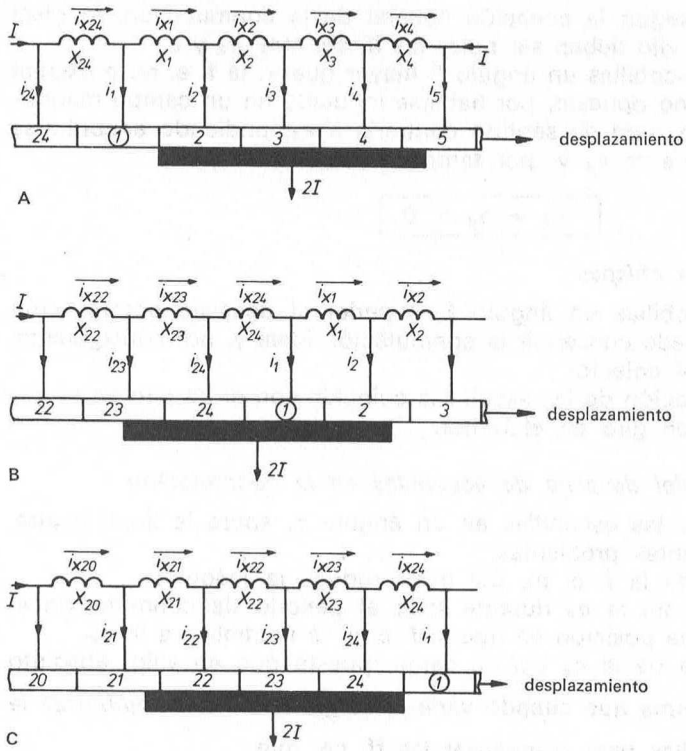


Fig. 6.10 Conmutación cuando la escobilla cubre varias delgas: A, instante inicial de conmutar la bobina X_1; B, instante intermedio de conmutar X_1; C, instante final de conmutar X_1.

6.6.2 *Gráfico de la variación de corriente en las bobinas que conmutan*

Para representar las variaciones de corriente en las bobinas que realizan la conmutación, es suficiente conocer la curva de una de ellas, puesto que, si el inducido está bien construido, las restantes serán simétricas, sólo que desfasadas un tiempo $\frac{T}{k}$, siendo k el número de delgas cubiertas por la escobilla y T el período de conmutación.

La conmutación en la bobina (X_1) comenzará en el instante t = 0, que corresponde al esquema de la figura 6.10A, y finalizará transcurrido un período de tiempo (T), con la posición de la figura 6.10C. Durante este tiempo se habrá producido la inversión de la corriente (i_{X_1}), ya que se ha supuesto lineal, viniendo representada en la figura 6.11.

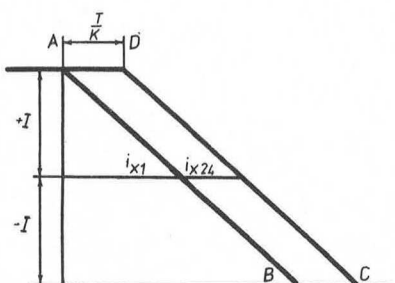


Fig. 6.11 Variación de la corriente en las bobinas X_1 y X_{24}.

Al cabo de un tiempo $\frac{T}{k}$, comenzará la conmutación en la bobina (X_{24}), y la variación en la corriente ($i_{X_{24}}$), que también responderá a una línea recta (fig. 6.11). El proceso se repite $\left(\text{transcurrido } \frac{T}{k}\right)$, con la bobina ($X_{23}$), posteriormente con ($X_{22}$), con ($X_{21}$), etc.

6.6.3 *Estudio de la corriente que llega a una delga*

A una delga cualquiera (1) le llega la corriente (i_1), que, según se deduce de la figura 6.10A y una vez comenzada la conmutación, valdrá:

$$i_1 = i_{X_1} - i_{X_{24}}$$

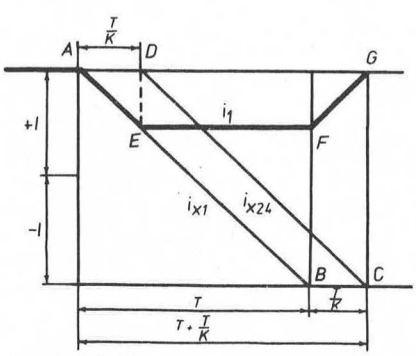


Fig. 6.12 Variación de la corriente (i_1) que llega a una delga (1).

Al restar las variaciones lineales (i_{X_1}, $i_{X_{24}}$) de la figura 6.11, representadas por (*AB*, *DC*), se obtendrá la variación de corriente (i_1) correspondiente a la delga 1, que se representa por *AEFG* (fig. 6.12).

Según la figura 6.12, el tiempo que tarda en pasar la escobilla por la delga 1 es $\left(T + \frac{T}{k}\right)$.

Examinando la corriente (i_1), representada por *AEFG*, se comprueba que:

1.º El trozo *AE* corresponde al principio de la conmutación, cuando la superficie de contacto entre la delga 1 y la escobilla va aumentando propor-

cionalmente, al igual que la corriente (i_1), de tal forma que la densidad de corriente $\left(J_1 = \frac{i_1}{S_1}\right)$ se mantiene constante.

2.º El trozo *EF* corresponde a un tiempo intermedio (fig. 6.10B), con la delga cubierta por la escobilla y, por tanto, se cumple que:

$$J_1 = \frac{i_1}{S_1} = \text{cte.}$$

3.º El trozo *FG* pertenece al final de la conmutación y sucede igual en el caso primero.

6.6.3.1 *Estudio de la conmutación cuando una escobilla cubre varias delgas o cuando sólo cubre una*

Analizando el comportamiento de las variaciones de corrientes en la conmutación, cuando la escobilla cubre varias delgas, se observa que responde a las mismas normas de conmutación que cuando el ancho de la escobilla cubre una delga y, por ello, habrán de buscarse métodos que eliminen las ff. ee. mm. inducida *e* y de autoinducción e_a.

6.7 Normas aconsejables para mejorar la conmutación

Puesto que en la máquina intervienen los aspectos *mecánico* y *eléctrico*, habrán de tenerse en cuenta ambos a la hora de construirla o repararla.

6.7.1 *Normas para evitar las causas mecánicas de las chispas*

En general, las causas mecánicas de producción de chispas se deben a un *mal contacto* entre el colector y las escobillas, pudiendo estar los defectos en el portaescobillas, el colector, las partes giratorias, etc.

Las principales normas para mejorar la conmutación son:

— Corregir la excentricidad del colector y, en general, del eje.
— Equilibrar las partes giratorias.
— Tornear el colector para que todas las delgas queden a la misma altura.
— Rebajar las micas aislantes que sobresalgan.
— Fijar en la posición correcta el portaescobillas.
— Adaptar la forma de la escobilla al colector, etc.

6.7.2 *Condiciones eléctricas que debe reunir una buena conmutación*

Al estudiar la ecuación general de la conmutación

$$e_a + e = [i \cdot (X + 2\,r)] + (i_2 \cdot R_2) - (i_1 \cdot R_1)$$

se comprobó que para lograr una buena conmutación (lineal), era necesario reducir las ff. ee. mm. e_a y *e* y aumentar la resistencia del circuito que conmuta.

6.7.2.1 *Reducción de la f. e. m. de autoinducción*

El valor absoluto de e_a, durante el período *T* de conmutación, es:

$$e_a = L \cdot \frac{2 \cdot I}{T}$$

La disminución de e_a se conseguía:

1.º Eligiendo un devanado en el que hay pocas espiras por sección y gran número de delgas, con objeto de que la inductancia (*L*) sea mínima ($L = K \cdot n^2$; en donde n = n.º de espiras).

2.º Evitando corrientes por ramas elevadas, buscando para ello el devanado más apropiado.

3.º Evitando velocidades muy rápidas, porque el tiempo (*T*) sería muy pequeño.

6.7.2.2 *Reducción de la f. e. m. inducida*

La f. e. m. inducida *e* depende del flujo transversal que pueda existir en la zona neutra; por tanto, el sistema de reducirlo será hacer *desaparecer o dis-*

minuir dicho flujo. Ya se ha tratado la posibilidad de buscar una posición para realizar la conmutación en la que no exista dicho flujo, que era desviando las escobillas un ángulo α.

6.7.2.3 *Aumento de la resistencia en el circuito que conmuta*

En la resistencia del circuito sometido a conmutación, el valor más destacable corresponde a las escobillas, por lo que será muy importante saber elegir la escobilla apropiada en cada caso. Dentro de los diferentes grados de escobillas, las duras de carbón-grafito tienen la mayor resistencia específica de contacto.

Los fenómenos de contacto entre el colector y las escobillas constituyen un tema muy complejo sobre el que se han formulado varias hipótesis.

6.8 Medios utilizados para lograr una buena conmutación

El método más eficaz y más utilizado para conseguir una buena conmutación a cualquier carga, es el empleo de *polos de conmutación,* llamados también *polos auxiliares.* También, en algunos casos, se utilizan los *devanados de compensación.*

6.8.1 *Polos auxiliares de conmutación*

Son los polos magnéticos suplementarios provistos de devanados y destinados a mejorar la conmutación.

Devanado de conmutación. Es el destinado a la neutralización de las ff. ee. mm. puestas en juego en los conductores de conmutación.

Los polos de conmutación se sitúan entre los polos principales, coincidiendo con la línea neutra, y la anchura de su expansión polar debe ser aproximada a la anchura de la zona de conmutación (fig. 6.13). El número de polos de conmutación es igual al de polos principales; sólo en el caso de máquinas de poca potencia puede disminuirse a la mitad.

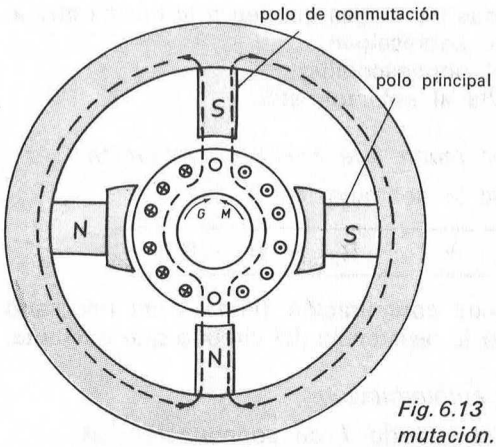


Fig. 6.13 Polos de conmutación.

6.8.1.1 *Misión de los polos de conmutación*

Puede resumirse en dos:

a) Crear un flujo que anule al *flujo transversal* (fig. 6.14), para que así sea nula la f. e. m. *e.* En la figura 6.15 se indican los sentidos del flujo transversal y de los polos de conmutación, correspondientes a un generador (fig. 6.15A) y a un motor (fig. 6.15B).

b) Crear un pequeño flujo para inducir, en la bobina que conmuta, una f. e. m. *igual y opuesta a la f. e. m. de autoinducción* e_a.

6.8.1.2 *Conexionado del devanado de conmutación*

La conexión del devanado de conmutación ha de hacerse en serie con el inducido (fig. 6.16) para que, en caso de variación de la carga, afecte por igual a los polos de conmutación y a las ff. ee. mm. (e y e_a), por ser éstas variables con las cargas.

En el caso de generadores, el polo auxiliar ha de ser de la misma polaridad que el polo principal que le sigue en el sentido de giro. En motores, la polaridad del polo auxiliar ha de coincidir con la del polo principal que le antecede, en el mismo sentido de giro (fig. 6.17).

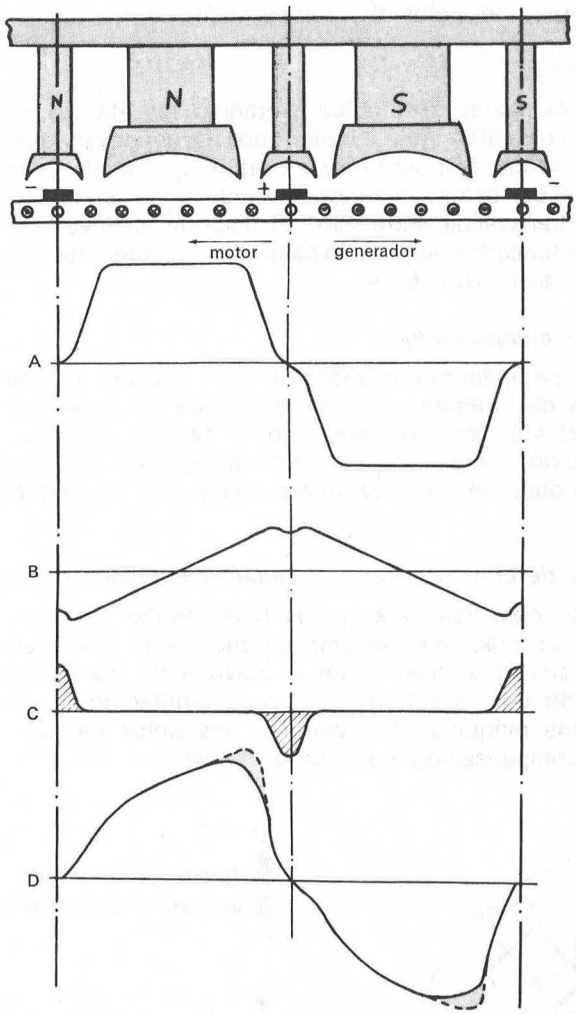


Fig. 6.14 Distribución de los campos magnéticos: A, *curva de campo de excitación;* B, *curva de campo transversal;* C, *curva de campo de los polos de conmutación;* D, *curva resultane del flujo en el inducido.*

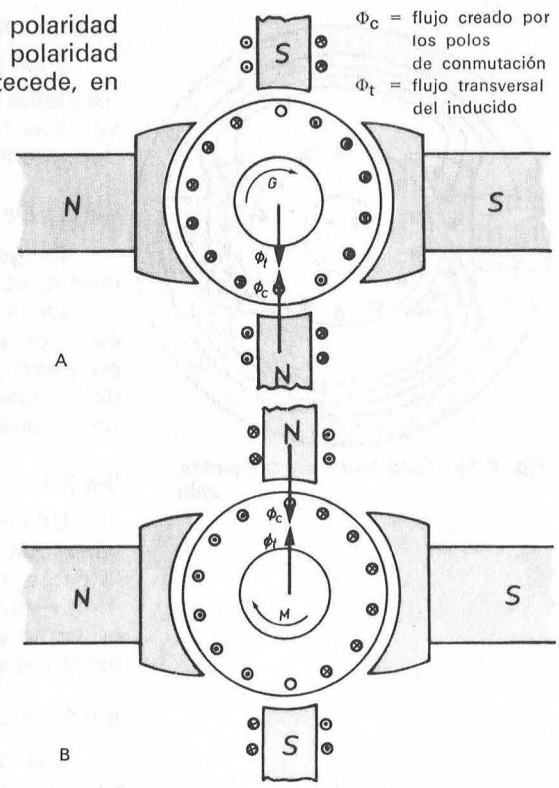
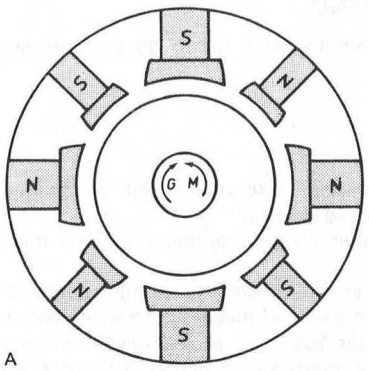


Fig. 6.15 Sentido de los campos magnéticos de los polos de conmutación y de reacción de inducido: A, *generador;* B, *motor.*



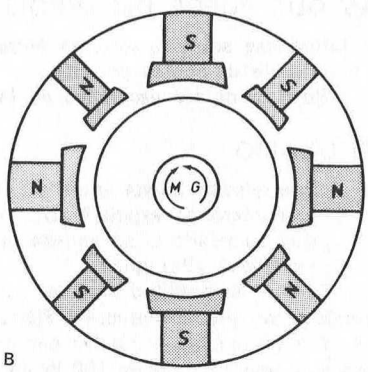


Fig. 6.17 Polaridad de los polos de conmutación: A, *giro del generador en sentido horario y del motor antihorario;* B, *giro del generador en sentido antihorario y del motor horario.*

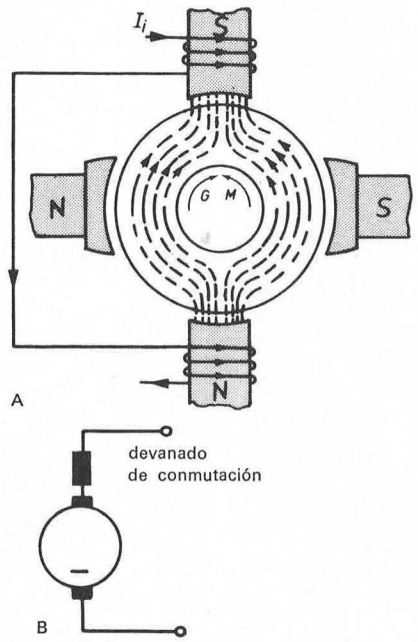


Fig. 6.16 Conexión del devanado de conmutación: A, *máquina bipolar;* B, *esquema simplificado.*

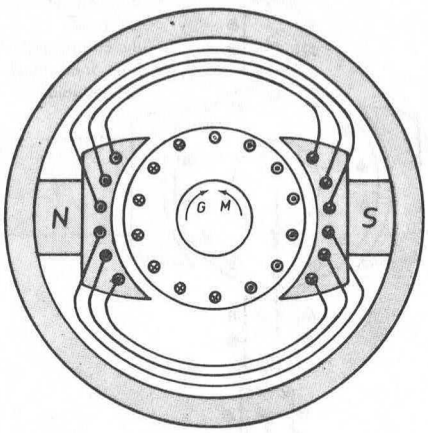


Fig. 6.18 Devanados de compensación.

6.8.1.3 *Resumen del uso de polos de conmutación*

Con el empleo de polos auxiliares de conmutación, se evita el *decalar* las escobillas y se consigue una buena conmutación a cualquier carga. Las citadas ventajas han motivado que, en la actualidad, todas las máquinas (excepto las de potencias reducidas) dispongan de polos de conmutación.

6.8.2 *Devanados de compensación*

En general, son devanados auxiliares destinados a atenuar los efectos de ciertas acciones debidas a las corrientes que circulan por otros devanados.

La misión específica del devanado compensador en las máquinas de c. c. es la de *eliminar las distorsiones* del campo magnético *frente a los polos inductores* originados por el flujo transversal. Para ello, se dispone el devanado de compensación en ranuras practicadas en las expansiones polares de los polos principales y en dirección axial (fig. 6.18).

6.8.2.1 *Conexión del devanado compensador*

Como la distorsión viene producida por la reacción del inducido y ésta varía con la carga, el devanado de compensación se conectará *en serie* con la carga, neutralizando así la distorsión en cada momento. El sentido de la corriente que circule por el devanado compensador ha de ser opuesto al de la corriente del inducido en los conductores situados frente a él y, así, se neutralizarán los efectos.

6.8.3 *Aplicaciones de los polos de conmutación y devanados compensadores*

Los dos sistemas de conmutación descritos (polos o devanado compensador) solamente se colocan en las máquinas de gran potencia, alta velocidad o elevada tensión entre delgas, siendo suficiente, en la mayoría de los casos, colocar los polos de conmutación para lograr una buena conmutación.

La figura 6.19 representa una máquina tetrapolar con los polos de conmutación y los devanados de compensación conectados en serie.

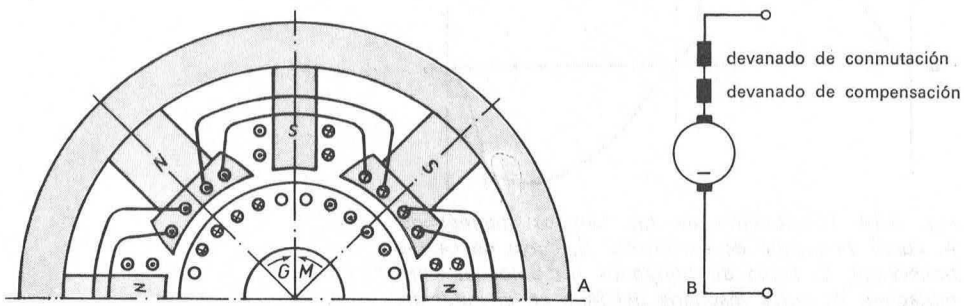


Fig. 6.19 Máquina de c. c.: A, *máquina tetrapolar con polos de conmutación y devanado de compensación;* B, *esquemas de conexiones de los devanados de conmutación y de compensación.*

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Informarse sobre la relación entre calidad de conmutación y grado de chisporroteo según normas de diferentes países.

— Influencia de las escobillas en la conmutación.

CUESTIONARIO

6.1 ¿Qué relación existe entre la f. e. m. de autoinducción que aparece en una bobina toroidal y su número de espiras? ¿De qué otros términos depende?

6.2 ¿Qué sucedería si se abriese un circuito inductivo de gran potencia con su interruptor de cuchillas? ¿Por qué?

6.3 Explicar la similitud entre el volante de inercia en mecánica y la energía potencial almacenada en un circuito inductivo. Ejemplos de utilización del símil mecánico en electricidad.

6.4 Por un circuito inductivo circula una corriente de 100 A y, al producirse la apertura, se pierde una potencia de 100 W en los contactos del interruptor. Calcular la inductancia de la bobina si el tiempo de apertura ha sido de 1/50 de segundo.

6.5 Calcular la potencia disipada, en forma de chispa, en el ejercicio anterior, si la apertura del circuito se produce en 0,1 segundos.

6.6 Comparando los resultados de los ejercicios 4 y 5, razonar sobre la importancia del tiempo de apertura en un circuito inductivo.

6.7 ¿Qué forma presentaría la curva de variación de la corriente en la bobina que conmuta si, en el intervalo entre 3/4 T y T, fuese elevada la corriente que llega a la delga que abandona la escobilla? ¿Y si fuese la corriente muy pequeña?

6.8 Un motor de c. c. gira a 2 000 r. p. m. y posteriormente a 1 500 r. p. m.; suponiendo que en ambos casos consuma la misma corriente de la red, ¿a qué velocidad se realizará mejor la conmutación? El motor carece de dispositivos destinados a mejorar la conmutación.

6.9 En una dinamo se han desviado las escobillas de la línea neutra, hasta eliminarse las chispas; ¿responderá la máquina a la ecuación general de la conmutación en esa nueva posición? ¿Qué sucederá si se desconectan parte de los receptores alimentados por la dínamo?

6.10 En una máquina de c. c., el período de conmutación es de 0,003 s y el tiempo que tarda una bobina en pasar de escobilla positiva a negativa es 10 veces mayor. Construir el gráfico de la variación de la corriente en dicha bobina, si la corriente por rama del inducido es de 200 A.

6.11 Averiguar el coeficiente de autoinducción de una sección de bobinado que conmuta en 0,001 s, al suministrar una corriente al exterior de 600 A. La f. e. m. de autoinducción es de 6 V y el devanado inducido tiene dos ramas en derivación.

6.12 ¿Qué inconvenientes presenta la saturación de los polos de conmutación en la conmutación?

6.13 ¿Cuál es el efecto de los polos de conmutación frente al campo magnético producido por los polos al conmutar sobre la línea neutra?

6.14 Explicar gráficamente el proceso de neutralización entre el flujo de reacción de inducido y el originado por el devanado compensador.

6.15 Un motor de c. c. gira a 300 r. p. m. y dispone de un colector de 60 cm de diámetro; la anchura de la escobilla es de 1,5 cm. ¿Cuál será su período de conmutación?

BIBLIOGRAFIA

ALFARO E., *Curso de Electricidad,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.

NIARD J., *Curso de Electricidad I,* Toray-Masson, S. A., Barcelona 1971.

MORILLO J., *Curso de Electricidad I,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.

KOSTENKO M., *Máquinas eléctricas I,* Montaner y Simón, S. A., Barcelona 1968.

Norma UNE 21 302 h4.

Tema 7

Aspectos de la construcción de las máquinas eléctricas de corriente continua

OBJETIVOS

— Identificar los materiales utilizados en la construcción de las máquinas eléctricas.

— Describir las principales características necesarias en los materiales magnéticos.

— Citar los tipos de conductores eléctricos utilizados en dínamos y motores de corriente continua.

— Clasificar y comparar los aislantes según la clasificación hecha por la C.E.I.

— Distinguir los elementos estructurales de una máquina de corriente continua.

— Razonar la importancia de una eficaz ventilación en el funcionamiento de una máquina eléctrica.

— Relacionar los factores: aislamiento, ventilación y lugar de emplazamiento de una máquina, con su posterior funcionamiento.

GUION

— Productos siderúrgicos.
— Materiales conductores eléctricos.
— Materiales aislantes.
— Elementos estructurales de una máquina de corriente continua.
— Elementos eléctricos y mecánicos del estator.
— Elementos eléctricos y mecánicos del inducido (rotor).
— Condiciones de funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente continua.

PUNTOS CLAVE

— Enumerar los materiales utilizados en la construcción de generadores y motores de corriente continua.

— Sintetizar los elementos que intervienen en la construcción de una máquina de corriente continua.

— Valorar la importancia que en una máquina tienen su aislamiento, ventilación y lugar de utilización.

EXPOSICION DEL TEMA

Antes de describir la disposición constructiva de la máquina de c. c., se ha creído conveniente presentar un estudio resumido sobre los principales materiales que serán utilizados en la fabricación de los elementos estructurales que constituyen dicha máquina.

La clasificación general de los materiales es:

a) Productos siderúrgicos.
b) Materiales conductores eléctricos.
c) Materiales aislantes.

7.1 Productos siderúrgicos

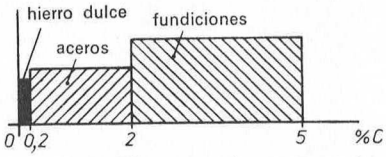


Fig. 7.1 Diagrama de compuestos hierro-carbono.

Se denominan productos siderúrgicos las sustancias férreas que han sufrido un proceso metalúrgico de elaboración; se distinguen:

— el hierro,
— las aleaciones de hierro con carbono, a saber, acero y fundición,
— las ferroaleaciones o aleaciones con otros elementos y sin carbono.

7.1.1 *El hierro*

Es el elemento químico de este nombre, así como los productos siderúrgicos de los que, solamente con carácter de impureza, pueden formar parte otros elementos.

El *hierro puro* no tiene demasiado uso, debido principalmente a su elevado coste. El hierro ARMCO, de pureza 99,90 %, tiene aplicación en electricidad para fabricación de *armaduras,* debido a su gran permeabilidad.

La enorme importancia industrial adquirida por el hierro, se debe a las ventajosas características que presenta al alearse con el carbono.

Según el porcentaje de carbono que se añada al hierro, se formarán los siguientes compuestos (fig. 7.1):

a) *Hierro dulce,* o forjado, desde 0 a 0,2 % de carbono. Se obtiene en estado pastoso.
b) *Acero,* desde el 0,2 al 2 % de carbono.
c) *Fundiciones,* desde el 2 al 5 % de carbono.

7.1.2 *Acero*

Es una aleación de hierro y carbono, en la cual la proporción de este elemento es menor que en la fundición. En el acero no se encuentra libre el carbono, sino combinado completamente; también puede contener otros elementos además del carbono.

Generalmente, se consideran aceros las aleaciones de hierro y carbono que contienen menos de 1,7 % de carbono (fig. 7.2), aunque de ordinario no pase del 1 %. En ciertos aceros especiales puede llegar a alcanzar el 2 %.

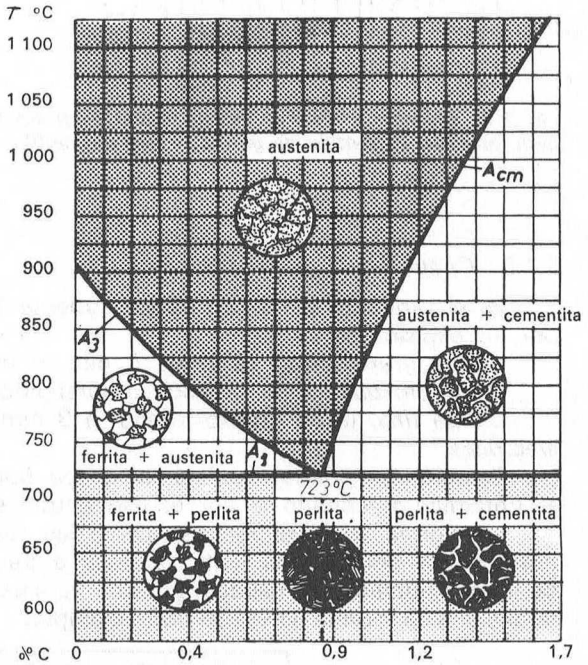


Fig. 7.2 Diagrama hierro-carbono (zona de aceros).

7.1.2.1 *Clasificación*

Según el *porcentaje de carbono* se subdividen en:

— Aceros extrasuaves (0,1 a 0,2 % de C).
— Aceros suaves (0,2 a 0,3 % de C).
— Aceros semisuaves (0,3 a 0,4 % de C).
— Aceros semiduros (0,4 a 0,5 % de C).
— Aceros duros (0,5 a 0,6 % de C).
— Aceros extraduros (0,6 a 0,7 % de C).

Según el *número de elementos de aleación* a que se unan (aceros aleados), pueden ser binarios, terciarios, etc.; estos elementos son: silicio, azufre, manganeso, cromo, cobalto, etc.

Según *sus aplicaciones,* el Instituto del Hierro y del Acero los clasifica en los siguientes grupos:

F-100 aceros finos de construcción general.
F-200 aceros finos para usos especiales.
F-300 aceros finos resistentes a la oxidación y a la corrosión.
F-500 aceros para herramientas.
F-600 aceros comunes.
F-700 aceros para moldear.

La letra *F* quiere decir producto férreo.

La característica fundamental del acero es la facilidad con que puede *variar sus características* al someterlo a diversos tratamientos térmicos.

7.1.2.2 *Formas comerciales*

Los aceros se suelen presentar en el comercio en forma de perfiles laminados, o sea, en forma de barras de secciones diversas, llamados *productos acabados.*

Se obtienen al hacer pasar, entre dos rodillos acanalados que giran, un lingote de acero calentado al rojo. Los rodillos comprimen el material dándole la forma deseada (fig. 7.3). Esta operación se llama *laminado en caliente.*

Entre los productos acabados, destacan: la chapa, el plano ancho, el perfil, las vigas, etc.

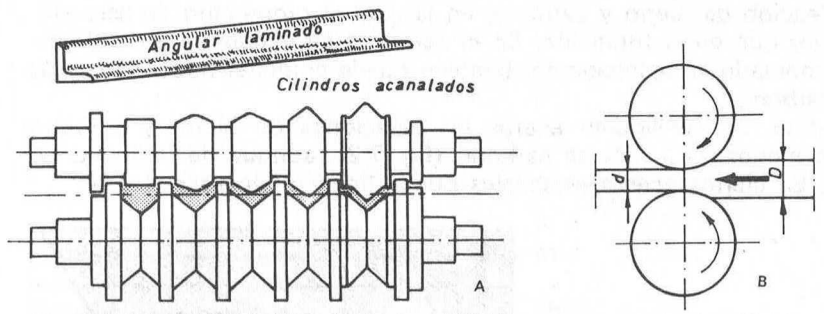


Fig. 7.3 Esquema de un tren de laminación: A, *pasos para la laminación de un perfil angular;* B, *sentido de giro y avance del perfil.*

7.1.3 *Chapa*

Es el producto plano de ancho superior a 600 mm. La chapa se clasifica por su espesor en:

Chapa gruesa, que es la de 6 mm, o más, de grueso.
Chapa media, la de grueso comprendido entre 3 mm y 6 mm.
Chapa fina, la de grueso inferior a 3 mm. Es la utilizada en las *máquinas eléctricas.*

También se puede clasificar la chapa por el revestimiento superficial, por el tratamiento recibido o por el uso a que se destina.

La Norma UNE 36 086 especifica las clases de chapa fina, así como su designación normalizada. Esta se hace a través de la palabra *chapa* seguida de letra y números de calidad, letra de su estado y acabado superficial, y la referencia a la norma UNE 36 086. Ejemplo:

Chapa AO2 XM UNE 36 086

7.1.3.1 *Chapa para dínamos*

Pertenecen al grupo de *aleaciones ferromagnéticas* y se caracterizan por su gran permeabilidad y ciclo de histéresis estrecho. Los componentes de la chapa son hierro y silicio (Fe-Si). Los tipos de chapa varían según su contenido de silicio, llegando éste al 2,5 %.

El silicio mejora las propiedades magnéticas del hierro pero, a partir del 2 %, disminuye su ductilidad y lo convierte en quebradizo.

El silicio evita la *fatiga magnética* (envejecimiento), que se produce a partir de los 50 °C, y va acompañada de un aumento de pérdidas por histéresis y una disminución de la permeabilidad.

Las pérdidas magnéticas específicas se indican en W/kg de chapa, para una inducción de 1 ó 1,5 T siendo, por término medio, alrededor de 2,5 W/kg a 1 T. El espesor de las chapas es de 0,5 mm.

7.1.4 *Fundiciones*

Se llama *fundiciones* a las aleaciones de hierro y carbono que contienen del 2 al 5 % de carbono. Además, pueden contener otros elementos. Sin embargo, no es la cantidad de carbono lo que caracteriza las fundiciones, sino la forma en que éste se encuentra.

La propiedad más importante de las fundiciones es ser fácilmente fusibles, hasta el punto de poder obtenerse piezas, a veces sumamente complicadas, por medio de moldes.

7.1.4.1 *Clasificación de las fundiciones*

Según el proceso de elaboración, las principales fundiciones son:

— *De primera fusión o arrabio,* que es tal como sale de los hornos altos (fig. 7.4) donde se obtiene. Se suele emplear para refundir o para fabricar acero.

— *De segunda fusión o fundición gris,* que se obtiene fundiendo de nuevo el lingote de primera fusión, generalmente en un horno llamado cubilote. Tiene numerosas aplicaciones y, entre ellas, puede citarse la fabricación de carcasas de máquinas eléctricas.

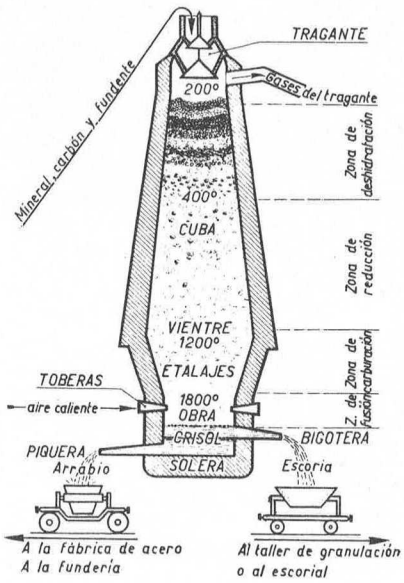


Fig. 7.4 Esquema de un horno alto.

7.1.5 *Aplicaciones de los productos siderúrgicos a la construcción de máquinas eléctricas*

Los productos siderúrgicos citados se destinan a la fabricación de elementos estructurales destinados a soportar esfuerzos mecánicos y a transmitir la energía, así como en los circuitos magnéticos destinados a la producción del campo magnético. Así, serían el acero al carbono o aleado, para la construcción del eje y cojinetes; la chapa magnética, para el inducido; el acero fundido, para la carcasa y polos; etc.

7.2 **Materiales conductores eléctricos**

Entre los más importantes, por su utilización en las máquinas eléctricas, destacan: el cobre, el aluminio, el carbón y las aleaciones.

7.2.1 *El cobre*

Símbolo, Cu; peso específico = 8,9 kg/dm^3; punto de fusión = 1 083 °C; mineral, calcopirita; color, rojo.

Las *propiedades* del cobre son la ductilidad y la maleabilidad; de ahí que pueda forjarse y laminarse en frío y en caliente. Puede ser prensado en caliente y adelgazarse mucho en frío.

En el aspecto eléctrico, es el metal que *mejor conduce el calor y la electricidad,* después de la plata.

Por su gran conductividad eléctrica, se emplea en la fabricación de conductores eléctricos.

7.2.2 *Aluminio*

Símbolo, Al; peso específico = 2,7 kg/dm^3; punto de fusión = 658 °C; mineral, bauxita; color, blanco algo azulado.

El aluminio es un metal blando, muy dúctil y maleable, muy ligero, casi inalterable al aire y buen conductor de la electricidad. No existe en estado libre, pero sí combinado, formando parte de muchos minerales y tierras.

Puede soldarse por varios procedimientos (por soplete de gas, por resistencia eléctrica o por arco voltaico), pero la soldadura del aluminio es difícil por la capa de óxido que se forma.

Por su ligereza se emplea, en forma de aleación, en la construcción de ventiladores para las máquinas eléctricas y actualmente también para fabricación de carcasas de máquinas de poca potencia.

7.2.3 *Carbón*

Es uno de los materiales más adecuados para establecer contactos deslizantes, caracterizándose por su resistencia al aumento de temperaturas y a los agentes químicos, por buena conductividad eléctrica y térmica, etc.

Sus aplicaciones en el campo de las máquinas eléctricas están dirigidas a la fabricación de escobillas.

Los principales tipos de carbones utilizados para la fabricación de *escobillas* son:

— *Carbones duros,* de gran resistencia mecánica, adecuados para velocidades pequeñas.

— *Carbones nobles,* desprovistos de impurezas, aptos para grandes velocidades.

— *Carbones metalo-grafíticos,* que conducen mejor la corriente eléctrica y, por tanto, pueden trabajar a mayor densidad de corriente que las restantes, si bien no son adecuadas para altas velocidades.

7.2.4 *Aleaciones*

Con objeto de modificar las propiedades de los metales, se les une a otros elementos, formando las aleaciones, entre las que se destacan, por su relación con la construcción de máquinas eléctricas, las aleaciones de cobre y las de alta resistividad.

7.2.4.1 *Aleaciones de cobre*

Hay que destacar, por su importancia, los bronces y los latones.

El *bronce* es una aleación de cobre con estaño (Cu-Sn), con una proporción de estaño que llega hasta el 30 %. El bronce fundido se utiliza para cojinetes, soportes, anillos colectores, portaescobillas, engranajes, etc.

El *bronce fosforoso* presenta mayor resistencia mecánica, siendo muy útil para la sujeción del inducido (zunchos), así como en la construcción de soportes de las máquinas.

El *latón* es una aleación de cobre con cinc (Cu-Zn), con un contenido máximo de cinc del 30 %. Es utilizado en elementos de máquinas que no han de estar sometidos a grandes esfuerzos, como portaescobillas, bornas, etc.

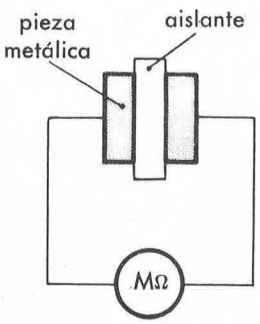


Fig. 7.5 Medición de la resistividad.

7.2.4.2 *Aleaciones de alta resistividad*

Se caracterizan por su gran resistencia eléctrica, coeficiente de temperatura mínimo y posibilidad de funcionar a altas temperaturas, como son:

— *Constantán,* cuya composición es de cobre (54 %), níquel (45 %) y manganeso (1 %), permitiendo temperaturas de hasta 500 °C.

— *Niquelina,* compuesta por cobre (67 %), níquel (30 %) y manganeso (3 %), muy utilizada para construir resistencias empleadas en la regulación de máquinas, soportando temperaturas hasta 500 °C.

— *Manganina,* con el 84 % de cobre, 12 % de manganeso y 4 % de níquel, muy utilizadas en la fabricación de reóstatos.

— *Maillechorts,* con el 60 % de cobre, 15 % de níquel y 25 % de cinc, utilizada para la fabricación de resistencias. Se puede utilizar hasta 400 °C.

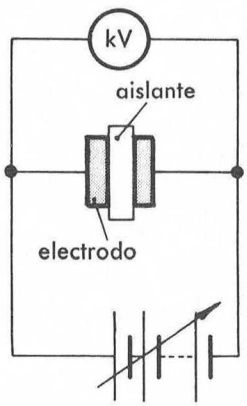


Fig. 7.6 Medición de la rigidez dieléctrica.

7.3 **Materiales aislantes**

Las características necesarias en los aislantes empleados en la construcción de máquinas eléctricas son:

a) *Alta resistividad,* expresada en $\Omega \cdot cm^2/cm$, y medida a través de un óhmetro (fig. 7.5).

b) *Gran rigidez dieléctrica,* expresada en kV/mm, medida a través de un chispómetro (fig. 7.6).

c) *Mínima constante dieléctrica,* para disminuir las pérdidas dieléctricas. Para el aire, k = 1.

d) *Gran resistencia al calor,* para absorber parte del calor que se produce en la máquina por efecto Joule.

La temperatura máxima de utilización de los aislantes, según la C. E. I. (Comisión Electrotécnica Internacional), es la siguiente:

Aislante clase Y (O) hasta 90 °C.
Aislante clase A hasta 105 °C.

Aislante clase E hasta 120 °C.
Aislante clase B hasta 130 °C.
Aislante clase F hasta 155 °C.
Aislante clase H hasta 180 °C.
Aislante clase C por encima de 180 °C.

e) *Gran resistencia a la humedad,* para evitar la pérdida de sus características de aislante.

7.3.1 *Aislantes utilizados en la construcción de máquinas eléctricas*

Atendiendo al estado final del aislante, se clasifican en:

a) gaseosos,
b) líquidos,
c) sólidos.

7.3.1.1 *Aislantes gaseosos* (tabla 7.7)

El aislante ideal es el vacío absoluto y, después, el aire; otros son: hexafluoruro de azufre (SF_6), anhídrido carbónico (CO_2), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), cloro (Cl_2), etc.

En la máquina de c. c. estos aislantes se encuentran en el entrehierro, en la separación entre bobinas, canales para ventilación, etc.

7.3.1.2 *Aislantes líquidos* (tabla 7.7)

Los más utilizados son:

a) *Aceites minerales,* obtenidos a partir del petróleo y utilizados para impregnar los aislantes, refrigeración de transformadores, etc. Presenta los inconvenientes de oxidación y combustibilidad.

b) *Siliconas.* Son materias plásticas termoestables con base de silicio y se utilizan como aislantes sólidos y líquidos, en las formas de *resinas y aceites;* las aplicaciones van dirigidas a la impregnación, impermeabilidad, fabricación de aislantes, etc.

c) *Lacas y resinas.* Aunque en su estado final permanecen sólidos *(barnices),* son muy útiles en aislamiento de alambres, chapa magnética, estator y rotor de motores pequeños; en general, se destinan a la impregnación.

Tabla 7.7 Aislantes líquidos y gaseosos

Material	*Constitución*	*Resistividad* $\Omega \cdot cm$	*Rigidez dieléctr.* kV/mm	*Constante dieléctrica*	*Propiedades*	*Forma comercial*	*Usos*
Aceite mineral	Destilación fraccionada del petróleo	10^{15}	9 – 10	2 – 3		Aceites para impregnación de aislantes; aceites de interruptores y aceite de transformadores	Para interruptores, aislamientos y refrigeración de transformadores; impregnación de telas, papel, etc.
Barnices aislantes	Disolución de resina en un disolvente				Propiedades de las resinas empleadas	Barnices grasos, volátiles, de silicona, etc.	Barnizado de hilo de bobinar, de chapas de transformador
Aire	Fundamentalmente de nitrógeno y oxígeno	Prácticamente infinita	3 – 3,5	1	No tiene pérdidas dieléctricas	—	Aislamiento de conductores, condensadores, interruptores, etc.

7.3.1.3 *Aislantes sólidos*

Se dividen en:

a) *Aislantes minerales* (tabla 7.8), como son *vidrio,* porcelana, *mica* y amianto; sus aplicaciones son como aisladores, soportes, aislamiento en altas temperaturas, *colectores de delgas,* etc.

b) *Aislantes vegetales* (tabla 7.9), entre los que destacan el caucho vulcanizado, papel, cartón, fibra vulcanizada, presspan, algodón, tela barnizada, etc., siendo sus aplicaciones el aislamiento entre conductores, entre bobinas, etc.

c) *Aislamientos plásticos* (tabla 7.10), como son el cloruro de polivinilo (PVC), polietileno, poliestireno, baquelita, mylar, etc., caracterizados por su economía y óptimas propiedades como aislantes, siendo de aplicación al aislamiento entre conductores, espiras, bobinas, elementos de máquinas, etc.

d) *Fibras artificiales inorgánicas,* como la *fibra de vidrio,* obtenida a partir del vidrio fundido.

La fibra de vidrio se caracteriza por ser muy resistente a la rotura (muy adecuada para sujeción de devanados del inducido), incombustible, inatacable por el agua y ácidos, mal conductor del calor y de la electricidad, etc., que hacen de ella un aislante muy utilizado en la actualidad.

Tabla 7.8 Aislantes minerales

Material	*Constitución*	*Resistividad* $\Omega \cdot cm$	*Rigidez dieléctrica kV/mm*	*Constante dieléctrica*	*Temperatura utilizac.*	*Propiedades*	*Forma comercial*	*Usos*
Vidrio duro	Sustancia inorgánica fundida, que no cristaliza al enfriar. La materia básica es la sílice: $Si\ O_2$	$10^{12} - 10^{19}$	16 – 45	3 – 9	C	Resiste muy bien la compresión, pero es muy frágil	Piezas moldeadas, tubos, etc.	Como aislador a baja temperatura
Porcelana	Es un compuesto de caolín y feldespato	$10^{14} - 10^{15}$	30 – 35	5 – 8	C	Resiste la compresión; es frágil	Piezas moldeadas	Aisladores y soportes de aparatos de alta tensión
Mica	Es un silicato de potasio y aluminio. Se exfolia fácilmente	10^{16}	30 – 35	5 – 7	C	Blanda	Hojas	Dieléctrico en condensadores; aislantes de resistencias en calefacción
Amianto	Silicato de calcio y magnesio	$2 \cdot 10^{11}$	4,2	1,5 – 2	C	Poco resistente; se conglomera con cemento que aumenta su resistencia mecánica	Tejidos, planchas, hilos	Aislamiento a alta temperatura

Tabla 7.9 Aislantes vegetales

Material	*Constitución*	*Resistividad* $\Omega \cdot cm$	*Rigidez dieléctrica kV/mm*	*Constante dieléctrica*	*Temperatura utiliz.*	*Propiedades*	*Forma comercial*	*Usos*
Caucho vulcanizado	Mezcla de caucho natural con caolín y azufre	$10^{15} - 10^{16}$	15 – 30	3,5 – 5	A	Resiste el alargamiento	Envoltura cables	Aislamiento de conductores
Papel duro	Papel de celulosa tratado con fenol u otras resinas	10^{9}	40	6 – 8	O A impregnado	Buena resistencia a la tracción, compresión y flexión	Planchas, barras, tubos, etc.	Aislamiento de bobinados
Fibra vulcanizada	Papel tratado con lejía o ácido sulfúrico y prensado	10^{8}	5 – 6	—	O A impregnado	Puede trabajarse con arranque de virutas	Placas, rollos, barras...	Listones aislantes, arandelas, ruedas dentadas
Presspan	Papel o cartón fabricado a base de fibras de celulosa casi pura	10^{11}	9 – 11	6 – 7	O A impergnado	Resiste la flexión	Tableros y rollos	Aislamiento de bobinados, condensadores
Algodón	Tejido de fibras de algodón	10^{11}	5 – 10	3 – 4	O A impregnado	Flexible	Hilos, cintas, tela: impregnadas de resina	Aislamiento de conductores

Tabla 7.10 Aislantes plásticos

Material	*Constitución*	*Resistividad* Ω · *cm*	*Rigidez dieléctrica kV/mm*	*Constante dieléctrica*	*Temperatura utiliz.*	*Propiedades*	*Forma comercial*	*Usos*
Cloruro de polivinilo (PVC)	Polimerización del cloruro de vinilo	$10^{12} - 10^{15}$	10 – 40	3,5	○	Elástico, resiste el envejecimiento	Moldeado, tubos	Aislamiento de conductores
Polietileno	Polimerización del etileno	10^{18}	30	2,3	○	Flexible estable	Moldeado, placas, tubos, perfiles	Aislamiento de conductores, piezas aislantes
Poliestireno	El producto base es el etilbenceno	10^{12}	10 – 15	3	○	Puede mecanizarse con arranque de virutas	Cajas, recipientes, etc.	Cajas de distribución, enchufes, casquillos
Baquelita	Condensación del formol con el fenol	10^{10}	8 – 12	5 – 9	F	Se puede mecanizar	Placas, perfiles	Piezas aislantes, cajas...
Mylar	Resina de poliéster	10^{12}	10 – 15	3	○			Dieléctrico de condensadores de bajas pérdidas

7.4 Elementos estructurales de una máquina de corriente continua (fig. 7.11)

Básicamente una máquina de c. c. se compone de dos partes, separadas por el *entrehierro* (apartado 2.8). Estas partes son:

a) *Estator.* Parte fija de una máquina eléctrica.

b) *Rotor.* Parte giratoria de una máquina eléctrica.

En la figura 7.12 se muestra una máquina de c. c. totalmente seccionada, indicándose sus partes fundamentales.

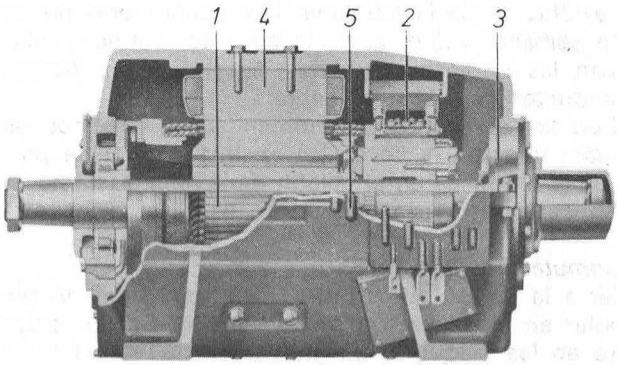


Fig. 7.11 Vista de una máquina de c. c.: 1, inducido; 2, conjunto de escobillas; 3, cojinetes; 4, circuito inductor; 5, carcasa.

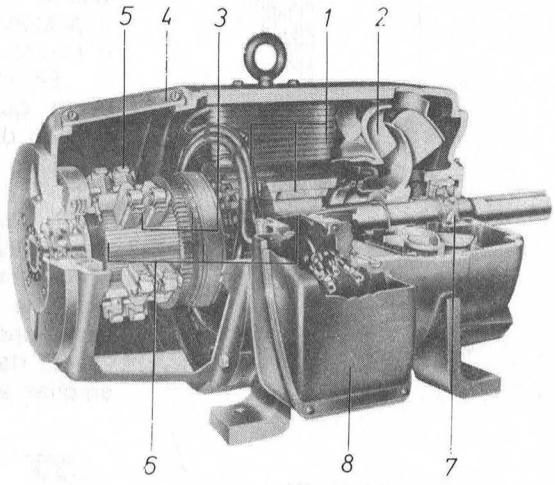


Fig. 7.12 Vista de una máquina de c. c. seccionada: 1, aislamiento; 2, ventilación controlada; 3, colector; 4, soporte lado colector; 5, conjunto de escobillas; 6, inducido; 7, cojinetes; 8, caja de bornas.

7.4.1 *Partes del estator*

El estator consta de las partes siguientes:

— pieza polar;

— polo auxiliar y polo de conmutación. Algunas máquinas carecen de ellos, principalmente las de pequeña potencia;

— armazón (carcasa).

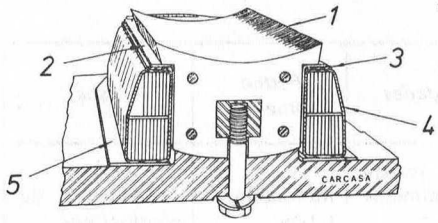


Fig. 7.14 Devanado inductor: 1, núcleo formado por chapas de acero magnético y remachadas bajo fuerte presión; 2, camisas metálicas colocadas en el interior de las bobinas inductoras permiten introducir el núcleo polar en la bobina, sin deterioro de su aislamiento; 3, arandelas de acero situadas entre las bobinas inductoras y las camisas metálicas distribuyen la presión uniformemente y refuerzan la protección de las bobinas; 4, en la fabricación de las bobinas inductoras se emplean materiales de alta calidad de mica y vidrio; 5, arandelas de amianto colocadas entre la parte superior de las bobinas y asientos mecanizados de la carcasa, aseguran una protección adicional a las bobinas.

7.4.2 *Partes del rotor*

El rotor se compone de las siguientes partes:
— núcleo del inducido;
— devanado inducido;
— colector;
— conjunto de escobillas (incluido el portaescobillas).

7.5 Elementos eléctricos y mecánicos del estator

A continuación, se hace una breve descripción de los elementos fundamentales que forman parte del órgano inductor o estator.

7.5.1 *Pieza polar (polo principal)*

Constituida por:

a) Un núcleo (fig. 7.13) de chapas magnéticas de 1 mm de espesor, unidas y fijadas entre sí por medio de pasadores. La parte del núcleo próxima al rotor es de forma ensanchada (expansión polar), con objeto de aprovechar al máximo el circuito magnético inductor.

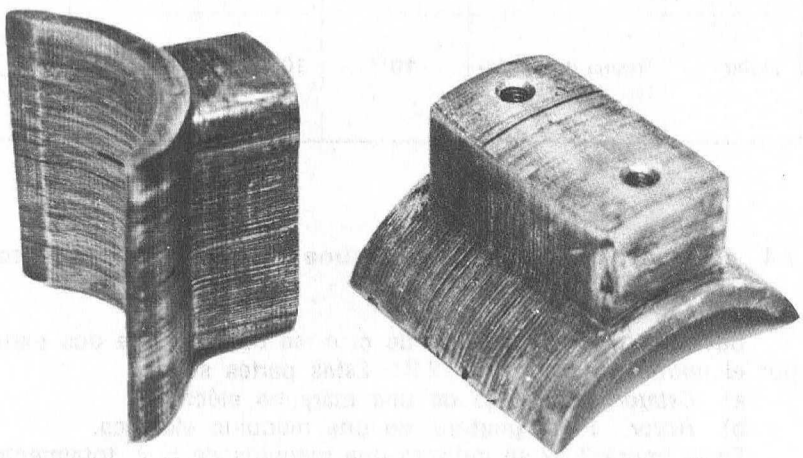


Fig. 7.13 Vistas de polos principales.

La sujeción del núcleo a la carcasa se hace por medio de tornillos.

b) El devanado inductor (fig. 7.14), formado por un conjunto de espiras, que dependerán del tipo de excitación de la máquina. Los conductores de las espiras se aíslan entre sí con esmalte, vidrio, tiras de amianto, barnices, etc., y posteriormente se impregnan las bobinas completas, secándose en hornos o estufas. Como material conductor se utiliza el cobre.

En algunos casos, las bobinas de campo se montan sobre cajetines de acero, que les proporciona gran duración, y llevan un encintado final de protección de vidrio. El polo se aloja entonces en el cajetín de la bobina, sin necesidad de muelles, arandelas o cualquier pieza que pueda soltarse.

7.5.2 *Polo auxiliar o de conmutación* (fig. 7.15)

Su constitución es similar a la de los polos principales; está formado por un núcleo, con expansión polar en el extremo, y un devanado. Se construye con una pieza de acero; pero en las máquinas de gran potencia, sometidas a variaciones bruscas de carga, el núcleo suele formarse con chapa de acero.

El devanado del polo de conmutación está formado por pocas espiras de amplias secciones, puesto que por ellas circula la corriente del inducido.

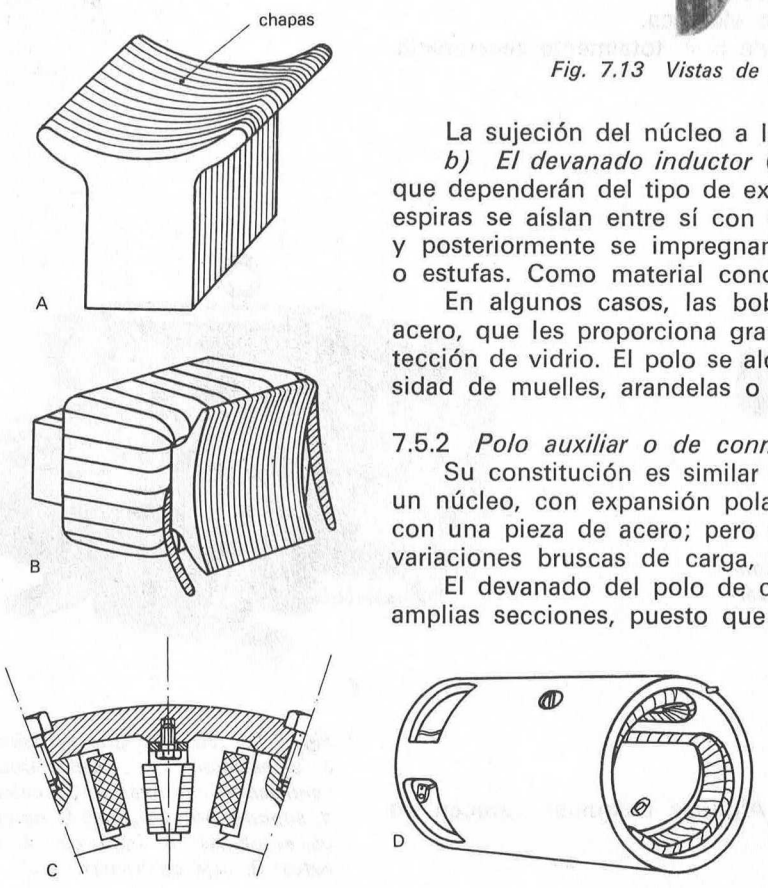


Fig. 7.15 Partes del circuito inductor: A, *núcleo-zapata de polo inductor;* B, *bobina de campo montada en el núcleo polar;* C, *polo auxiliar de conmutación;* D, *inductor sin polos auxiliares.*

7.5.3 *Armazón o carcasa* (fig. 7.16)

Es la pieza o conjunto de piezas que sostienen los órganos de una máquina y forman su esqueleto. Las partes que constituyen el armazón son: *culata* y *soportes.*

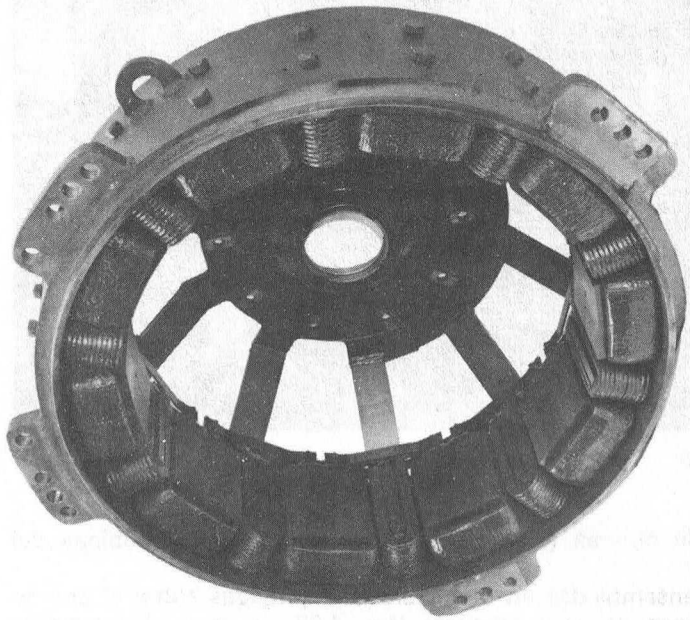


Fig. 7.16 Armazón o carcasa.

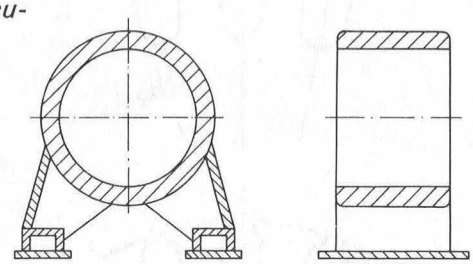


Fig. 7.17 Culata.

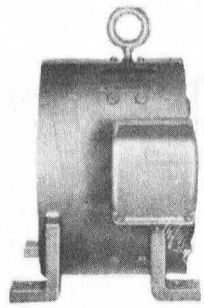


Fig. 7.18 Culata con sus pies de sustentación.

7.5.3.1 *Culata* (fig. 7.17)

Es la parte destinada a cerrar el circuito magnético de los polos inductores y se construye de acero fundido o acero laminado.

La culata tiende a adquirir la forma de anillo (curvada), para aprovechar al máximo las propiedades magnéticas y lograr gran resistencia mecánica (figura 7.18). Los pies de sustentación se construyen de acero y van soldados o fundidos con la culata. En la parte superior de la carcasa debe fijarse una anilla de elevación, próxima al centro de gravedad de la máquina, para facilitar su transporte.

Las máquinas que han de soportar esfuerzos considerables, con frecuentes arranques, paradas e inversiones de giro, se construyen con carcasas de acero fundido *bipartida,* de fácil acceso. En la figura 7.19 se observa una carcasa bipartida horizontalmente, que permite una inspección fácil de todo el interior del motor y un desmontaje fácil del inducido, ventilador y cojinetes. Unas bisagras permiten que la parte superior de la carcasa permanezca abierta hacia atrás, facilitando la labor de control y mantenimiento.

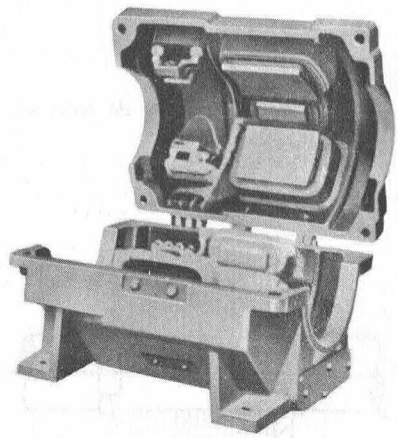


Fig. 7.19 Carcasa bipartida.

7.5.3.2 *Soportes*

Algunas máquinas, principalmente en los casos de potencias medias o reducidas, disponen de dos soportes laterales que, junto a la culata, forman la carcasa (fig. 7.20).

Los soportes se construyen de fundición o acero, buscando la máxima rigidez para la alineación de los cojinetes.

El soporte próximo al colector ha de disponer de unas aberturas amplias que permitan la inspección y recambio de las escobillas (fig. 7.20).

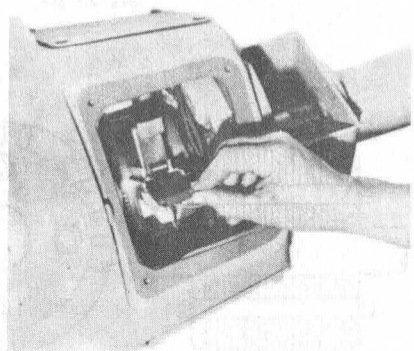


Fig. 7.20 Aberturas para inspección de escobillas.

7.6 Elementos eléctricos y mecánicos del inducido (rotor)

El rotor es la parte giratoria de la máquina (fig. 7.21) y está formado por una serie de elementos que se describen a continuación.

7.6.1 *Núcleo del inducido*

Actualmente, el núcleo del inducido está formado por un apilado de chapas magnéticas de 0,5 mm de espesor, aisladas entre sí por medio de barnices.

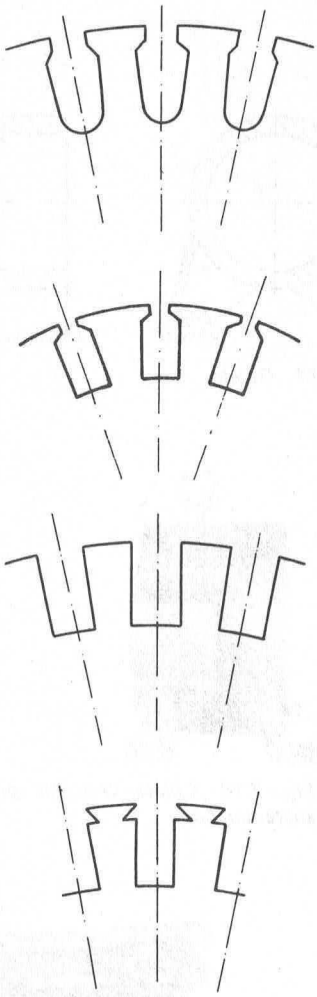


Fig. 7.22 Tipos de ranuras.

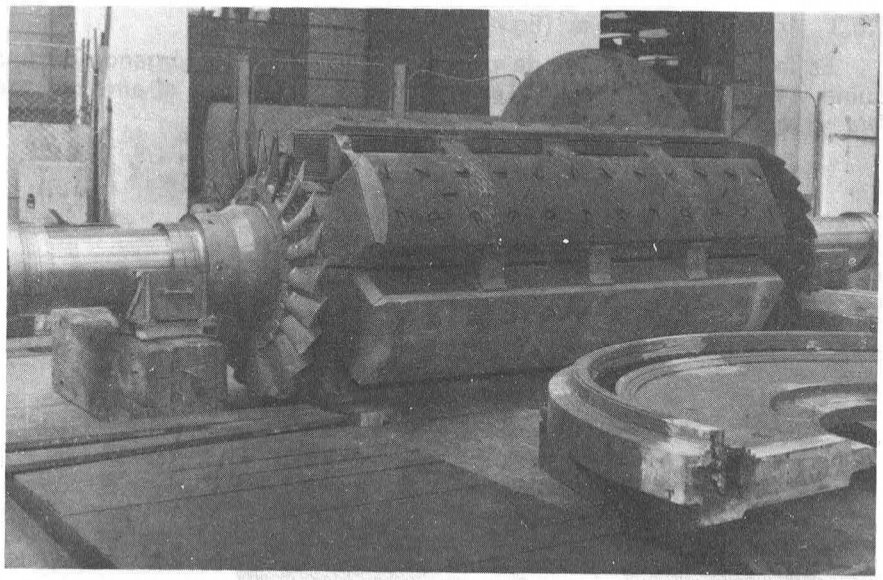


Fig. 7.21 Inducido.

Cada chapa dispone de ranuras (fgi. 7.22), donde se alojan las bobinas del devanado.

Las chapas están ensambladas en dirección axial y fijadas sobre el cuerpo (estrella) en las máquinas de gran potencia (fig. 7.23), o bien, directamente sobre el eje en las de potencia reducida (fig. 7.24).

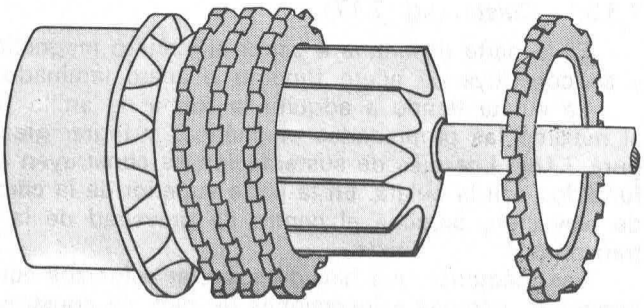


Fig. 7.23 Ensamblado de chapas sobre el cuerpo de un inducido.

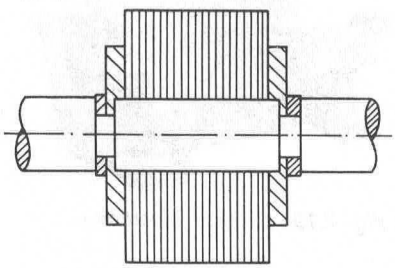


Fig. 7.24 Ensamblado de chapas sobre el eje.

La sujeción del paquete de chapas se hace por medio de pernos que lo atraviesan en sentido axial (fig. 7.25). En las máquinas pequeñas la sujeción del paquete se hace simplemente por dos discos de apriete que, a su vez, están sujetos por medio de dos anillos elásticos alojados en sendas ranuras practicadas en el eje (fig. 7.24).

7.6.2 *Eje*

El eje es el árbol destinado a soportar los esfuerzos mecánicos (flexión y torsión) del inducido, por lo que se construirá de *acero* de gran resistencia. En las máquinas pequeñas, el eje tiene un chavetero común para el paquete de chapas y el colector; y en las grandes, también dispone de chaveteros para colocación del colector y la estrella del inducido (fig. 7.26).

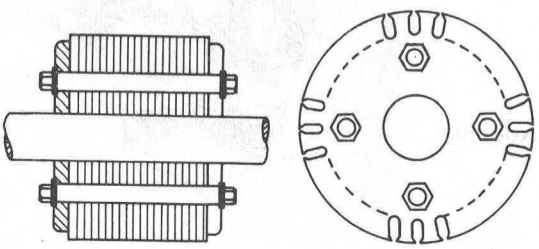


Fig. 7.25 Sujeción del paquete de chapas por medio de pernos.

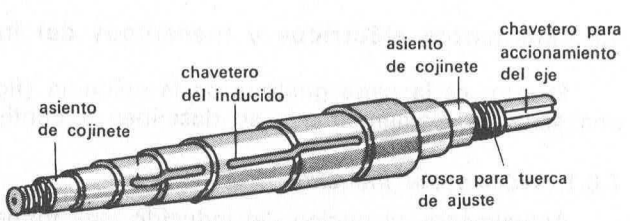
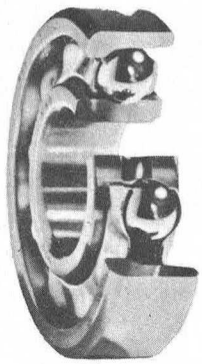


Fig. 7.26 Eje.

7.6.3 *Cojinetes*

Son las piezas que sirven de apoyo y fijación del eje del inducido. Los materiales empleados para la construcción de los cojinetes han de ser de gran calidad, y su mecanización ha de hacerse con sumo cuidado con objeto de conseguir un ajuste exacto.

Cualquier fallo de ajuste entre el eje y cojinetes dará lugar a un mal funcionamiento de la máquina, con el consiguiente peligro de *roce* entre las expansiones polares y el inducido.



7.6.3.1 *Tipos de cojinetes*

Los más utilizados son los de *bolas,* de *rodillos* y de *agujas.*

a) *De bolas* (fig. 7.27). Diseñados para soportar, especialmente, esfuerzos radiales; también admite esfuerzos axiales. Pueden funcionar a grandes velocidades con mínimas pérdidas. En algunos casos estos rodamientos están protegidos con arandelas laterales para impedir la entrada de objetos extraños y conservar la grasa en su interior.

Según el tipo de esfuerzos que debe soportar y la velocidad de giro de la máquina, se elegirán entre los diferentes tipos de cojinetes de bolas: de una hilera de bolas, de bolas de rótulo, de contacto angular y una hilera de bolas, rodamientos axiales de doble efecto, etc. (fig. 7.28).

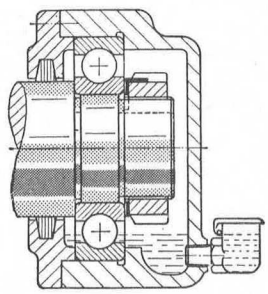


Fig. 7.27 Cojinete de bolas.

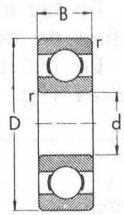
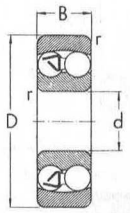
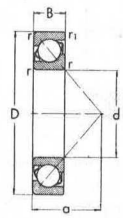
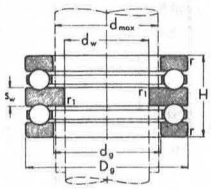
Rodamiento radial rígido de una hilera de bolas Está diseñado para soportar especialmente esfuerzos radiales. También admite esfuerzos axiales, pero para este caso habrá que elegir cojinetes que no tengan muesca para la entrada lateral de bolas. Soporta grandes velocidades. Estos rodamientos están protegidos a veces con arandelas laterales para impedir la entrada de objetos extraños y conservar la grasa en su interior.	
Rodamientos de bolas a rótulo Admite cargas elevadas radiales y cargas axiales de poca importancia. Si han de soportar cargas axiales apreciables, se aconseja adoptar gran anchura en los rodamientos de este tipo. Soporta grandes velocidades. Es imprescindible su empleo en montajes sobre estructuras de calderería.	
Rodamientos de contacto angular y una hilera de bolas Soportan esfuerzos radiales, y axiales en un solo sentido. En este caso transmiten al eje un empuje axial que se debe contrarrestar con otro rodamiento del mismo tipo con inclinación opuesta al primero. Soporta bien grandes velocidades.	
Rodamientos axiales de bolas, de doble efecto Soporta esfuerzos axiales en los dos sentidos. Admiten grandes velocidades y cargas. Absorbe las desviaciones laterales cuando las pistas de asiento son esféricas.	

Fig. 7.28 Tipos de rodamientos de bolas.

b) *De rodillos.* Admiten grandes velocidades y cargas, pudiendo soportar cualquier carga en sentido radial o axial.

En la figura 7.29 se muestra un cojinete de rodillos con el dispositivo de engrase. La grasa penetra por todas las superficies de rodamiento y se almacena en unos entrantes a ambos lados del cojinete. El exceso de grasa se deposita sobre un depósito, que se comunica con una abertura al exterior.

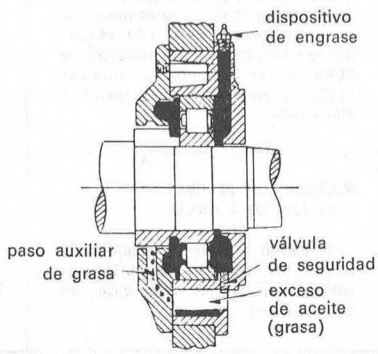


Fig. 7.29 Cojinete de rodillos.

Atendiendo al tipo de esfuerzo y a la velocidad, los cojinetes de rodillos se clasifican en los siguientes tipos: rodillos cilíndricos, rodillos de rótula, rodillos cónicos y rodillos axiales de rótula (fig. 7.30).

c) *De agujas.* Formados por cilindros de pequeño diámetro y de relativamente gran longitud. Su acción es similar a los rodamientos de bolas o rodillos y se aplican cuando el espacio disponible para el rodamiento sea pequeño (fig. 7.31).

7.6.3.2 *Montaje de cojinetes*

Para *grandes cargas:* rodamientos de rodillos o agujas.

Para *grandes velocidades:* rodamientos de bolas.

El engrase debe ser estanco, para evitar pérdidas y evitar entrada de elementos extraños.

Hay que procurar que los elementos de acceso sean de fácil desmontaje.

7.6.4 *Devanado inducido*

Todas las máquinas de c. c. emplean, en el inducido, el devanado de tipo tambor, que va alojado en la periferia del núcleo (Tema 3).

En las máquinas de potencia reducida, las bobinas del inducido se construyen en máquinas de bobinar con la ayuda de moldes. Una vez construida la bobina (con hilo de cobre esmaltado), se introduce en dos ranuras del inducido, dejando sus extremos libres para soldarlos al colector (fig. 7.32).

En las máquinas de gran potencia, las bobinas son de una sola espira de pletina de cobre y se construyen sobre moldes (fig. 7.33).

En las máquinas de potencias medias, las bobinas se forman con varias espiras (fig. 7.34).

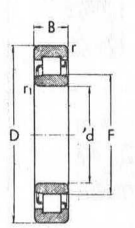
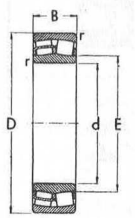
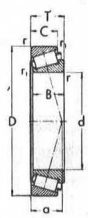
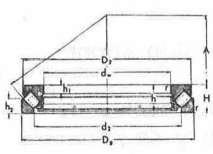
Rodamientos de rodillos cillndricos Admiten grandes velocidades y cargas. Su desmontaje es sencillo. En los casos en que una de las pistas no tiene guías laterales o solamente una, permiten desplazamientos de los ejes de los apoyos en dos o en un sentido, respectivamente.	
Rodamientos de rodillos a rótula Equivalen a los rodamientos de bolas a rótula, soportando una carga radial y axial superiores, si bien son menores las velocidades admisibles.	
Rodamientos de rodillos cónicos Su principal función es la de soportar cargas radiales y axiales simultáneamente. Admite grandes velocidades y cargas, siendo conveniente montar cojinetes opuestos para equilibrar esfuerzos de las cargas radiales que actúan en forma de cuña en el rodamiento. Interesa cuidar la regulación de ajuste entre elementos.	
Rodamientos axiales de rodillos a rótula Soportan grandes velocidades y cargas, absorbiendo a la vez las posibles desviaciones producidas en los montajes.	

Fig. 7.30 Tipos de rodamientos de rodillos.

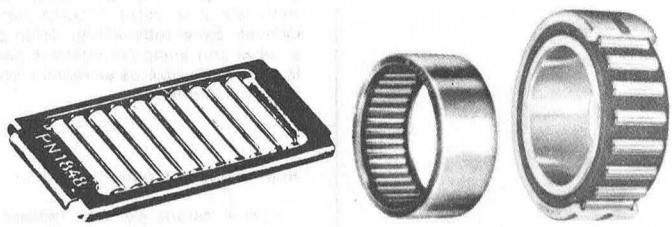


Fig. 7.31 Rodamiento de agujas.

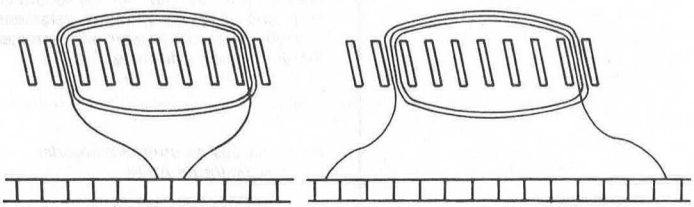


Fig. 7.32 Montaje de bobinas en una máquina de c. c.

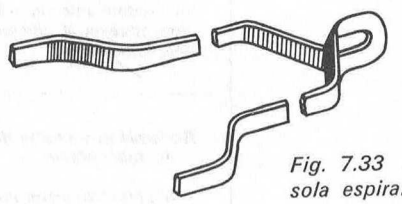


Fig. 7.33 Bobina de una sola espira.

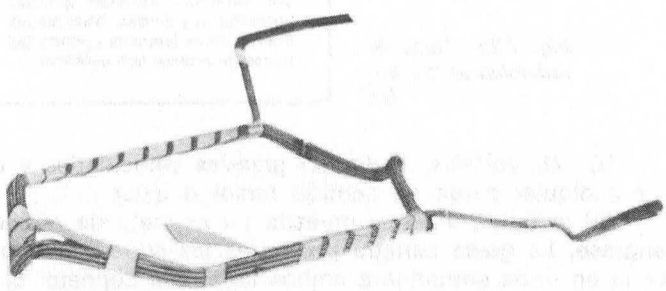


Fig. 7.34 Bobina de varias espiras.

7.6.4.1 *Aislamiento a masa*

Para evitar un posible contacto entre los conductores y las chapas del inducido, las ranuras se aíslan convenientemente con materiales de alto poder dieléctrico, combinados con resinas para altas temperaturas, formando una pantalla flexible. En las máquinas pequeñas, este aislamiento está formado por cajetines colocados en el interior de las ranuras (fig. 7.35), mientras que, en las máquinas grandes, el aislamiento se utiliza como envoltura de la bobina.

Para evitar que puedan salirse los conductores de las ranuras (por efecto de la fuerza centrífuga), se introduce una cuña trapezoidal en dirección axial.

Actualmente, se emplean como aislantes de ranuras (cuñas, espaciadores, etc.) los productos estratificados, formados por tejidos de fibra de vidrio como soporte y varios tipos de resinas como son el *vidrotex* (clase B) *vitrodur* (clase B) *etoxisol* (clase B) y *siliconit* (clase H).

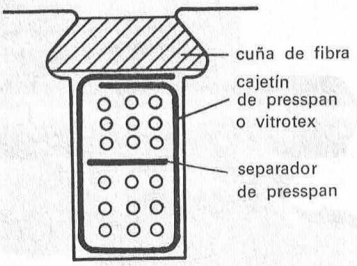


Fig. 7.35 Ranura semicerrada de una máquina de potencia reducida.

7.6.4.2 *Aislamiento de conductores*

En las máquinas de potencia muy reducida, el único aislamiento de los conductores que forman las bobinas es el esmaltado, ya que, por otra parte, al ser ranuras muy cerradas, la introducción de los conductores ha de hacerse de uno en uno.

En las máquinas grandes, los conductores de cobre van aislados con *fibra de vidrio y fibra de vidrio-poliéster* de las siguientes propiedades:

a) *Gran resistencia mecánica a la tracción y a la compresión.* Para conseguir la resistencia al roce apropiada, los conductores, una vez cubiertos, se deben impregnar con barnices especiales.

b) *Resisten altas temperaturas.* El límite máximo que se ha de alcanzar depende tanto del tipo de barniz sintético que se utilice para la impregnación como del resto de los materiales que se hayan empleado para el aislamiento de la máquina.

c) *Gran resistencia a los ácidos, bases, disolventes, etc.*

d) *Gran rigidez dieléctrica,* siendo la tensión de perforación, entre dos espiras superpuestas, de unos 500 V.

e) Posibilidad de someter a los conductores a curvaturas y dobleces, sin peligro de que el aislamiento se agriete.

En la figura 7.36 se indica el aislamiento utilizado en conductores del devanado inducido correspondiente a motores especiales para laminación.

La sujeción de las cabezas de bobinas se hace mediante *zunchos* de vidrio-poliéster y, en las máquinas de gran potencia, se emplean alambres de acero.

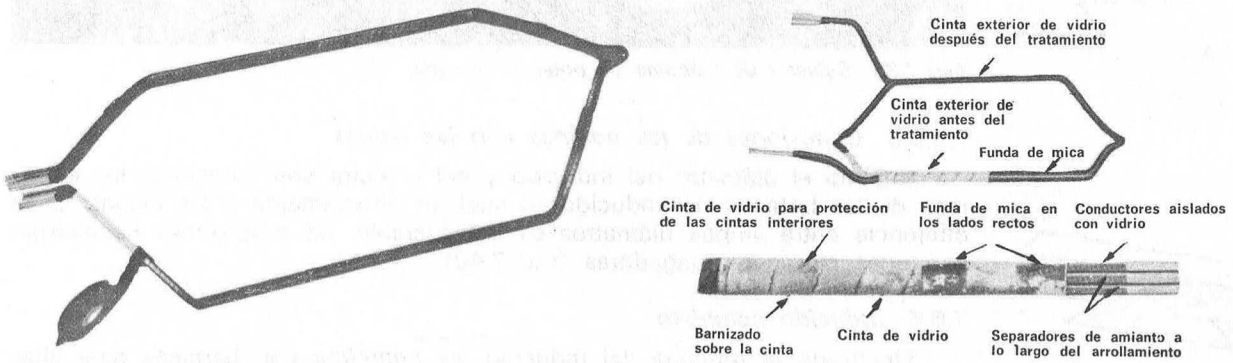


Fig. 7.36 Aislamiento en los conductores del inducido.

7.6.5 *Colector*

Está constituido por varias láminas conductoras, aisladas entre sí, pero conectadas a las secciones del devanado inducido y sobre las cuales frotan las escobillas.

Las delgas del colector se fabrican de cobre duro y, en algún caso, con cobre que contiene plata, para hacerlas más resistentes a las temperaturas elevadas. La forma de las delgas suele ser trapezoidal (fig. 7.37) formando el conjunto de ellas un colector cilíndrico (fig. 7.38).

Las delgas están aisladas entre sí por una capa de mica; y, de los anillos que lo soportan, se aíslan por medio de conos de micanita.

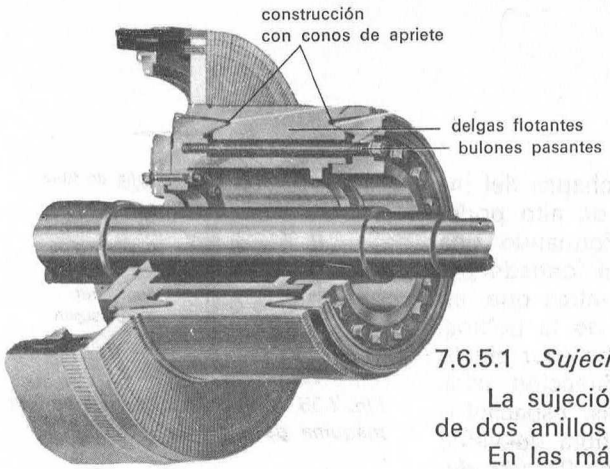


Fig. 7.37 Delga correspondiente a un colector normal.

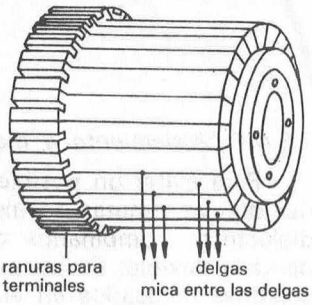


Fig. 7.38 Colector de delgas.

7.6.5.1 *Sujeción del colector*

La sujeción de las delgas en las máquinas pequeñas se hace por presión de dos anillos cónicos, situados en los extremos del colector.

En las máquinas de mayor potencia, los colectores se atornillan sobre un núcleo de acero y se aíslan con conos de acero (fig. 7.39); el colector de la figura 7.39 se puede desmontar fácilmente, una vez levantadas las conexiones del devanado.

En las máquinas muy rápidas, de 3 000 r. p. m. en adelante, el colector se sujeta por medio de zunchos, que impiden a las delgas desplazarse por acción de la fuerza centrífuga.

Una vez montado el colector, se ha de tornear para conseguir una superficie totalmente cilíndrica.

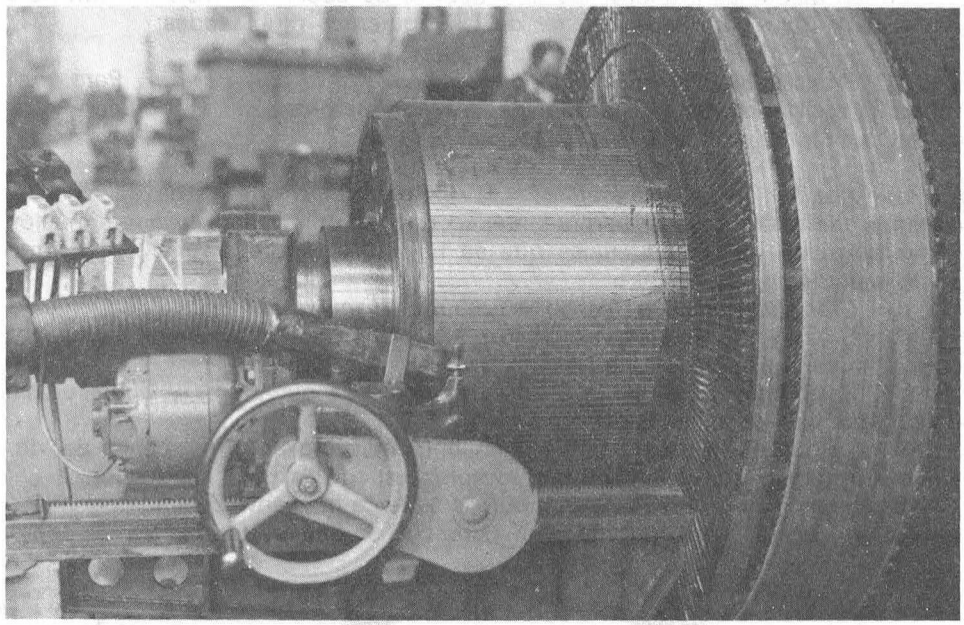
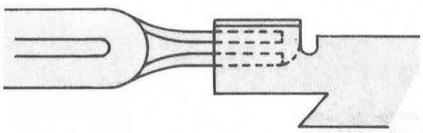
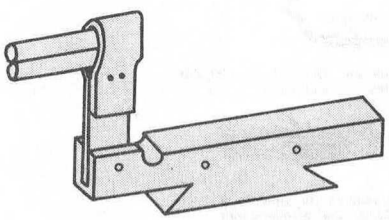
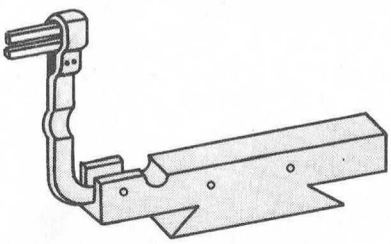


Fig. 7.39 Colector de máquina de potencia elevada.



A





B

Fig. 7.40 Conexiones de las bobinas con las delgas: A, por soldadura; B, con pieza prolongadora.

7.6.5.2 *Conexiones de las bobinas con las delgas*

Cuando el diámetro del inducido y del colector son parecidos, los extremos de las bobinas del inducido se sueldan directamente a las delgas. Si la diferencia entre ambos diámetros es considerable, las conexiones se realizan con unas piezas prolongadoras (fig. 7.40).

7.6.6 *Inducido completo*

Finalizado el montaje del inducido, *se impregna* con barnices para altas temperaturas, que le proporcionan una película para protegerlo del polvo, la humedad, los disolventes y otros agentes químicos, además de dotarlo de una gran estabilidad térmica y alto poder dieléctrico.

Una vez seco el inducido, es conveniente equilibrarlo dinámicamente para que trabaje sin vibraciones (fig. 7.41).

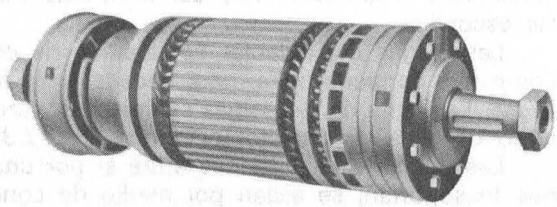


Fig. 7.41 Vista exterior de un inducido.

7.6.7 *Conjunto de escobillas y portaescobillas*

Las escobillas (fig. 7.42) son piezas conductoras (metálicas y de carbón) que aseguran el contacto, por deslizamiento, entre las bobinas del devanado inducido y un órgano fijo. Del órgano fijo parten las barras colectoras, que conectan las escobillas de la misma polaridad, y los conductores hasta la caja de bornas de la máquina.

En el tema dedicado a la conmutación (Tema 6), se analizó el comportamiento de las escobillas atendiendo a sus características.

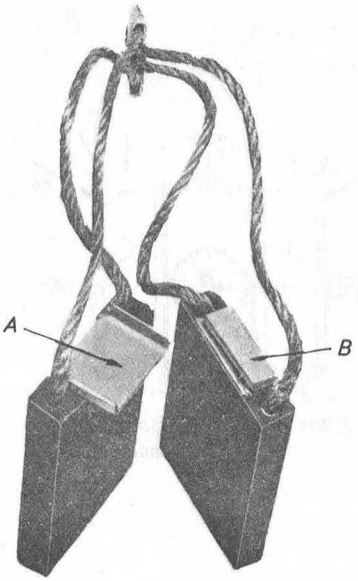


Fig. 7.42 Escobillas.

7.6.7.1 *Portaescobillas*

El portaescobillas es el elemento que sirve de soporte a las escobillas.

Las partes principales del portaescobillas (fig. 7.43) son:

a) *caja* del portaescobillas, donde se aloja la escobilla;

b) *escobilla;*

c) *muelle,* que actúa sobre la escobilla proporcionando la presión adecuada en cada tipo de máquina;

d) *cable flexible,* para establecer contacto en cualquier posición de la escobilla.

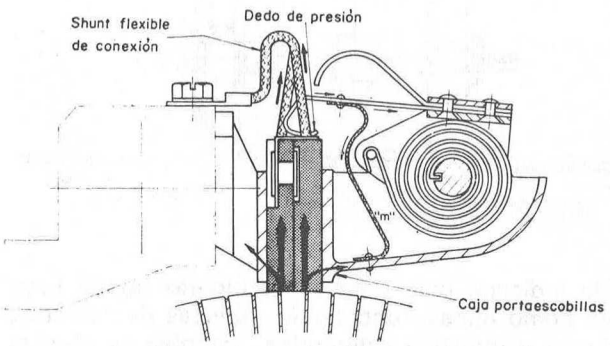


Fig. 7.43 Portaescobillas.

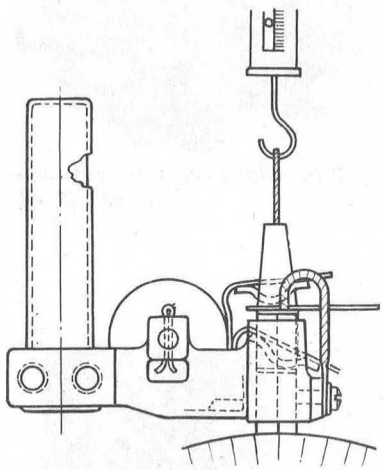


Fig. 7.44 Portaescobillas radial.

La posición de la escobilla suele ser perpendicular al colector (portaescobillas radial) (fig. 7.44), permitiendo así el giro del inducido en los dos sentidos. En algunas máquinas se dispone de portaescobillas oblicuos (fig. 7.45), con el inconveniente de poder utilizarse solamente en un sentido de giro.

La posición simétrica de las escobillas del inducido se logra con la ayuda del *puente portaescobillas* (fig. 7.46). El puente dispone de tantos brazos como escobillas necesite el devanado, facilitándose cualquier desplazamiento de éstas por motivos de reacción de inducido o conmutación.

En la figura 7.47 puede apreciarse un puente portaescobillas correspondiente a una máquina de c. c.

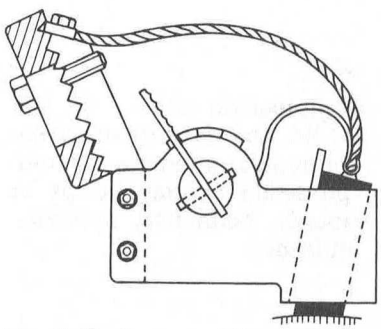


Fig. 7.45 Portaescobillas oblicuo.

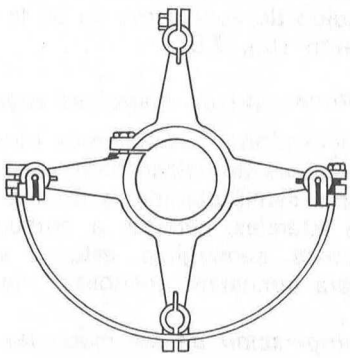


Fig. 7.46 Puente portaescobillas.

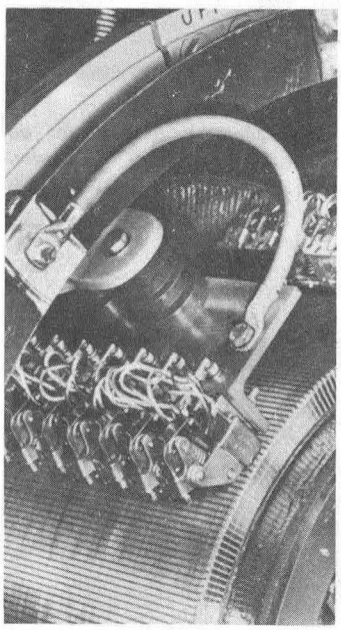


Fig. 7.47 Puente portaescobillas sobre un colector.

7.7 Condiciones de funcionamiento de las máquinas eléctricas de c. c.

Tanto los generadores como los motores se fabrican con distintas clases de *protección, ventilación* y *aislamiento,* según sean las condiciones de los lugares donde hayan de ser instalados.

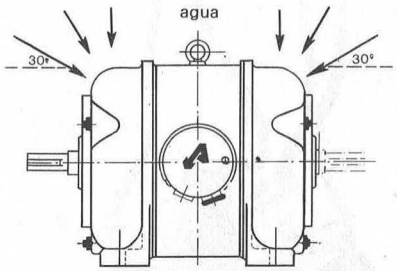


Fig. 7.48 Motor con sistema de protección IP-23.

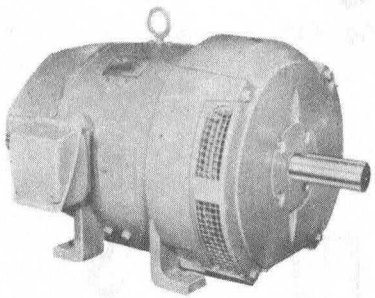


Fig. 7.49 Motor con sistema de protección IP-44.

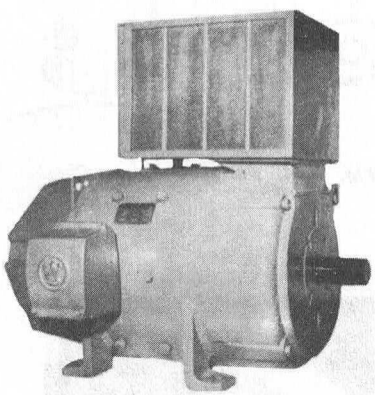


Fig. 7.51 Motor con disipador de calor.

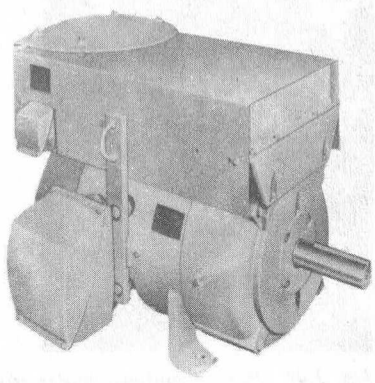


Fig. 7.52 Motor con ventilación.

7.7.1 *Tipos de protección de las máquinas de c. c.*

Los más importantes son:

a) *Protección IP-23.* Contra goteo y salpicaduras sin presión sobre el motor, en un ángulo no inferior a 30° desde la posición horizontal (fig. 7.48); contra cuerpos extraños de tamaño medio, etc.

Esta es la clase de protección que se necesita generalmente en las instalaciones industriales corrientes.

b) *Protección IP-44.* Contra cuerpos extraños sólidos pequeños, contra goteo y salpicaduras en todas las direcciones (fig. 7.49), contra contactos con herramientas, etc.

c) *Protección IP-44R.* Es la de una máquina totalmente cerrada, con entradas y salidas del aire del circuito de refrigeración en comunicación con el exterior (fig. 7.50).

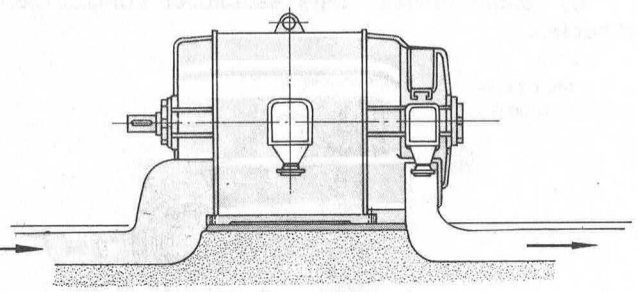


Fig. 7.50 Motor con protección IP-44R.

Este tipo de máquina es la indicada para trabajar en lugares donde haya polvo metálico o abrasivo, tales como minas, fundiciones, fábricas de cemento, canteras, almacenes de maquinaria e industria siderúrgica. También se pueden emplear en factorías químicas, azucareras, etc.

d) *Con disipador de calor.* Tienen mayor capacidad que los totalmente cerrados con ventilador exterior, ya que van provistos de un radiador que transfiere el calor interior del motor al ambiente, mediante unos conductos refrigerados por un ventilador exterior; por el interior de los conductos se mueve, en circuito cerrado, el aire interior del motor (fig. 7.51).

Tiene aplicaciones en lugares donde haya suciedad, polvo, humedad, vapores de aceite, etc.

e) *Con ventilación forzada.* Previstos para *motores* que hayan de trabajar satisfactoriamente en aquellas aplicaciones de la Industria en que se precisa operar a *baja velocidad.*

El equipo de ventilación va en la parte superior del soporte, en el lado de acoplamiento (fig. 7.52).

7.7.1.1 *Protección de máquinas según normas UNE*

Las definiciones relacionadas con los *tipos* de protección general de máquinas eléctricas se indican en la norma UNE 21 302 h4. Los *tipos de máquinas* son: abierta, semiprotegida, a prueba de goteo y protegida, a prueba de proyecciones laterales, cerrada, a prueba de polvo, protegida contra chorros de agua, estanca, sumergible, estanca a gases o vapores, hermética, antideflagrante, para atmósfera grisuosa y de seguridad intrínseca.

7.7.2 *Refrigeración de las máquinas*

La potencia disipada durante el funcionamiento de una máquina *(pérdidas eléctricas)* se manifiesta generalmente en forma de *calor,* produciendo una elevación de temperatura, en los diferentes elementos de la máquina, sobre la temperatura ambiente. La diferencia de temperaturas (interior y ambiente) da lugar a la evacuación del calor al exterior a través de la superficie de la máquina.

Para evitar que los elementos constituyentes de la máquina alcancen temperaturas peligrosas para su aislamiento, es necesario dotar a las máquinas de

un *sistema de refrigeración* capaz de mantener la temperatura final dentro de los límites permisibles.

La sustancia más utilizada como *refrigerante* es el *aire,* normalmente impulsado por un ventilador acoplado al eje. En algunas ocasiones, se emplean como refrigerantes el hidrógeno (en turbogeneradores) y el *agua.*

7.7.2.1 *Sistemas de refrigeración utilizados en las máquinas de c. c.*

El sistema de ventilación utilizado por cada máquina depende del lugar de emplazamiento, velocidad y potencia que debe desarrollar.

Según normas UNE, atendiendo a su refrigeración, se clasifican en:

a) *Máquina autorrefrigerada,* en la que el enfriamiento se hace por sus propios medios, sin más fuerza motriz que la tomada del propio eje de la máquina y sin otro fluido que provenga del exterior, exceptuando el aire.

b) *Máquina de refrigeración independiente,* cuya refrigeración está asegurada mediante una fuerza motriz que no se toma de su eje, o por medio de un fluido del exterior, distinto del aire.

c) *Máquina ventilada en circuito abierto,* en la cual el calor se cede directamente al fluido refrigerante, que se renueva continuamente.

En la figura 7.53 se indica la trayectoria seguida por el aire a través de una máquina protegida contra goteo:

Un ventilador de aluminio (3), en unión de una pantalla de aire (2) y un difusor (4), obligan al aire a entrar en la máquina por el soporte próximo al acoplamiento (1).

El aire se dirige hacia el colector, una vez distribuido por el difusor que envía la mayor parte hacia el inducido (5) y el resto hacia las bobinas del campo inductor (8). El aire que circula a través de unos orificios practicados en el núcleo inducido (6) se suma al que circula por los polos (8), para llegra al colector (7) y salir expulsado al exterior de la máquina, arrastrando consigo el polvo de carbón desgastado por las escobillas.

Entre los restantes tipos de refrigeración, pueden citarse las máquinas de armazón liso, de armazón ventilado, de doble envoltura, con refrigerante, etc.

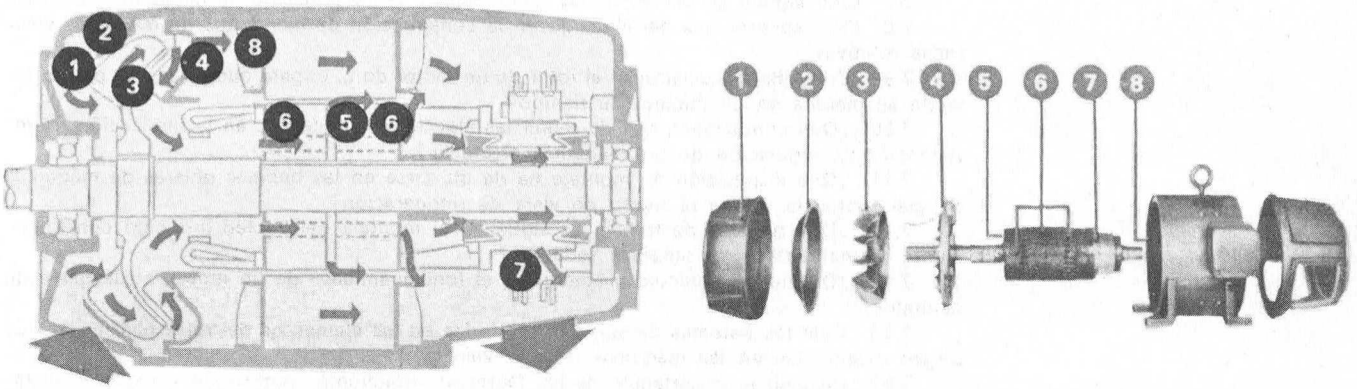


Fig. 7.53 Sistema de ventilación utilizado en un motor protegido contra goteo.

7.7.3 *Aislamiento de las máquinas eléctricas*

La técnica moderna crea de continuo nuevos problemas en la construcción de *máquinas* eléctricas, y en su solución interviene de un modo especial el aislante utilizado.

El aislamiento es el factor decisivo en la capacidad, vida y averías de una máquina eléctrica.

Uno de los numerosos materiales aislantes, que contribuye a solucionar de un modo especial muchos de los problemas planteados en cuestión de aislamiento eléctrico, es el *vidrio textil,* más conocido por *fibra de vidrio.* La fibra de vidrio se utiliza en forma de: cinta, tubo, cordón, zuncho, cablecillo, productos estratificados, etc.

Este material, además de ser un buen *aislante eléctrico,* posee una *gran resistencia al calor,* por lo que es muy utilizado en las máquinas y aparatos sometidos a calentamientos producidos por *sobrecargas,* o bien, porque la temperatura del ambiente donde han de funcionar sea muy elevada; por ejemplo: motores de tracción, elevadores de minas, montacargas, ascensores, motores para laminación, etc.

La fibra de vidrio es muy utilizada en la construcción de máquinas de c. c. por presentar las ventajas siguientes:

1.ª Posibilidades de funcionamiento a temperaturas de trabajo muy elevadas.

2.ª Gran resistencia a las sobrecargas accidentales.

3.ª Seguridad de funcionamiento en presencia de vapor de agua, gases o vapores corrosivos.

4.ª Disminución del volumen total de la máquina eléctrica y, por tanto, de su peso.

Se ha citado anteriormente el aislamiento más aconsejable en los diferentes elementos que constituyen las máquinas de c. c., y responden a la clasificación de aislamientos según la C. E. I.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Condiciones que han de cumplir las chapas magnéticas empleadas en la construcción de los circuitos magnéticos de los generadores y motores de c. c.

— Recopilar información sobre *Recomendaciones para la clasificación de los materiales destinados al aislamiento de las máquinas y aparatos eléctricos en función de su estabilidad térmica en servicio,* publicadas por la C. E. I. (Comisión Electrotécnica Internacional).

— Métodos naturales y artificiales de evacuación de calor utilizados en las máquinas eléctricas rotativas.

CUESTIONARIO

7.1 ¿Cuáles son las principales aplicaciones del hierro ARMCO en electricidad?

7.2 ¿Cuáles son las aplicaciones del acero en la construcción de máquinas eléctricas de c. c.?

7.3 ¿Cuál es la composición química de la chapa magnética utilizada en la construcción de dínamos y motores de c. c.?

7.4 ¿En qué elementos de una dínamo se emplea como material la chapa magnética?

7.5 ¿Cuáles son las medidas de ancho, largo y espesor de las chapas magnéticas utilizadas en la construcción de máquinas de c. c.?

7.6 ¿Qué ventajas e inconvenientes presentará el empleo de chapa magnética con un 4,5 % de silicio, para la construcción de un inducido?

7.7 Citar alguna aplicación de las fundiciones a la construcción de máquinas eléctricas.

7.8 Citar aplicaciones del aluminio en la construcción de elementos de máquinas eléctricas rotativas.

7.9 ¿Cómo ha de construirse el rotor de un motor de c. c. para que arranque, pare o invierta su marcha en un mínimo de tiempo?

7.10 ¿Qué condiciones han de reunir las aleaciones empleadas en la fabricación de resistencias de regulación de las máquinas eléctricas?

7.11 ¿Qué disposición de montaje ha de utilizarse en las bobinas polares de máquinas de gran potencia, desde el punto de vista de refrigeración?

7.12 ¿Qué proceso de trabajo se sigue en el montaje del núcleo inducido correspondiente a una dínamo de potencia reducida?

7.13 ¿Qué inconvenientes presenta, en el funcionamiento de un motor, el desgaste de cojinetes?

7.14 Citar los sistemas de sujeción utilizados en los elementos del rotor para evitar que salgan despedidos en las máquinas de alta velocidad.

7.15 Resumir la importancia de los factores: aislamiento, ventilación y lugar de instalación de una máquina eléctrica de c. c.

BIBLIOGRAFIA

Equipo EPS Zaragoza, *Técnicas de Expresión Gráfica 2.1. Electricidad,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1977.

COCA-ROSIQUE, *Conocimiento de materiales,* Editorial Cosmos, Valencia 1967.

VIDONDO-ALVAREZ, *Tecnología del Metal/1,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1975.

ELORRIAGA S., *Tecnología Eléctrica y Electrónica/1,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1975.

UNE, *Instituto Nacional de Racionalización y Normalización,* Madrid.

Teoría, cálculo y construcción de máquinas eléctricas de corriente continua, Editorial Labor, Barcelona 1966.

Información técnica Westinghouse, S. A., Madrid 1974.

Catálogos comerciales (G. E. E., Aismalíbar, S. A.).

Tema 8

Sistemas de excitación de los generadores. Características del generador de excitación independiente

OBJETIVOS

— *Enumerar los sistemas de producción de flujo en una máquina de c. c.*
— *Diferenciar los tipos de generadores por su excitación*
— *Describir el proceso de la autoexcitación.*
— *Justificar la importancia de las curvas características de una dínamo.*
— *Analizar la característica de vacío de una dínamo de excitación independiente.*
— *Identificar el punto de cortocircuito de la característica en carga.*
— *Apreciar la variación de corriente de excitación, según varíe la carga en la característica de regulación.*
— *Relacionar el coeficiente de regulación con la característica exterior.*

GUION

— Excitación de los generadores.
— Clasificación de los generadores por su excitación.
— Características fundamentales del generador de corriente continua.
— Estudio de la dínamo de excitación independiente.
— Característica en vacío.
— Característica en carga.
— Características de regulación y de cortocircuito.
— Características exterior e interior.

PUNTOS CLAVE

— Enumerar los generadores por su sistema de excitación.
— Relacionar entre sí las diferentes magnitudes que intervienen en el funcionamiento del generador de corriente continua.
— Interpretar las curvas características.

EXPOSICION DEL TEMA

8.1 Excitación de los generadores

Al estudiar el circuito magnético correspondiente a máquinas de corriente continua (Tema 5), se comprobó la importancia que adquiriría el flujo en la obtención de la f. e. m. inducida.

El flujo puede producirse por dos métodos:

a) Mediante un imán permanente.
b) Por excitación electromagnética.

8.1.1 *Imán permanente*

Es un cuerpo ferromagnético que mantiene un campo magnético sin la intervención de corrientes eléctricas externas.

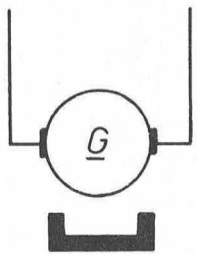


Fig. 8.1 Generador de imán permanente de c. c.

La utilización de imanes permanentes presenta el inconveniente de producir campos muy débiles y constantes, por lo que su empleo es muy limitado; ejemplo: volantes magnéticos de motocicletas, magnetos, dínamos taquimétricas, etc.

La máquina que dispone de imanes permanentes para producción del campo magnético se denomina *magneto* o *máquina magnetoeléctrica* (fig. 8.1).

8.1.2 *Excitación*

Es la producción del campo magnético por una corriente eléctrica que circula por el devanado inductor.

En la mayoría de las máquinas de c. c. el campo magnético está producido con *electroimanes,* que proporcionan los campos intensos que necesitan para su funcionamiento óptimo.

Los devanados de excitación del mismo tipo se unen todos entre sí *en serie* cuidando de que se formen los polos *N* y *S* correctamente.

8.2 *Clasificación de los generadores por su excitación*

Por el sistema de excitación, las dínamos se dividen en:

a) Dínamos de excitación independiente.

b) Dínamos autoexcitadas.

8.2.1 *Dínamo de excitación independiente*

Es un generador de c. c., en el que la producción del campo magnético se hace por una corriente independiente de la máquina. En la figura 8.2 se representa el esquema eléctrico de una dínamo de excitación independiente, con el circuito de excitación conectado a una red auxiliar (batería).

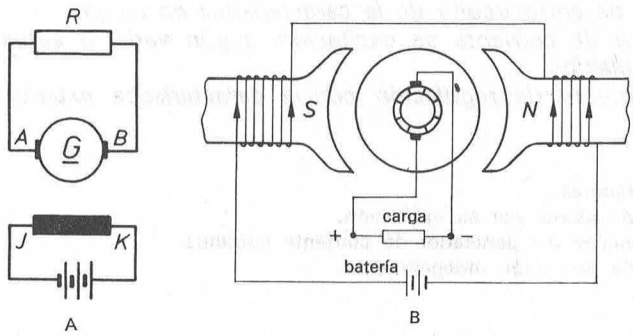


Fig. 8.2 Dínamo de excitación independiente: A, *esquema simplificado;* B, *esquema de conexiones.*

Los bornes se representan, con las letras siguientes:

AB salidas del inducido
JK salidas del devanado de excitación independiente
GH salidas del devanado de conmutación
EF salidas del devanado serie
CD salidas del devanado derivación

El generador de excitación independiente presenta la ventaja de la *independencia* entre la corriente de excitación y la tensión en bornes del inducido.

El principal inconveniente de la excitación independiente radica en la necesidad de una fuente de alimentación de c. c. para alimentar su devanado inductor. Debido a este inconveniente, su utilización es mínima.

8.2.2 *Dínamo autoexcitada*

Es la máquina que produce ella misma su excitación, tomando la corriente de excitación de su propio inducido.

La autoexcitación es posible por el *magnetismo remanente* del circuito magnético de la máquina. Así, al hacer girar el inducido a su velocidad nominal, se inducirá una f. e. m. muy pequeña (por serlo el flujo) en los primeros instantes:

$$E = K \cdot \Phi_u \cdot N$$

en donde:

K = constante del inducido
Φ_u = flujo útil producido por magnetismo remanente
N = velocidad nominal
E = f. e. m. de cebado

Al ser la velocidad constante:

$$E = K' \cdot \Phi_u$$

Si esta débil f. e. m. (E) se aprovecha para hacer circular una corriente por el inducido de excitación, *se reforzará el campo magnético,* aumentando la f. e. m. inducida, la cual a su vez hará aumentar la corriente, y así sucesivamente hasta alcanzar la f. e. m. su valor nominal.

La figura 8.3 muestra los esquemas pertenecientes al proceso de autoexcitación, en los períodos inicial (A), intermedio (B) y final (C). En el período inicial, la f. e. m. inducida (E_r) se debe solamente al magnetismo remanente, por lo que puede representarse por el esquema de la figura 8.3A, en el que permanece abierto el circuito de excitación ($I_{ex.} = 0$).

En un período intermedio (fig. 8.3B), al aplicar la f. e. m. (E_r) al devanado inductor, circulará una corriente por el circuito de excitación ($I_{ex.1}$) que dará lugar a un aumento en la f. e. m. inducida (E_1). El proceso se repite hasta llegar a la saturación del circuito magnético, donde el paso de $I_{ex.}$ (nominal) da lugar a la obtención de la tensión nominal E_n (fig. 8.3C).

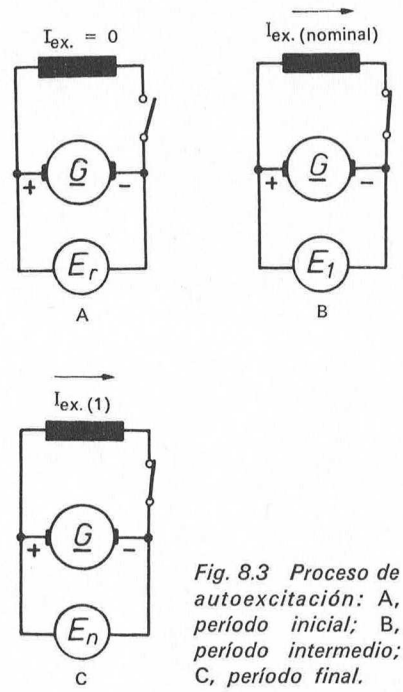
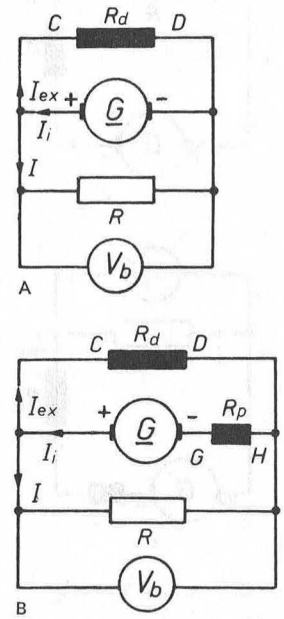


Fig. 8.3 Proceso de autoexcitación: A, *período inicial;* B, *período intermedio;* C, *período final.*

Resumen:

Magnetismo remanente $\rightarrow E_r \rightarrow I_{ex.1} \rightarrow E_1 \rightarrow I_{ex.2} \rightarrow E_2 \ldots \rightarrow I_{ex.}$ (nominal) $\rightarrow E_n$

Según lo descrito en el proceso de autoexcitación, es necesario un magnetismo remanente en el circuito magnético de la dínamo (fig. 8.4A) y, si éste desapareciese por alguna causa, no será posible lograr la autoexcitación, por lo que habría de conectarse el devanado inductor a una red auxiliar de c. c. si se invierte el sentido de la corriente de excitación (por ejemplo: en la inversión de giro) (fig. 8.4C); el campo remanente podría anularse por ser de sentido opuesto al campo producido por la excitación.



8.2.3 *Tipos de dínamos autoexcitadas*

Según el tipo de conexión del devanado inductor con el inducido, se clasifican en:

a) Dínamo con excitación en derivación (shunt).
b) Dínamo con excitación en serie.
c) Dínamo con excitación mixta o *compound* (compuesta).

8.2.3.1 *Dínamo con excitación en derivación*

El devanado inductor (CD) se conecta en derivación con los bornes del inducido (fig. 8.5). La corriente que circula por el inducido es la suma de la corriente que absorbe la carga y la de excitación, como indica la ley de Kirchhoff:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

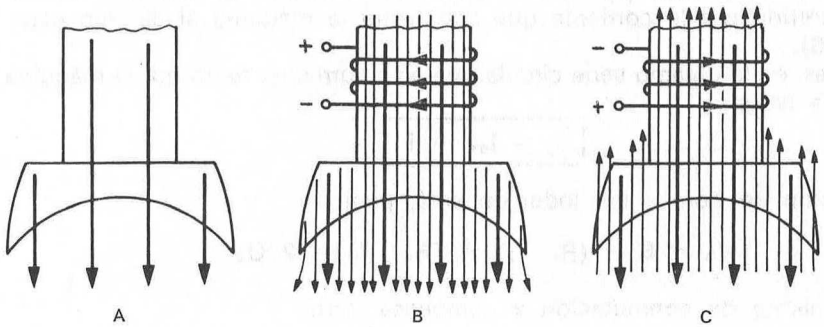


Fig. 8.4 Campo magnético inductor: A, *campo magnético debido al magnetismo remanente;* B, *refuerzo del campo magnético por sumarse los efectos del magnetismo remanente y la excitación;* C, *debilitación del magnetismo remanente por inversión de la corriente de excitación.*

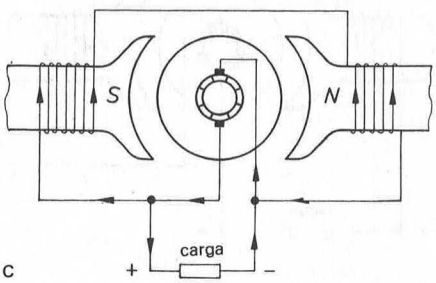


Fig. 8.5 Dínamo con excitación en derivación: A, *sin devanado de conmutación;* B, *con devanado de conmutación;* C, *esquema de conexiones.*

en donde:

$I_{ex.}$ = corriente de excitación
I = corriente que absorbe la carga
I_i = corriente que suministra el inducido

La tensión en bornes del inducido se obtiene por las expresiones siguientes:

$$V_b = R_d \cdot I_{ex.}$$

$$V_b = R \cdot I$$

$$V_b = E - (R_i \cdot I_i) - 2\,U_e$$

(sin arrollamiento de conmutación y compensación).

$$V_b = E - (R_i \cdot I_i) - 2\,U_e - (R_p \cdot I_i)$$

(con arrollamiento de conmutación).

En donde:

R_d = resistencia del devanado de excitación en derivación
R_p = resistencia del arrollamiento de conmutación
R = resistencia de la carga
R_i = resistencia interior del inducido
V_b = tensión en bornes de la carga

Ejercicio de aplicación

Una dínamo tipo derivación produce en vacío 240 V, mientras que al suministrar carga, la tensión disminuye a 230 V. Hallar la corriente que absorbe la carga, si $R_d = 115\ \Omega$, $R_i = 0{,}18\ \Omega$ y $R_p = 0{,}02\ \Omega$, prescindiendo de la reacción de inducido.

Solución:

En carga, la f. e. m. inducida será:

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + (R_p \cdot I_i) + 2\,U_e$$

$$240 = 230 + I_i\,(0{,}18 + 0{,}02) + 2$$

De donde, el valor de la corriente (I_i):

$$I_i = \frac{240 - 232}{0{,}20} = 40\ A$$

La corriente de excitación será:

$$I_{ex.} = \frac{V_b}{R_d} = \frac{230}{115} = 2\ A$$

Y la corriente que absorbe la carga:

$$I = I_i - I_{ex.} = 40 - 2 = 38\ A$$

8.2.3.2 *Dínamo con excitación serie*

El devanado inductor (*E, F*) se conecta en serie con el inducido, siendo por ello recorrido por la corriente que suministra la máquina al circuito exterior (fig. 8.6).

Así, pues, en la dínamo serie circula una sola corriente, tanto por la máquina como por la carga:

$$\boxed{I_i = I_{ex.} = I}$$

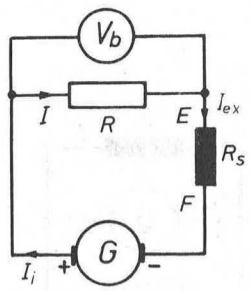
La tensión en bornes del inducido será, pues:

$$V_b = E - (R_i \cdot I) - (R_s \cdot I) - 2\,U_e$$

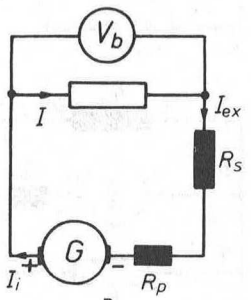
(sin arrollamiento de conmutación y compensación).

$$V_b = E - (R_i \cdot I) - (R_s \cdot I) - 2\,U_e - (R_p \cdot I)$$

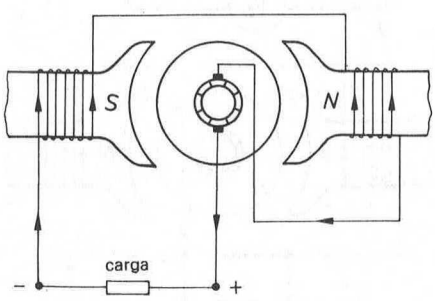
(con arrollamiento de conmutación).



A



B



C

Fig. 8.6 Dínamo con excitación en serie: A, sin devanado de conmutación; B, con devanado de conmutación; C, esquema de conexiones.

En donde:

R_s = resistencia del devanado de excitación en serie
R_p = resistencia del arrollamiento de conmutación
R_i = resistencia interior del inducido
V_b = tensión en bornes de la carga

Ejercicio de aplicación

Una dínamo con excitación en serie suministra una corriente de 100 A a un circuito exterior que absorbe 38 kW, y tiene un rendimiento eléctrico del inducido del 95 %. Averiguar la resistencia interior del inducido, si $R_p = 0{,}06\ \Omega$ y $R_s = 0{,}04\ \Omega$.

Solución.

La tensión en bornes V_b, será:

$$V_b = \frac{P}{I} = \frac{38\,000}{100} = 380\ V$$

El rendimiento eléctrico del inducido es el cociente entre la potencia útil que absorbe la carga y la potencia transformada:

$$\eta_G = \frac{P_u}{P_t}; \quad P_t = \frac{P_u}{\eta_G} = \frac{38\,000}{0{,}95} = 40\,000\ W$$

La diferencia entre las potencias transformada y útil corresponde a las pérdidas Joule en el cobre, en la resistencia total (R_t), formada por R_p, R_s y R_i en serie, una vez despreciada la caída de tensión en las escobillas:

$$P_J = P_t - P_u = 40\,000 - 38\,000 = 2\,000\ W$$

$$P_J = R_t \cdot I^2$$

$$R_t = \frac{P_J}{I^2} = \frac{2\,000}{100^2} = 0{,}2\ \Omega$$

Como:

$$R_t = R_s + R_i + R_p$$

$$R_i = R_t - R_p - R_s = 0{,}2 - 0{,}06 - 0{,}04 = 0{,}1\ \Omega$$

También podría obtenerse a partir de la f. e. m.:

$$\eta_G = \frac{P_u}{P_t} = \frac{V_b \cdot I}{E \cdot I} = \frac{V_b}{E}$$

$$E = \frac{V_b}{\eta_G} = \frac{380}{0{,}95} = 400\ V$$

A su vez:

$$E = V_b + (R_i + R_p + R_s)\ I$$

en donde se ha despreciado la caída de tensión por escobillas, al igual que en el cálculo anterior.

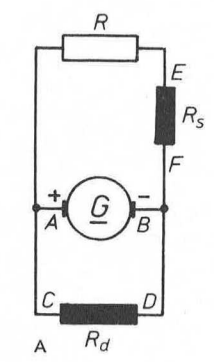
Sustituyendo por los valores numéricos:

$$400 = 380 + (R_i + 0{,}06 + 0{,}04) \times 100$$

$$R_i + 0{,}1 = \frac{400 - 380}{100} = 0{,}2\ \Omega$$

De donde:

$$R_i = 0{,}2 - 0{,}1 = 0{,}1\ \Omega$$



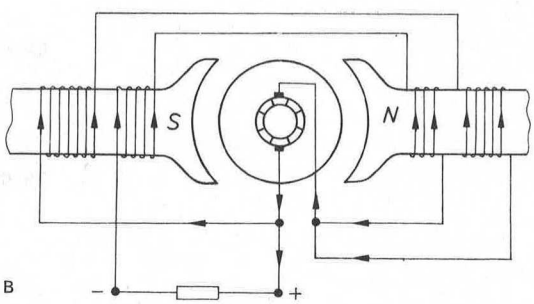


Fig. 8.7 Dínamo con excitación compound: A, *esquema simplificado;* B, *esquema de conexiones.*

8.2.3.3 *Dínamo con excitación mixta (compound)*

Es el generador que dispone de dos devanados inductores, uno de ellos conectado en derivación y el otro conectado en serie con el inducido (fig 8.7); de aquí el nombre de excitación mixta o *compound.*

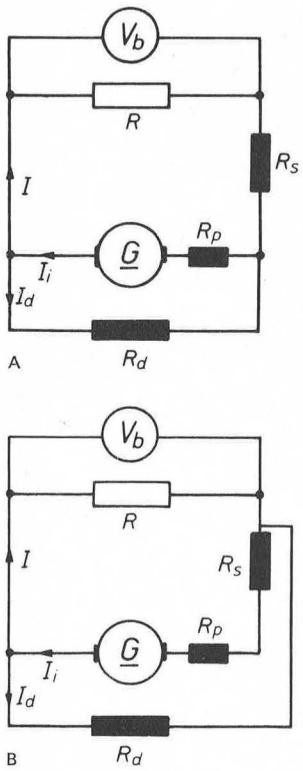


Fig. 8.8 Tipos de conexiones de la dínamo compound: A, *derivación corta;* B, *derivación larga.*

La conexión del devanado en derivación puede hacerse de dos formas:

1.ª Antes de la conexión serie (mirando desde el inducido), llamada *derivación corta* (fig. 8.8A).

2.ª Después de la conexión serie (mirando desde el inducido), llamada *derivación larga* (fig. 8.8B).

Las corrientes que circulan por la máquina compound están relacionadas entre sí por las siguientes expresiones:

$$I_i = I + I_d$$

en donde:

I = corriente que absorbe la carga
I_d = corriente de excitación en derivación
I_i = corriente que suministra el inducido

La tensión en bornas del inducido, suponiendo que la máquina dispone de arrollamiento de conmutación, será:

$$V_b = R \cdot I$$

En la máquina con *derivación corta,* la tensión en bornas es:

$$V_b = (R_d \cdot I_d) - (R_s \cdot I)$$

$$V_b = E - I_i \cdot (R_i + R_p) - (R_s \cdot I) - 2\ U_e$$

En la máquina con *derivación larga,* la tensión en bornes es:

$$V_b = R_d \cdot I_d$$

$$V_b = E - I_i \cdot (R_i + R_p + R_s) - 2\ U_e$$

A continuación, se desarrollan ejercicios sobre las dos formas posibles de conexión del devanado derivación, comprobándose, al comparar los resultados, que prácticamente no existe diferencia alguna entre los dos tipos.

Ejercicio de aplicación

Un generador compound de derivación larga alimenta una carga que consume 44 kW a 440 V. Las resistencias de sus devanados son: $R_i = 0{,}1\ \Omega$, $R_p = 0{,}04\ \Omega$, $R_s = 0{,}06\ \Omega$ y $R_d = 220\ \Omega$. Calcular la corriente suministrada por el inducido y la f. e. m. inducida. Tómese caída de tensión en escobillas 2 V.

Solución:

La corriente suministrada por el inducido es:

$$I_i = I + I_d$$

La corriente absorbida por la carga es:

$$I = \frac{P}{V_b} = \frac{44\,000}{440} = 100\ A$$

La corriente absorbida por el circuito de excitación en derivación es:

$$I_d = \frac{V_b}{R_d} = \frac{440}{220} = 2\ A$$

La corriente total del inducido:

$$I_i = 100 + 2 = 102\ A$$

La f. e. m. inducida será:

$$E = V_b + I_i \cdot (R_i + R_p + R_s) + 2$$

$$= 440 + 102\ (0{,}1 + 0{,}04 + 0{,}06) + 2 = 462{,}4\ V$$

8.3 Características fundamentales del generador de corriente continua

Las magnitudes fundamentales que intervienen en el funcionamiento de una dínamo son: a), tensión en bornes de la carga (V_b); b), corriente de excitación ($I_{ex.}$); c), corriente suministrada por el inducido (I_i) y d), velocidad de rotación (N). La posición de las escobillas se considera siempre fija.

8.3.1 *Curvas características*

Se denominan *curvas características* las curvas que representan relaciones entre las cuatro magnitudes citadas; sirven para analizar el comportamiento de la máquina en su posterior funcionamiento.

Al ser cuatro las magnitudes desconocidas, será necesario representar una función en la que intervienen las cuatro variables:

$$f\ (V_b,\ I_{ex.},\ I_i,\ N) = 0$$

Sin embargo, este sistema será muy complejo, por lo que se recurre a la representación de una variable en función de otra, cuando las restantes permanecen constantes, obteniéndose así las familias de curvas características.

8.3.2 *Tipos de curvas características*

De las combinaciones de dos variables, interesa conocer las siguientes:

1.ª *Característica en vacío.* Es la curva que representa, para una velocidad de rotación determinada, la tensión en bornes en vacío en función de la corriente de excitación.

Así, pues, la característica en vacío, se representa por:

$$\boxed{V_b = f\ (I_{ex.})}$$

para $I_i = 0$ y $N = cte.$

2.ª *Característica en carga.* Es la curva que representa, para una velocidad de rotación y una intensidad en el circuito exterior constantes, la tensión en bornes en función de la corriente de excitación.

La característica de carga será:

$$\boxed{V_b = f\ (I_{ex.})}$$

para $I_i = cte. > 0$ y $N = cte.$

3.ª *Característica de excitación o regulación.* Es la curva que representa, para una velocidad de rotación y una tensión en bornes constantes, la corriente de excitación en función de la corriente suministrada por la máquina:

$$\boxed{I_{ex.} = f\ (I_i)}$$

para $V_b = cte. > 0$ y $N = cte.$

4.ª *Característica de cortocircuito.* Representa la corriente de excitación en función de la corriente suministrada por la máquina, para tensión en bornes nula y velocidad constante.

$$\boxed{I_{ex.} = f\ (I_i)}$$

para $V_b = 0$ y $N = cte.$

Esta característica *sólo puede obtenerse* en la dínamo de *excitación independiente,* o bien haciendo la *excitación independiente* en las dínamos autoexcitadas, para lo cual habrán de separarse los devanados inductores del inducido.

5.ª *Característica exterior.* Es la curva que representa la tensión en carga en función de la corriente suministrada por la máquina, para corriente de excitación y velocidad constantes:

$$V_b = f\ (I)$$

para $I_{ex.}$ = cte. > 0 y N = cte.

Esta característica depende de los datos de la carga y, por ello, se denomina exterior.

6.ª *Característica interior.* Es la curva que representa la f. e. m. inducida en carga en función de la corriente suministrada por el inducido, para corriente de excitación y velocidad constantes:

$$E = f\ (I_i)$$

para $I_{ex.}$ = cte. > 0 y N = cte.

Esta característica no se obtiene directamente como las anteriores, por no poderse medir la magnitud *f. e. m.*, y su determinación se hace a partir de la característica exterior, sumando las caídas de tensión que haya, según sea el tipo de dínamo.

La interpretación de las curvas características se hace a continuación, al estudiar los diferentes tipos de dínamos según su excitación.

8.4 Estudio de la dínamo de excitación independiente

Las propiedades de la dínamo de excitación independiente en servicio se pueden deducir a partir del estudio de sus curvas características. Este tipo de generador presenta la ventaja de la *independencia entre los circuitos inductor e inducido,* por lo que podrán cumplirse todas las condiciones exigidas a las seis curvas características.

La obtención práctica de las curvas características se tratará en el tema relacionado con ensayos de generadores (Tema 16).

8.5 Característica en vacío

Al funcionar la dínamo de excitación independiente en vacío, coincide la f. e. m. con la tensión en bornes, por lo que esta curva se representará por:

$$E_o = f\ (I_{ex.})$$

para I_i = 0 y N = cte.

8.5.1 *Interpretación de la curva*

La forma de la curva (fig. 8.9) es similar a la curva de magnetismo (ver apartado 5.3.3), distinguiéndose tres partes:

a) Parte inferior de la curva, de forma *rectilínea,* debido a que, para pequeñas corrientes de excitación, la mayor parte de los amperios vuelta son absorbidos por el *entrehierro* siendo en él la permeabilidad constante.

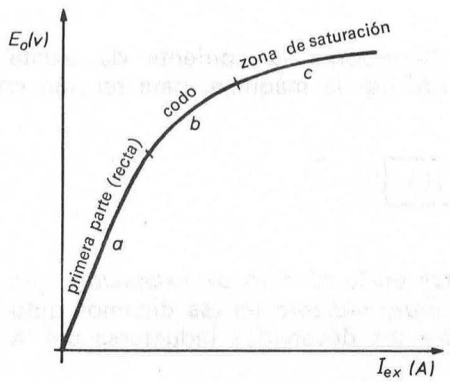


Fig. 8.9 Curva característica de vacío.

Esta parte es muy inestable, por su elevada pendiente, ya que con débiles variaciones de la corriente de excitación ($\Delta I_{ex.1}$) se producen grandes variaciones en la f. e. m. (ΔE_1) (fig. 8.10).

b) Parte intermedia o *codo,* donde comienza la saturación del circuito magnético (de acero, chapa magnética, etc.), perdiéndose la proporcionalidad entre la f. e. m. y la intensidad de excitación.

Esta parte es más estable y suele elegirse como zona de funcionamiento nominal.

c) Parte superior, que vuelve a ser de forma *rectilínea,* por haberse alcanzado la saturación del circuito magnético. En esta parte se observa que un aumento de la corriente de excitación ($\Delta I_{ex.2}$) da lugar a un ligero aumento de la f. e. m. (ΔE_2) (fig. 8.10).

Esta parte es la más estable, pero presenta inconvenientes a la hora de actuar sobre la regulación (control de la tensión).

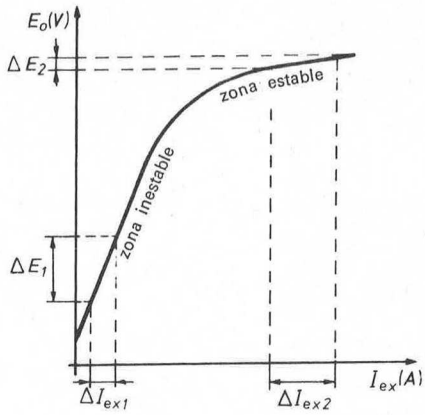


Fig. 8.10 Comprobación de la variación de la f. e. m. en función de la variación de la excitación.

8.5.2 *Ciclo de histéresis del material*

En realidad, la característica de vacío responde al ciclo de histéresis de su material magnético (fig. 8.11) y por ello ha de hacerse variando $I_{ex.}$, desde cero a su valor máximo (curva ascendente 1) y, a continuación, disminuyendo progresivamente $I_{ex.}$, de nuevo a cero (curva descendente 2) (fig. 8.11A). El valor de V_r es la f. e. m. inducida por el magnetismo remanente.

Puede continuarse el ciclo de histéresis invirtiendo el sentido de la corriente de excitación y repitiendo el proceso, obteniéndose el ciclo completo de histéresis (fig. 8.11B).

La curva de magnetismo se toma como valor intermedio de las curvas ascendente y descendente del primer cuadrante (curva 3 de la figura 8.11A).

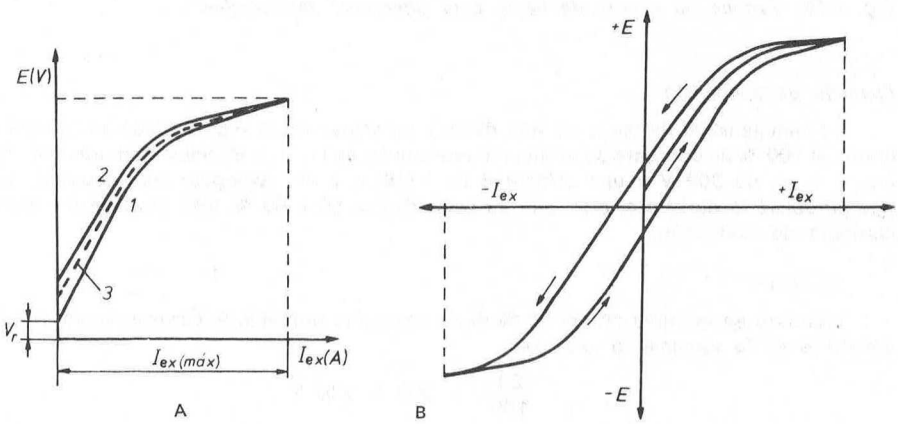


Fig. 8.11 Ciclo de histéresis del material magnético: A, *primer cuadrante;* B, *ciclo completo.*

8.5.3 *Influencia de la velocidad en la curva de vacío*

En la característica de vacío, se ha supuesto constante la velocidad, por lo que existirá una proporcionalidad entre la *f. e. m.* inducida y la corriente de excitación.

Como valor de la velocidad suele tomarse el *nominal,* si bien fijando valores inferiores también se obtendrán curvas de vacío que quedarían por debajo de la nominal (fig. 8.12).

Para una misma corriente de excitación las ff. ee. mm. inducidas a velocidades N_1 y N_2 serán E_1 y E_2 manteniéndose la siguiente relación:

$$E_1 = K \cdot N_1$$

$$E_2 = K \cdot N_2$$

de donde:

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

Por tanto, existe proporcionalidad directa entre las ff. ee. mm. y las velocidades para la misma excitación.

En la figura 8.12 se representa la familia de curvas de vacío de una dínamo, obtenidas al variar la velocidad de rotación desde el 20 al 100 % de la nominal. Tanto la f. e. m. como la corriente de excitación y velocidad se indican en tanto por ciento.

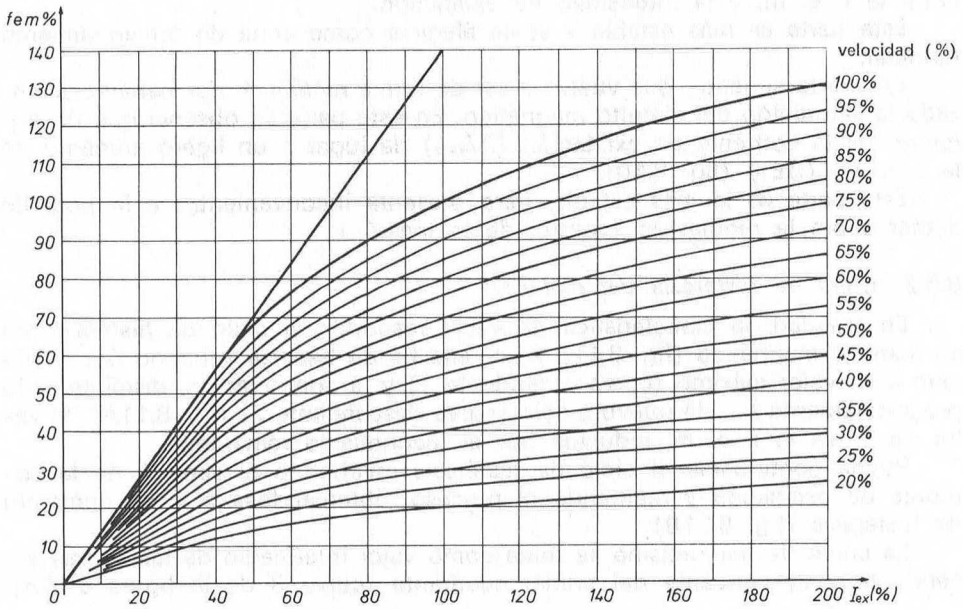


Fig. 8.12 Familia de curvas de vacío para diferentes velocidades.

Ejercicio de aplicación

La característica de vacío de una dínamo coincide con la representada en la figura 8.12, donde el 100 % de corriente de excitación representa, en la curva de velocidad nominal (100 %), una f. e. m. de 300 V y una velocidad de 1 500 r. p m. Averiguar las nuevas ff. ee. mm. que producirá la dínamo al disminuir su velocidad al 80 y 50 %, manteniéndose constante la corriente de excitación.

Solución:

Entrando en la curva con el 80 % de la velocidad nominal, le corresponderá una f. e. m. del 80 % de la nominal, o sea, de

$$\frac{80}{100} \times 300 = 240 \text{ V}$$

Igualmente sucederá en el caso del 50 % de velocidad, correspondiendo el 50 % de f. e. m. que equivale a

$$\frac{50}{100} \times 300 = 150 \text{ V}$$

8.5.4 *Resumen de la característica de vacío*

La característica de vacío permite conocer el grado de saturación de la dínamo, factor por otra parte muy importante en su funcionamiento normal.

También se utilizará la curva de vacío en los métodos indirectos, muy adecuados para la obtención de características en las máquinas de gran potencia.

8.6 Característica en carga

Al funcionar la dínamo de excitación independiente en carga, circulará por el inducido una corriente, I_i, que dará lugar a una caída de tensión interna por dos motivos:

a) Caída de tensión en la resistencia interior del devanado inducido y en las escobillas: $(R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$.

b) Pérdida de tensión por causa de la reacción del inducido.

Las caídas de tensión anteriores dan lugar a una tensión en bornes V_b inferior a la de vacío E_o, viniendo representada aquélla por una curva situada por debajo de la característica de vacío (fig. 8.13).

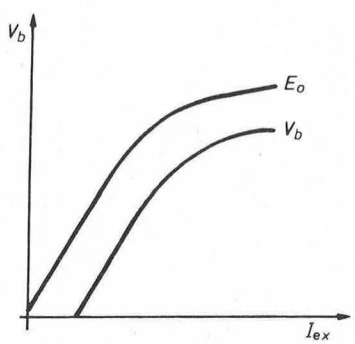


Fig. 8.13 Curvas características de carga y de vacío.

8.6.1 *Análisis de la curva*

La característica en carga, $V_b = f(I_{ex.})$, ha de hacerse para un valor constante de la corriente de carga, pudiendo tomar ésta cualquier valor comprendido entre $I = 0$ y la corriente de plena carga $I_{p.\,c.}$. La forma de la curva será similar en todos los casos, como se observa en la familia de curvas de la figura 8.14.

Al analizar una curva cualquiera, por ejemplo la de $I = I_{p.\,c.}$ (fig. 8.14), cabe señalar el punto de corte de la curva con el eje de abscisas (punto A) llamado *punto de cortocircuito.*

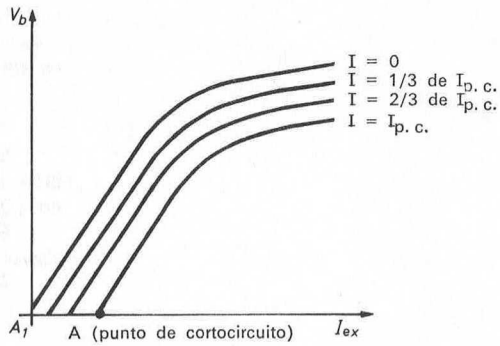


Fig. 8.14 Familia de curvas: $V_b = f(I_{ex.})$ para diferentes valores de intensidad de carga (I).

8.6.1.1 *Punto de cortocircuito*

La expresión de la f. e. m. inducida es siempre:

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + 2\,U_e$$

En el caso de cortocircuito:

$$V_b = 0$$

$$\boxed{E_{cc} = (R_i \cdot I_i) + 2\,U_e}$$

Así, pues, el punto de cortocircuito *A* representa la función en un caso especial de valor nulo para la tensión en bornes.

La corriente de excitación A_1A (fig. 8.14) producirá el campo magnético capaz de compensar la reacción de inducido y crear una f. e. m. (E_{cc}). La E_{cc} dará lugar al paso de la corriente $I_{p.\,c.}$ por el inducido, compensando así la caída de tensión $(R_i \cdot I_i) + 2\,U_e$.

8.6.2 *Reparto de caídas de tensión*

Si se representan, en un mismo sistema de ejes, las características de vacío y carga, podrá conocerse la caída de tensión por reacción de inducido (fig. 8.15).

La característica de la f. e. m. en carga $E = f(I_{ex.})$ puede obtenerse sumando a la característica $V_b = f(I_{ex.})$, el término constante: $(R_i \cdot I_i) + 2\,U_e$.

Para una corriente de excitación *OA*, la tensión en bornes en carga es *AB*, mientras que en vacío será *AD*. La caída de tensión total es, pues, la diferencia entre las tensiones de vacío y carga: AD − AB = DB.

Restando a *BD* la caída de tensión *BC* $(R_i \cdot I_i) + 2\,U_e$, quedará la caída de tensión por reacción de inducido *CD*. Las pérdidas de tensión por reacción de inducido no se mantienen constantes para cada valor de I_i.

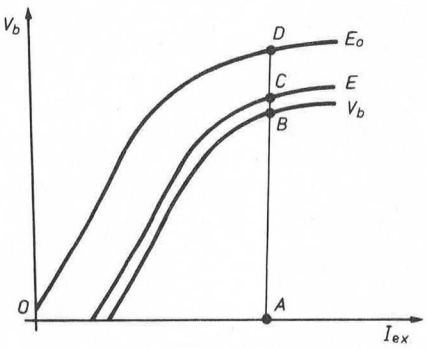


Fig. 8.15 Reparto de las caídas de tensión.

8.6.3 *Determinación de los ampervueltas inductores*

A partir de las curvas características (E_o, E, V_b), pueden deducirse los ampervueltas inductores necesarios para que no se produzca variación de tensión en el funcionamiento de vacío a plena carga (fig. 8.16). El eje de abscisas representa ahora los ampervueltas inductores, por ser proporcionales a $I_{ex.}$.

Para obtener la tensión en bornes de plena carga V_b, es necesario suministrar los ampervueltas inductores X_T, mientras que para obtener esa tensión en vacío son suficientes los X_v (ver Tema 5), según indica el sentido de las flechas.

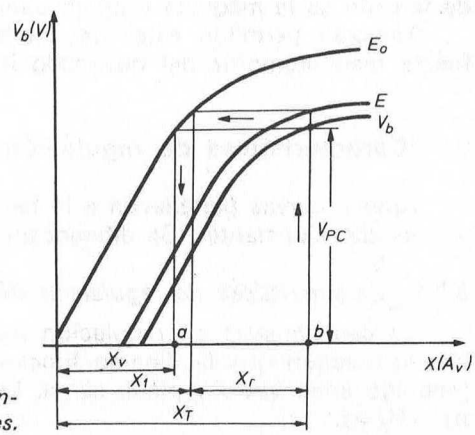


Fig. 8.16 Ampervuelta inductores.

Para obtener la f. e m E a plena carga, son necesarios los ampervueltas X_1. Por tanto, la diferencia entre X_T y X_1 serán los ampervueltas que compensarán la reacción de inducido X_r:

$$\boxed{X_r = X_T - X_1}$$

Ejercicio de aplicación

Una dínamo de excitación independiente, cuando gira a 600 r. p. m., suministra una potencia de 100 kW a 500 V. Averiguar la velocidad que habrá de proporcionarle el motor de arrastre, cuando haya de suministrar 200 kW a la misma red y a la misma tensión (500 V). Considerar solamente la caída de tensión óhmica en el inducido. La resistencia interior del inducido es de 0,06 Ω.

Solución:

Según el enunciado, se supone que el inducido de la dínamo está conectado en derivación con otros generadores, a través de una línea, y por ello se mantiene la tensión constante en 500 V.

En definitiva, el aumento de la carga exigirá una *velocidad superior* a 600 r. p. m., por ser mayores las caídas de tensión.

Admitiendo la proporcionalidad entre las ff. ee. mm. y las velocidades:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}; \quad N_2 = N_1 \cdot \frac{E_2}{E_1}$$

en donde:

N_2 = velocidad desconocida
N_1 = 600 r. p. m.

Para averiguar las ff. ee. mm., es necesario conocer las intensidades suministradas por el inducido en ambos casos:

1.er caso:

$$I_1 = \frac{P}{V_b} = \frac{100\,000}{500} = 200 \text{ A}$$

$$E_1 = V_b + R_i \cdot I_1 = 500 + 0{,}06 \times 200 = 512 \text{ V}$$

2.º caso:

$$I_2 = \frac{P}{V_b} = \frac{200\,000}{500} = 400 \text{ A}$$

$$E_2 = V_b + (R_i \cdot I_2) = 500 + (0{,}06 \times 400) = 524 \text{ V}$$

Sustituyendo en la expresión anterior:

$$N_2 = 600 \times \frac{524}{512} = 614 \text{ r. p. m.}$$

Dado que la nueva velocidad está comprendida dentro del margen de variación admisible (10 %), se considera correcto el resultado.

8.6.4 *Resumen*

La característica en carga junto a la de vacío permiten averiguar las caídas de tensión de la máquina y principalmente comprobar la reacción del inducido.

También permiten estas características la determinación en carga de la fuerza magnetomotriz del devanado inductor.

8.7 Características de regulación y de cortocircuito

Ambas curvas pertenecen a la familia: $I_{ex.} = f(I_i)$, para tensión en bornes y velocidad constantes. Se diferencian en el valor de la tensión en bornes.

8.7.1 *Características de regulación de la dínamo de excitación independiente*

La característica de regulación indica la variación en la corriente de excitación, según que la dínamo funcione en cualquier régimen de carga comprendido entre vacío y plena carga. La tensión suele fijarse en su *valor nominal* ($V_{p.\,c.}$).

8.7.1.1 *Interpretación de la curva*

La curva de regulación (fig. 8.17) corta el eje de ordenadas en el punto *A*, que corresponde a la corriente de excitación (*aA*) necesaria para suministrar la tensión en bornes en vacío E_0.

El punto *B* de la curva corresponde a la corriente de excitación (*bB*) necesaria para suministrar la tensión en bornes cuando la dínamo suministra la corriente de plena carga ($I_{p.\,c.}$).

La curva de regulación permite conocer la fuerza magnetomotriz del circuito inductor necesaria para cualquier valor de intensidad de carga.

Los puntos *A* y *B* de la curva (fig. 8.17) coinciden con los *a* y *b* de las características E_0 y V_b de la figura 8.16, por ser ambas las excitaciones necesarias para producir la tensión nominal.

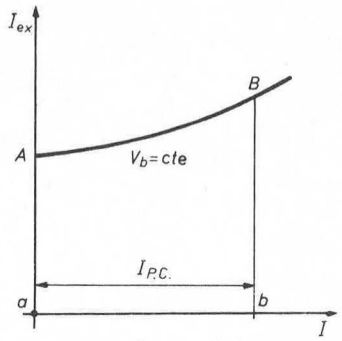


Fig. 8.17 Característica de regulación.

8.7.2 *Característica de cortocircuito de la dínamo de excitación independiente*

La característica de cortocircuito representa la corriente que ha de circular por el circuito inductor para que el inducido suministre la corriente I_i, con los bornes puestos en cortocircuito, cumpliéndose que:

$$E_{cc} = (R_i \cdot I_i) + 2\,U_e$$

$$\boxed{I_i = \frac{E_{cc} - 2\,U_e}{R_i}}$$

en donde:

E_{cc} = f. e. m. inducida en cortocircuito
R_i = resistencia interior del devanado

Dado el pequeño valor de la magnitud R_i, principalmente en las máquinas grandes, se desprende la importancia de realizar el ensayo con una *corriente de excitación mínima* para evitar que la f. e. m. alcance valores elevados.

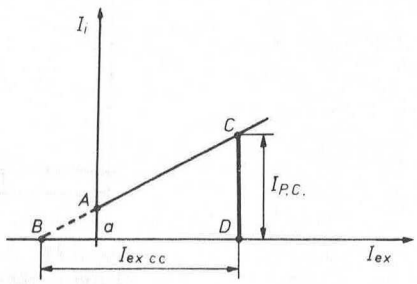


Fig. 8.18 Característica de cortocircuito.

8.7.2.1 *Análisis de la característica de cortocircuito*

La característica de cortocircuito (fig. 8.18) es una *recta,* por ser proporcionales la f. e. m. E_{cc} y la intensidad I_i. La proporcionalidad es debida al bajo valor de la f. e. m. ya que entonces la máquina trabaja en la parte rectilínea de la curva de magnetismo.

La característica corta el eje de ordenadas en el punto *A* (fig. 8.18), indicando que, a pesar de ser nula la corriente de excitación, circula por el inducido la corriente *aA*. El paso de esta corriente *aA* es debido a que se induce una f. e. m. por causa del magnetismo remanente.

El punto *C* corresponde al paso de la corriente de plena carga por el inducido ($I_{p.\,c.}$).

Para averiguar la corriente de excitación $I_{ex.\,cc}$ necesaria para que circule la corriente de plena carga por el inducido, ha de prolongarse la recta *CA* hasta su corte con el eje de abscisas en el punto *B*. Así, pues, la corriente de excitación *BD* incluye el efecto del magnetismo remanente *Ba* y la corriente que circula por el devanado inductor *aD*.

Con la característica de cortocircuito se conocen los puntos de cortocircuito que se corresponden con las características de carga. Así, el segmento A_1A de la figura 8.14 corresponde al segmento *BD* de la figura 8.18.

8.8 Características exterior e interior

En realidad, la curva característica real es la exterior, $V_b = f\,(I)$, mientras que la característica interior, $E = f\,(I_i)$, se obtiene por cálculo a partir de la anterior.

8.8.1 *Característica exterior de la dínamo de excitación independiente*

La característica externa indica cómo va disminuyendo la tensión en bornes de la carga a medida que aumenta la intensidad absorbida por los receptores (*I*), permaneciendo constantes la corriente de excitación y la velocidad del inducido.

8.8.1.1 *Estudio de la curva*

La curva se representa tomando el eje de abscisas para la intensidad de carga (I) y el de ordenadas para la tensión en bornes (V_b), como indica la figura 8.19.

La horizontal (E_o) representa la tensión que esta dínamo produce en vacío (I = 0), permitiendo así comprobar, por diferencia entre ambas, para cualquier valor de carga, la caída de tensión total en el generador. Así, en el funcionamiento a plena carga, indicado por el punto *B* en la curva, la caída de tensión será: AC − BC = AB.

Cuando la carga alcanza valores elevados ($I \gg I_{p.\,c.}$), aumenta tanto la caída de tensión interna, principalmente por reacción de inducido, que la tensión es próxima a cero. Si el valor de la intensidad sigue aumentando, se llegará al punto de cortocircuito *D* en el que la tensión es nula ($V_b = 0$). El funcionamiento en cortocircuito daría lugar a graves averías en el inducido por causa de la elevada intensidad I_{cc}.

Si la dínamo dispone de polos de conmutación y devanados de compensación, se contrarrestará la reacción de inducido, y la caída de tensión (Δv) se reducirá a: $I \cdot (R_i + R_p) + 2\,U_e$. Esto dará lugar a una nueva característica $V_b = f(I)$ con menos inclinación y prácticamente recta (fig. 8.20).

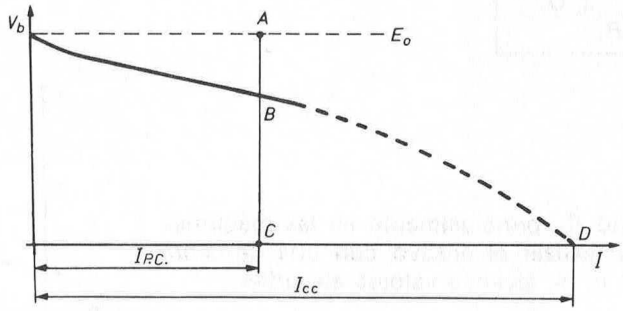


Fig. 8.19 Característica exterior de una dínamo de excitación independiente.

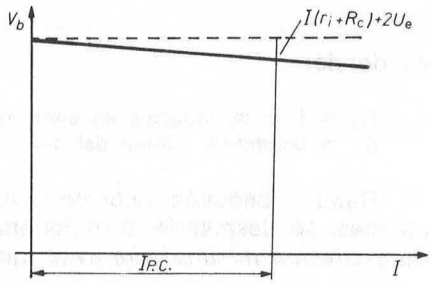


Fig. 8.20 Característica exterior con reacción de inducido neutralizada.

8.8.1.2 *Coeficiente de regulación*

Para comprobar y comparar las caídas de tensión entre dínamos, se definen los conceptos siguientes:

1.º *Variación absoluta de tensión.* Indica la variación algebraica de la tensión en bornes entre el funcionamiento en vacío y a plena carga, para excitación y velocidad constantes. Ejemplo: en una dínamo que genera en vacío 420 V y a plena carga 400 V, manteniendo constantes $I_{ex.}$ y N, habrá una variación absoluta de: 420 − 400 = 20 V.

2.º *Variación relativa* de tensión o *coeficiente de regulación,* para una carga determinada. Es el cociente entre la variación absoluta y la tensión de plena carga, multiplicado por 100:

$$\varepsilon\,\% = \frac{E_o - V_b}{V_b} \cdot 100$$

Así, en el ejemplo del apartado anterior, sería:

$$\varepsilon\,\% = \frac{420 - 400}{400} \cdot 100 = 5\,\%$$

El coeficiente de regulación depende del tipo de máquina, si bien disminuye a medida que aumenta su potencia.

8.8.2 *Característica interior de la dínamo de excitación independiente*

La característica interior indica cómo disminuye la f. e. m. generada en el inducido, cuando aumenta la carga.

La magnitud f. e. m. se obtiene sumando, a la característica exterior, el

término variable; en este caso, $(R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$ (sin polos de conmutación) ya que la relación entre E y V_b es:

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$$

En la figura 8.21 se representa la característica interior (curva 2), comprobándose que su forma es muy similar a la característica exterior (curva 1).

La característica interior está comprendida entre la exterior y la de vacío, sirviendo cualquiera de sus puntos para conocer la *distribución de caídas de tensión.*

En el funcionamiento a plena carga (punto *C*), las caídas de tensión son (fig. 8.21):

BF = Caída de tensión $(R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$.
FA = Caída de tensión por reacción de inducido.

En cualquier otro punto las caídas de tensión por reacción de inducido serán la diferencia de ordenadas entre las curvas 3 y 2.

En el funcionamiento en cortocircuito (*D*), se observa, en la figura 8.21, que la f. e. m. no es nula, según se deduce de la expresión:

$$E_{cc} = V_b + [(R_i \cdot I_i) + 2\ U_e] = (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$$

en donde: $V_b = 0$.

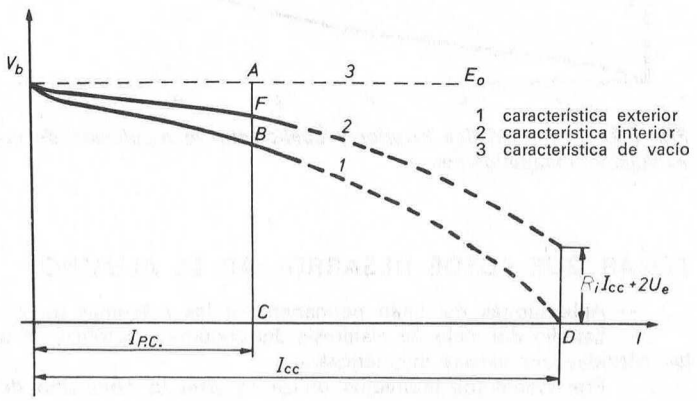


Fig. 8.21 Características exterior e interior.

Ejercicio de aplicación

Una dínamo de excitación independiente, con excitación y velocidad nominales, genera las tensiones en bornes: 125, 121, 119, 117, 114, 110 y 103 V, cuando suministra una corriente exterior de: 0, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 A, respectivamente. La dínamo suministra a plena carga una potencia de 1,5 CV a 110 V.

Determinar:

1.° La representación gráfica de la característica externa.

2.° El coeficiente de regulación a plena carga.

3.° La gráfica correspondiente al coeficiente de regulación en función de la carga: $\varepsilon = f(I)$.

Solución.

1.° La representación de la característica exterior se realiza tomando en el eje de ordenadas la tensión en bornes y en el eje de abscisas la corriente de carga, como indica la figura 8.22. En la parte superior se ha representado la horizontal E_o, que representa la tensión de vacío.

2.° A plena carga, la corriente suministrada por la máquina será:

$$I_{p.\,c.} = \frac{P}{V_b} = \frac{1{,}5 \times 736}{110} = 10\ A$$

El coeficiente de regulación es:

$$\varepsilon = \frac{E_o - V_b}{V_b} = \frac{125 - 110}{110} \times 100 = 13{,}63\ \%$$

3.º El coeficiente de regulación se calcula para cada valor de la carga.
Ejemplo: para carga de 4 A, será:

$$\varepsilon = \frac{125 - 119}{119} \times 100 = 5{,}04\ \%$$

Los valores obtenidos para ε, en función de la carga en sentido creciente, son:

ε (%): 0, 3,3, 5,04, 6,83, 9,64, 13,63, 21,35
I (A): 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12

La gráfica del coeficiente de regulación se ha realizado tomando como ejes los mismos de la característica exterior de la figura 8.22, si bien, en el eje de ordenadas, se ha elegido una escala diferente.

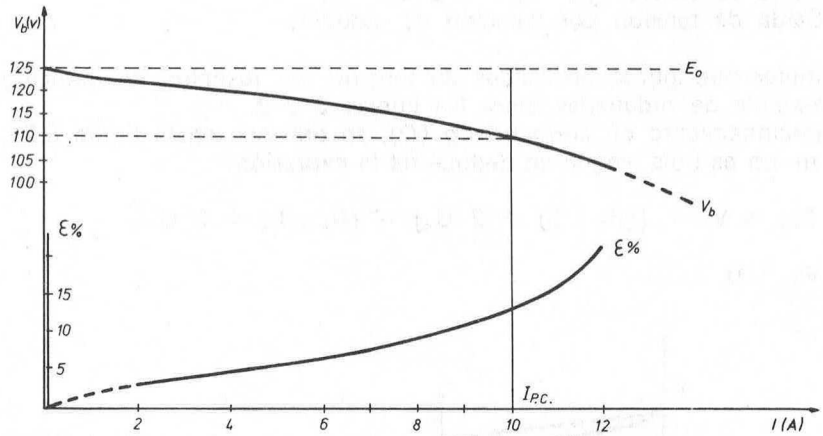


Fig. 8.22 Característica exterior y coeficiente de regulación de una dínamo de excitación independiente.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Aplicaciones del imán permanente a las máquinas de c. c.
— Estudio del ciclo de histéresis del circuito magnético de una dínamo. Deducción de las pérdidas por causas magnéticas.
— Procedimientos indirectos utilizados para la obtención de curvas características en las máquinas de gran potencia.

CUESTIONARIO

8.1 Explicar el fundamento de la dínamo taquimétrica.
8.2 Dibujar el circuito inductor de una dínamo tetrapolar conectada en derivación, indicando las conexiones del devanado inductor. La máquina dispone de polos de conmutación.
8.3 Una dínamo de excitación shunt alimenta un circuito formado por 100 lámparas de 100 W a 200 V. Hallar la tensión que generará al funcionar en vacío, sin tener en cuenta la reacción de inducido. Las resistencias de los diferentes circuitos son: $R_d = 100\ \Omega$, $R_i = 0{,}06\ \Omega$, $R_p = 0{,}04\ \Omega$.
Respuesta: E = 205,2 V.
8.4 Dibujar el esquema de conexiones de una dínamo hexapolar, tipo serie y con polos de conmutación.
8.5 Representar gráficamente el esquema eléctrico del circuito inductor e inducido correspondiente a una dínamo tetrapolar tipo compound normal (derivación larga) sin polos de conmutación.
8.6 Una dínamo compound (derivación corta) alimenta una carga de 4 kW a 100 V. Averiguar el valor de la resistencia del devanado en derivación para generar una f. e. m. de 108,2 V. Las resistencias del devanado serie y del inducido son: $R_s = 0{,}05\ \Omega$, $R_i = 0{,}1\ \Omega$; la caída de tensión por escobillas es de 2 V.
Respuesta: 51 Ω.
8.7 Explicar la forma de obtener la familia de curvas de vacío en una dínamo de excitación independiente, para diferentes valores de velocidad.
8.8 ¿Por qué motivo la característica de cortocircuito sólo puede obtenerse haciendo independiente el circuito de excitación de cualquier dínamo?
8.9 Explicar cuáles son los puntos comunes de todas las características de un generador de excitación independiente obtenidas en carga.
8.10 ¿En qué se diferencia la característica interior del resto de las características?

8.11 De una dínamo de excitación independiente, cuya corriente de plena es 180 A, R_p = 0,02 Ω, R_i = 0,08 Ω, 2 U_e = 2 V, se conocen cuatro puntos correspondientes a su característica de vacío y el punto *A* de cortocircuito:

E_0 (V): 0, 30, 60, 90
$I_{ex.}$ (A): 0, 0,2, 0,4, 0,6
Punto A: $I_{ex.}$ = 0,5 A (pertenece a la característica de plena carga)

Determinar gráficamente la corriente de excitación que neutralizará el efecto de la reacción de inducido, al funcionar el generador en el punto de cortocircuito señalado.

Respuesta: 0,36 A.

8.12 Razonar en qué zonas de las curvas características disminuirá la velocidad de la máquina de arrastre del generador. Referirse solamente a causas motivadas por el generador.

8.13 De una dínamo de excitación independiente, se conocen varios puntos de la característica de regulación:

$I_{ex.}$ (A): 5, 5,5, 6, 7, 8
I (A): 0, 40, 70, 110, 150

El circuito de excitación está conectado a una tensión constante de 400 V y dispone de un reóstato R_r conectado en serie con el devanado inductor. En el funcionamiento a plena carga, la resistencia de R_r es nula. Se supondrá siempre nula la variación de la resistencia por efecto de temperatura.

Determinar:

1.° Las resistencias del devanado de excitación y del reóstato, en el funcionamiento a plena carga.

2.° La resistencia del reóstato, cuando la carga se reduzca a la mitad manteniéndose la tensión en bornes constante.

Respuestas: 1.° $R_{ex.}$ = 50 Ω, R_r = 30 Ω; 2.° R_r = 14,51 Ω.

8.14 De una dínamo de excitación independiente, se conocen las características de vacío y de plena carga por los valores siguientes:

$I_{ex.}$ (A): 0, 0,2, 0,4, 0,64, 1,04, 1,36
V_b (V): 0, 0, 32, 68, 92, 96
E_0 (V): 0, 48, 72, 96, 112, 116

La resistencia del circuito de excitación a plena carga es de 100 Ω, disipando unas pérdidas Joule de 144 W en dicho circuito.

Determinar el coeficiente de regulación de la dínamo en su funcionamiento a plena carga.

Respuesta: 34,5 %.

8.15 Dados los valores de la característica exterior de un generador de excitación independiente:

V_b (V): 120, 114, 110, 104, 98
I (A): 0, 5, 10, 15, 20

determinar:

1.° La gráfica V_b = f (I).

2.° El coeficiente de regulación para las diferentes intensidades.

BIBLIOGRAFIA

UNE, *Instituto Nacional de Racionalización y Normalización,* Madrid.

MORILLO J., *Curso de Electricidad I,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.

KOSTENKO M., *Máquinas eléctricas I,* Montaner y Simón, S. A., Barcelona 1968.

Teoría, cálculo y construcción de máquinas eléctricas de corriente continua, Ed. Labor, Barcelona 1966.

Tema 9

Características de los generadores autoexcitados

OBJETIVOS

— *Definir la recta del inductor de un generador en derivación.*
— *Analizar el fenómeno de autoexcitación en el generador derivación.*
— *Identificar e interpretar las curvas características del generador derivación.*
— *Comparar el generador serie funcionando en carga con el generador derivación en vacío.*
— *Apreciar la inestabilidad del generador con excitación en serie.*
— *Clasificar los diferentes tipos de generadores con excitación mixta.*
— *Comparar los generadores por sus curvas características.*

GUION

— Estudio de la dínamo con excitación en derivación.
— Dínamo con excitación en serie.
— Dínamo con excitación mixta o compound.
— Comparación y aplicación de los principales tipos de generadores.

PUNTOS CLAVE

— Analizar el funcionamiento del generador con excitación en derivación.
— Justificar la escasa aceptación del generador serie.
— Valorar la importancia del generador compound.
— Deducir las aplicaciones de los diferentes tipos de generadores a través de sus curvas características.

EXPOSICION DEL TEMA

9.1 Estudio de la dínamo con excitación en derivación

Este generador presenta las ventajas de no necesitar una fuente de alimentación para el circuito de excitación y el suministrar una tensión bastante estable en la zona próxima a la plena carga.

El estudio del generador con excitación shunt se logra a través de sus curvas características.

9.1.1 *Característica en vacío*

Al funcionar la máquina en vacío, circula por el inducido la corriente de excitación, por lo que en esta máquina no se cumplirá con exactitud la condición de ser nula la corriente de carga. No obstante, dado el pequeño valor en magnitud de $I_{ex.}$, en comparación con la corriente de carga I, puede afirmarse que la curva característica se obtiene prácticamente en vacío.

La forma de la curva (fig. 9.1) es similar a la obtenida en la dínamo de excitación independiente, distinguiéndose por ello las tres zonas peculiares.

La curva vendrá dada por la función $V_o = f(I_{ex.})$, en donde $I \approx 0$ y $N = cte$.

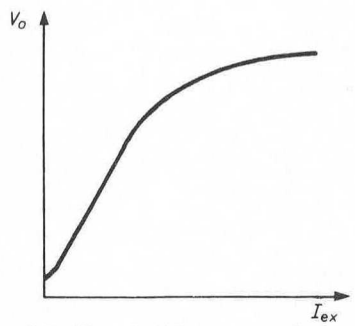


Fig. 9.1 Característica en vacío de una dínamo derivación.

9.1.1.1 *Proceso de autoexcitación en la dínamo derivación*

La excitación de la dínamo derivación se produce por el magnetismo remanente del circuito magnético, como se explicó en el tema anterior (apartado 8.2.2).

El magnetismo remanente da lugar a una f. e. m. que, a su vez, refuerza el flujo, y por ello se produce un aumento de f. e. m. El proceso se repite hasta llegar a la saturación del circuito magnético.

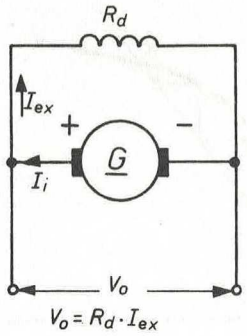


Fig. 9.2 Esquema de conexión de la dínamo derivación.

9.1.1.2 *Recta del inductor*

Según el esquema de conexión del generador derivación (fig. 9.2), en el punto de saturación *A* de la figura 9.3, se cumplirá que:

$$V_o = R_d \cdot I_{ex}.$$

Gráficamente corresponde a una recta que pasa por el origen y forma con el eje de abscisas un ángulo α. Esta recta se denomina *recta del inductor.*

El punto de saturación *A* puede determinarse gráficamente con ayuda de la curva de vacío y la *recta del inductor.*

Representando la ecuación de la recta y la característica de vacío (fig. 9.3), se cortarán en el punto *A*, que corresponde al valor de la tensión final del generador en su funcionamiento normal.

Según la figura 9.3, la recta del inductor forma un ángulo α, con la horizontal, por lo que:

$$\text{tg } \alpha = \frac{V_o}{I_{ex.}} = R_d$$

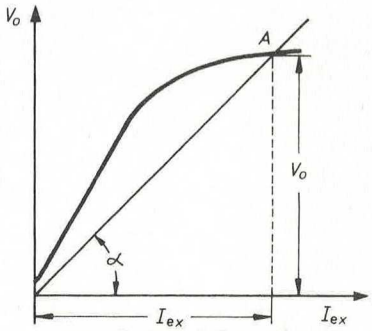


Fig. 9.3 Característica de vacío y recta del inductor de la dínamo derivación.

Para cada valor de la resistencia del circuito de excitación, corresponderá una recta con diferentes pendientes, que pasará siempre por el origen de coordenadas, como son las rectas *a, b, c, d* y *e* de la figura 9.4.

Si se intercala una resistencia variable R_r en serie con la resistencia de excitación R_d, el ángulo α aumentará y el punto de intersección *A* descenderá por la característica de vacío, ocupando las posiciones A_1, A_2, A_3, etc. (fig. 9.4).

9.1.1.3 *Resistencia crítica*

En el circuito de excitación de cada generador derivación existe un valor para la resistencia denominado *crítico,* cuya recta del inductor *d* (fig. 9.4) parte del origen de coordenadas y es tangente a la parte rectilínea de la característica de vacío. Así pues:

$$R_{\text{crítica}} = \text{tg } \beta$$

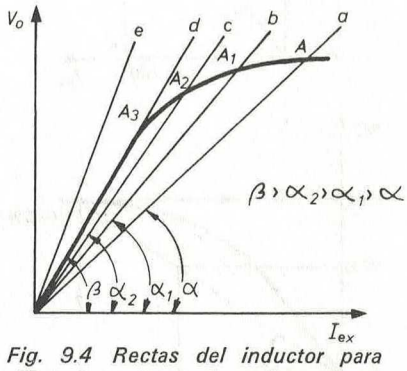


Fig. 9.4 Rectas del inductor para diferentes valores de resistencia en el circuito de excitación.

Para cualquier resistencia de excitación superior a la crítica, el funcionamiento será inestable, como sucede con la recta *e* (fig. 9.4), y la tensión disminuirá casi a cero (excepto la producida por magnetismo remanente).

Para que la intensidad de excitación sea la mínima posible, el devanado inductor ha de tener una resistencia considerable, siendo necesarias para su construcción muchas espiras de hilo fino.

9.1.1.4 *Resumen de la autoexcitación*

La producción de f. e. m. en el generador se debe al magnetismo remanente. Al principio, el generador gira a su velocidad normal y con el circuito de excitación abierto (fig. 9.5), por lo que se engendrará la tensión V_{OA} (fig. 9.6). Al cerrar el circuito de excitación, circulará la corriente de excitación I_{OB}:

$$I_{OB} = \frac{V_{OA}}{R_d}$$

A su vez, la corriente I_{OB} aumentará la f. e. m. al valor V_{OC}, y ésta hará circular la corriente I_{OD}. El proceso se repite de forma automática, como indican los tramos comprendidos entre la recta del inductor y la curva de vacío.

El equilibrio se alcanza en el punto *A*, que corresponde a la intersección de la curva de vacío con la recta del inductor.

Dado que las variaciones de tensión y corriente suceden a la vez, la gráfica de la tensión corresponde a la curva de vacío y no a los tramos citados en el estudio anterior.

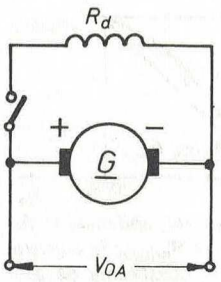


Fig. 9.5 Circuito de excitación abierto.

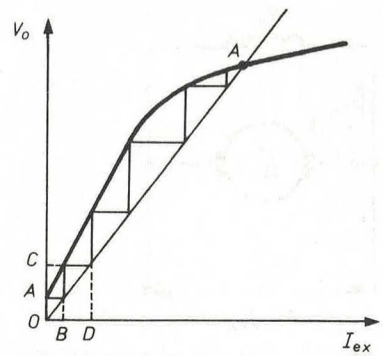


Fig. 9.6 Proceso de autoexcitación de la dínamo derivación.

Ejercicio de aplicación

En un generador derivación que gira a 1 000 r. p. m., se ha obtenido su característica de vacío y coincide con la curva de la figura 8.12, para N = 100 %. En esta dínamo el 100 % de tensión equivale a una f. e m de 100 V, mientras que el 100 % de corriente de excitación equivale a 2 A. Averiguar:

1.° La resistencia crítica a la velocidad normal.
2.° La f. e. m. inducida para una resistencia de excitación R_d = 35 Ω.
3.° La resistencia del circuito de excitación para la tensión y velocidad nominales.

Solución:

1.° Observando la familia de curvas de la figura 8.12, la tangente a la curva de la velocidad normal (N = 100 %), forma con la corriente de excitación del 100 % el triángulo (OJK) (fig. 9.7A), cuya ordenada corresponde al 140 % de la f. e. m. El valor de la resistencia crítica será:

$$R_{crítica} = \text{tg } \beta = \frac{JK}{OK}$$

$$R_{crítica} = \frac{140}{2} = 70\ \Omega$$

en donde:

JK = 140 % de 100 V = 140 V
OK = 100 % de 2 A = 2 A

2.° La tensión de excitación será:

$$V_b = R_d \cdot I = 35 \times 2 = 70\ V$$

Como:

$$\left.\begin{array}{l} 100\ \% \text{ ——— } 100\ V \\ x \text{ ——— } 70 \end{array}\right\} \quad x = 70\ \%$$

Se traza la recta *OB* (fig. 9.7B), siendo las coordenadas del punto *B*:

$$I_{ex.} = 100\ \%; \quad \text{f. e. m.} = 70\ \%$$

Al prolongar la recta *OB*, cortará la curva del 100 % de velocidad en el punto *A*, que corresponde al 126 % de f. e. m. y al 180 % de excitación.

Así pues, la f. e. m., inducida para R_d = 35 Ω, será:

$$\left.\begin{array}{l} 100\ \% \text{ ——— } 100\ V \\ 126\ \% \text{ ——— } x \end{array}\right\} \quad x = 126\ V$$

La corriente de excitación necesaria para R_d = 35 Ω será:

$$\left.\begin{array}{l} 100\ \% \text{ ——— } 2\ A \\ 180\ \% \text{ ——— } x \end{array}\right\} \quad x = 3{,}6\ A$$

Se ha de cumplir que la resistencia de excitación coincida con tg α, sirviendo a la vez de comprobación:

$$\text{tg } \alpha = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{126}{3{,}6} = 35\ \Omega = R_d$$

3.° La resistencia de excitación $R_{ex.}$ (fig. 9.7C) será:

$$R_{ex.} = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{100}{2} = 50\ \Omega$$

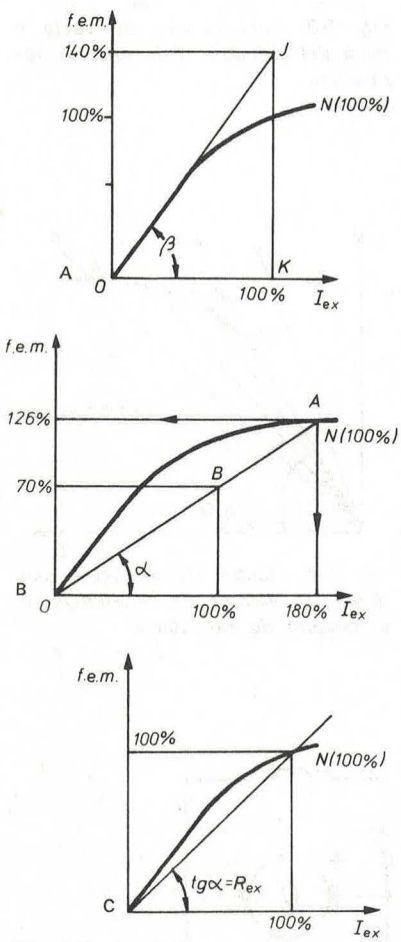


Fig. 9.7 Ejercicio de aplicación: A, *cálculo gráfico de la* $R_{crítica}$; B, *cálculo de f. e. m. para la resistencia de excitación* R_d; C, *cálculo de la resistencia del circuito de excitación.*

9.1.1.5 *Influencia de la velocidad en la curva de vacío*

A diferencia de la máquina de excitación independiente, aquí no se mantiene la proporcionalidad entre las ff. ee. mm. a diferentes velocidades, debido a que el flujo no se mantiene constante. Así, pues, si la máquina genera una f. e. m. E_1 al girar a una velocidad N_1, cuando varíe la velocidad y tome el valor N_2, se cumplirá que:

$$\frac{E_1}{E_2} \neq \frac{N_1}{N_2}$$

Recordando la expresión general para la f. e. m.:

$$E = \Phi \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

se mantendrán las siguientes relaciones:

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= K_1 \cdot \Phi_1 \cdot N_1 \\ E_2 &= K_2 \cdot \Phi_2 \cdot N_2 \end{aligned}\right\}$$

En donde:

$$K_1 = K_2 = n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

De donde:

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{\Phi_1 \cdot N_1}{\Phi_2 \cdot N_2}}$$

Para la misma corriente de excitación, se cumplirá que:

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

Resumen. Al disminuir la velocidad, disminuye la f. e. m. por doble motivo:

1.º Por existir proporcionalidad entre *E* y *N*.

2.º Por disminución de la tensión de excitación que, a su vez, motivará la disminución del flujo inductor. También en este caso hay proporcionalidad entre el flujo inductor y la f. e. m.

Si disminuye la velocidad de forma muy acusada, puede dar lugar a la anulación de la excitación, designándose tal velocidad como *crítica.*

Velocidad crítica es, pues, aquélla que motiva la pérdida de excitación en la dínamo, por lo cual su curva de vacío debe ser tangente a la recta del inductor de la curva de vacío nominal (normal).

Ejercicio de aplicación

Averiguar la velocidad crítica correspondiente al ejercicio anterior (apartado 9.1.1.4), atendiendo a su funcionamiento nominal.

Solución:

Según la figura 8.12 la parte rectilínea de la curva que es tangente a la recta del inductor trazada para la marcha normal ($I_{ex.}$ = 100 %, f. e. m. = 100 %, N = 100 %), corresponde a la curva del 70 % de velocidad (fig. 9.8). El valor de la velocidad crítica se deducirá a partir de dicha curva:

Como:

$$\left.\begin{aligned} 100\ \% &\text{ ——— } 1\,000 \text{ r. p. m.} \\ 70\ \% &\text{ ——— } N_{crítica} \end{aligned}\right\} \quad N_{crítica} = 700 \text{ r. p. m.}$$

9.1.2 *Característica en carga* $V_b = f\ (I_{ex.})$

Es muy similar a la característica en carga de la máquina de excitación independiente (apartado 8.6), si bien hay alguna variación. En efecto, mientras que en el generador de excitación independiente coincidían la corriente exterior *I* y la del inducido I_i, en el generador derivación no coinciden, cumpliéndose que:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

No obstante, debido a que la corriente de excitación suele ser muy inferior a la corriente exterior, será mínimo el error cometido al suponer iguales I_i e *I*.

En la figura 9.9 se representa la familia de curvas $V_b = f\ (I_{ex.})$, para distintos valores de corriente exterior, apreciándose en ellas un paralelismo con las obtenidas en la dínamo independiente (fig. 8.14), excepto en la parte in-

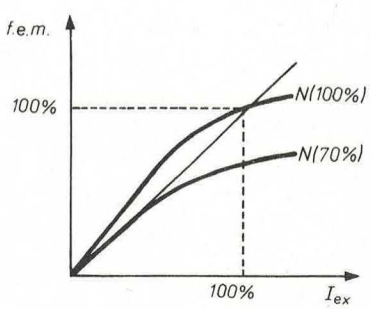


Fig. 9.8 Curva característica de velocidad crítica.

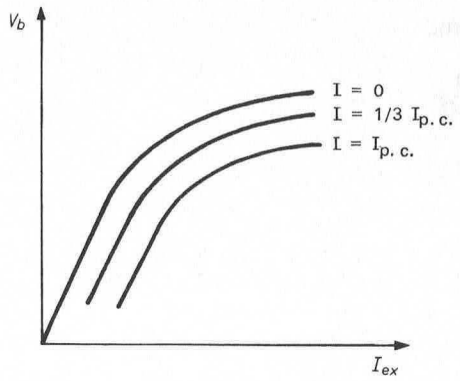


Fig. 9.9 Familia de curvas de la característica de carga.

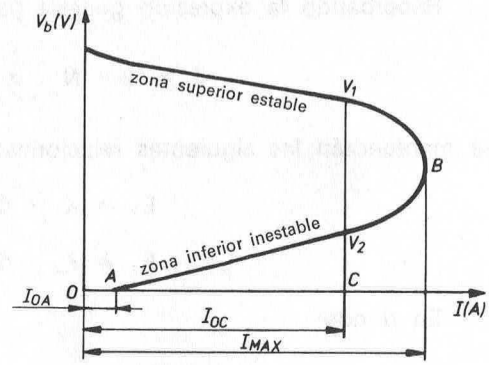


Fig. 9.10 Característica exterior de la dínamo derivación.

ferior, por la imposibilidad de obtener el punto de cortocircuito en el generador derivación.

La diferencia entre la característica de vacío y la de carga da la caída de tensión que se produce en el generador.

9.1.3 *Características de regulación y de cortocircuito*

La característica de regulación $I_{ex.} = f(I_i)$ es también similar a la curva de la dínamo independiente, y por ello permite averiguar la excitación necesaria para cualquier carga.

La característica de cortocircuito solamente podrá obtenerse si se alimenta el circuito de excitación con una fuente independiente al generador.

9.1.4 *Característica exterior*

La característica exterior $V_b = f(I)$ no puede cumplir la condición de mantener la corriente de excitación $I_{ex.}$ constante, por variar ésta con la tensión en bornes V_b. Normalmente, se toma como constante la resistencia del circuito de excitación R_d.

En la figura 9.10 se muestra la característica exterior de una dínamo derivación, en la que se pueden apreciar algunas diferencias, con respecto a la obtenida para la dínamo independiente (fig. 8.19), como son:

1.ª *Descenso más acusado en la tensión* al pasar de funcionamiento en vacío al de carga. Este descenso es causado por la disminución del flujo, como consecuencia de disminución en la tensión aplicada al circuito de excitación.

2.ª *Crecimiento limitado de la corriente de carga,* ya que la corriente exterior alcanza como valor máximo de 2 a 2,5 veces la corriente nominal (punto *B*). Si a partir del punto *B* se disminuye la resistencia del circuito exterior, la corriente de carga disminuirá, pasando por una zona de inestabilidad, hasta alcanzar el punto *A*, que corresponderá al funcionamiento en *cortocircuito.* La corriente exterior I_{OA} se debe a la existencia de una f. e. m. que genera el magnetismo remanente.

El límite en el aumento de la corriente exterior es debido al predominio de la caída de tensión, por reacción de inducido y caída óhmica, frente a la f. e. m. generada.

3.ª *Obtención de dos valores de tensión (V_1, V_2)* para la misma corriente de carga I_{OC}, debido a la existencia de dos zonas: *superior* e *inferior.*

La zona superior comprende desde el funcionamiento en vacío hasta el punto *B*; se caracteriza por su estabilidad y corresponde al funcionamiento normal de la máquina.

La zona inferior se extiende desde el punto *B* hasta el *A*, caracterizándose por su gran inestabilidad.

Ejercicios de aplicación

1.º La característica de vacío correspondiente a un generador derivación, cuando gira al 80 % de su velocidad nominal, viene dada por los siguientes valores:

E_0 (V): 60, 120, 160, 180, 190, 204, 210
$I_{ex.}$ (A): 0,6, 1,2, 1,6, 1,9, 2,1, 2,6, 3

Se trata de averiguar, a la velocidad nominal:

a) La tensión que suministrará en vacío, sabiendo que la velocidad crítica del generador es la del 80 % de la nominal.

b) La resistencia del circuito de excitación.

c) La resistencia crítica en el circuito de excitación.

d) La tensión que proporcionaría a plena carga, si el coeficiente de regulación es del 5 %.

Solución:

a) Para averiguar la tensión de vacío, antes es necesario transformar, a la velocidad nominal (100 %), los valores dados para N = 80 %. La transformación se hace según la proporcionalidad que existe entre las ff. ee. mm. y las velocidades para la misma excitación:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\boxed{E_2 = E_1 \cdot \frac{N_2}{N_1}}$$

Por ejemplo, para $E_1 = 60$ V, resultará:

$$E_2 = 60 \times \frac{1}{0{,}8} = 75 \text{ V}$$

Los valores obtenidos para N = 100 % son:

E_o (V): 75, 150, 200, 225, 237,5, 255, 262,5
$I_{ex.}$ (A): 0,6, 1,2, 1,6, 1,9, 2,1, 2,6, 3

A continuación, se representan los valores y se obtienen las características de vacío de la figura 9.11, para las velocidades del 80 y del 100 % de la nominal respectivamente.

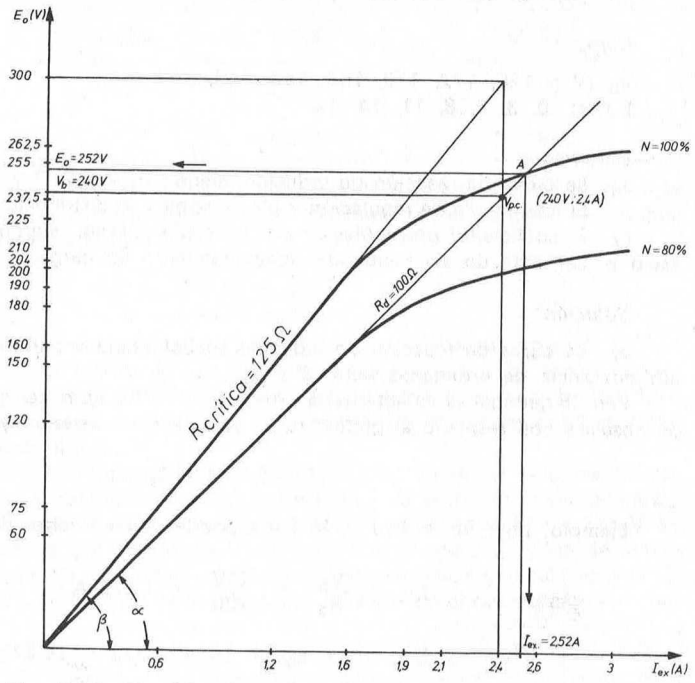


Fig. 9.11 Ejercicio de aplicación sobre una dínamo derivación.

Al dar como velocidad crítica N = 80 %, se trazará la recta del inductor que, partiendo del origen, sea tangente a la curva de vacío (N = 80 %), hasta cortar la característica nominal en el punto *A*, correspondiéndole una f. e. m. de 252 V y una excitación de 2,52 A.

Por tanto, la tensión de vacío:

$$\boxed{E_o = 252 \text{ V}}$$

b) La resistencia de excitación se determina gráficamente:

$$R_d = \text{tg } \alpha = \frac{E_o}{I_{ex.}} = \frac{252}{2{,}52} = 100 \ \Omega$$

c) La resistencia crítica coincide con la pendiente de la recta que, partiendo del origen, es tangente a la característica de vacío nominal:

$$R_{crítica} = \text{tg } \beta = \frac{300}{2,4} = 125\ \Omega$$

d) El coeficiente de regulación es:

$$\varepsilon = \frac{E_0 - V_b}{V_b} \cdot 100$$

$$5 = \frac{252 - V_b}{V_b} \times 100$$

de donde $V_b = 240$ V.

Al funcionar el generador en carga y suministrar una tensión de 240 V, la corriente que circulará por el devanado de excitación será:

$$I_{ex.} = \frac{V_b}{R_d} = \frac{240}{100} = 2,4\ A$$

Levantando una perpendicular por el punto del eje de abscisas que representa a 2,4 A, la tensión en bornes estará debajo de la característica de vacío, señalada con el punto $V_{p.\,c.}$ (240 V, 2,4 A).

2.º Un generador-derivación de $R_d = 125\ \Omega$ suministra 2,5 kW a 160 V cuando gira a 1 000 r. p. m. Los datos correspondientes a las características de vacío y exterior, para esa velocidad, son:

Vacío:

E_0 (V): 1,5, 90, 125, 140, 160, 170, 175
$I_{ex.}$ (A): 0, 0,5, 0,7, 0,8, 1, 1,2, 1,4

Carga:

V_b (V): 175, 172, 170, 168, 166, 163, 159
I (A): 0, 3, 6, 8, 11, 14, 16

Determinar:

a) La curva de reacción de inducido, siendo $R_i = 0,2\ \Omega$ y $2\ U_e = 1,5$ V.

b) El coeficiente de regulación a plena carga y la distribución de caídas de tensión.

c) El coeficiente de regulación del apartado anterior, suponiendo que se mantiene en vacío la corriente de excitación del funcionamiento en carga.

Solución:

a) La curva de reacción de inducido se determina a partir de la característica interior, por diferencia de ordenadas entre *E* y E_0.

Para determinar la característica interior E = f (I_i), es necesario hacer un traslado de eje de abscisas con respecto al gráfico de la característica exterior, ya que:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

Ejemplo: para $V_b = 159$ V, le corresponde una corriente de excitación:

$$I_{ex.} = \frac{V_b}{R_d} = \frac{159}{125} = 1,272\ A$$

$$I_i = I + I_{ex.} = 16 + 1,272 = 17,272\ A$$

La f. e. m. para $V_b = 159$ V será:

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e = 159 + (0,2 \times 17,272) + 1,5 = 163,95\ V$$

Todos los valores calculados según este sistema están indicados a continuación:

V_b	I	$I_{ex.}$	$I_i = I + I_{ex.}$	$E = V_b + R_i \cdot I_i + 2\ U_e$
175	0	1,4	1,4	176,78
172	3	1,376	4,376	174,37
170	6	1,36	7,36	172,97

V_b	I	$I_{ex.}$	$I_i = I + I_{ex.}$	$E = V_b + R_i \cdot I_i + 2\,U_e$
168	8	1,344	9,344	171,36
166	11	1,328	12,328	169,96
163	14	1,304	15,304	167,76
159	16	1,272	17,272	163,95

El punto de funcionamiento normal, en vacío, corresponde a la intersección de la recta del inductor R_d = 125 Ω, con la característica de vacío, señalado por el punto *A* de la curva de vacío (fig. 9.12A). En el punto *A*, la f. e. m. en vacío es de 175 V:

$$E_0 = 175 \text{ V}$$

A continuación, se representa la característica exterior V_b = f (I) en un segundo gráfico (fig. 9.12B) y, posteriormente, se representa la característica interior E = f (I_i) con la correspondiente corrección en el eje de abscisas, señalada por un pequeño triángulo (ver párrafo 9.1.5).

La reacción de inducido queda señalada por la *diferencia de ordenadas* entre la curva de vacío E_0 y la característica interior *E*.

Como tensión de vacío, puede tomarse siempre 175 V, si bien no es del todo exacto, por lo que es conveniente indicar a continuación el procedimiento para averiguar la verdadera E_0.

La determinación de los valores de E_0, en el tramo comprendido entre 159 y 175 V, se ha hecho a través de un gráfico que representa la característica de vacío a escala de mayor amplitud y que va representada en la parte inferior de la característica de vacío general (fig. 9.12C). Los valores obtenidos para E_0, en función de la excitación señalada en el cuadro anterior, son:

$I_{ex.}$ (A)	1,4	1,375	1,36	1,344	1,328	1,304	1,272
E_0 (V)	175	174,8	174,5	174,25	174	173,5	172,75

Puede apreciarse que hay una variación de tensión en vacío comprendida entre 172,75 y 175 V, para corrientes de excitación comprendidas entre 1,272 y 1,4 A.

Al representar la curva de vacío para $I_{ex.}$ de carga (2), se situará por encima de E = f (I_i) y por debajo de la recta (1) que representa a E_0 = 175 V.

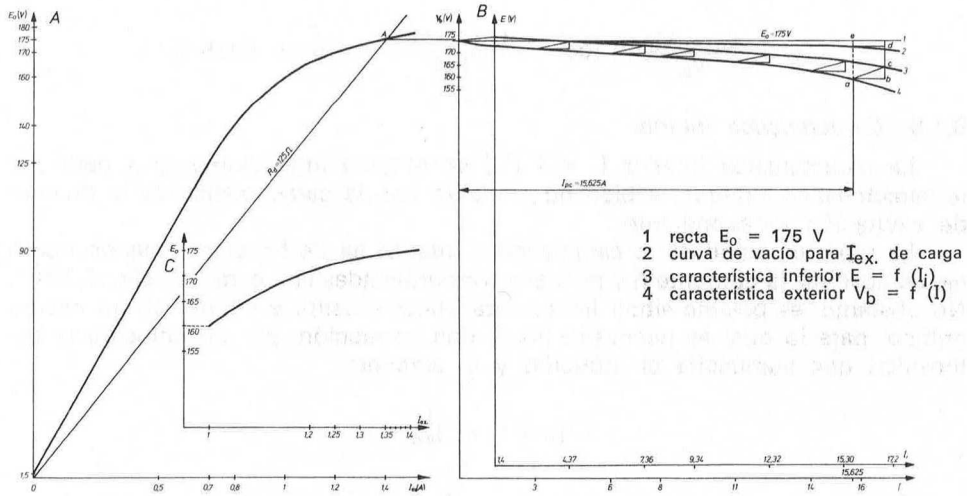


Fig. 9.12 Ejercicio de aplicación sobre una dínamo derivación: A, *característica de vacío;* B, *características en carga;* C, *parte de la característica de vacío comprendida entre 159 y 175 V.*

Resumen. La reacción de inducido viene indicada en el gráfico (fig. 9.12) por la diferencia entre las ordenadas de las curvas 2 y 3.

b) La corriente de plena carga se obtiene a partir de la potencia y tensión nominales:

$$I_{p.\,c.} = \frac{P}{V_b} = \frac{2\,500}{160} = 15{,}625 \text{ A}$$

A su vez

$$I_i = I_{p.\,c.} + I_{ex.} = 15{,}625 + \frac{160}{125} = 15{,}625 + 1{,}28 = 16{,}905 \text{ A}$$

Al funcionar el generador a plena carga, el voltímetro de carga indica 160 V. Al desconectar la carga, la tensión del voltímetro aumenta a 175 V; por tanto, habrá una caída de tensión de vacío a plena carga de 15 V, y el coeficiente de regulación será:

$$\varepsilon = \frac{E_0 - V_b}{V_b} \cdot 100 = \frac{175 - 160}{160} \times 100 = 9{,}375\ \%$$

La caída de tensión *ae* (fig. 9.12B) se divide en 3 partes:

1.ª Al haber entre bornes del circuito de excitación una tensión de 160 V, la excitación es de 1,28 A. Con esta excitación el generador *debería dar* en vacío una tensión de 173 V; sin embargo, el proceso de la *autoexcitación impide* que el generador se estabilice dando esa tensión, ya que la estabilidad se consigue con una tensión final en vacío de 175 V (punto *A*, de la curva de vacío de la figura 9.12A).

Así, pues, debido a una disminución en la tensión de excitación, ha habido una caída de tensión:

$$ed = 175 - 173 = 2\ V$$

2.ª Caída óhmica y en escobillas:

$$bc = (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e = (0{,}2 \times 16{,}905) + 1{,}5 = 4{,}88\ V$$

3.ª Caída por reacción de inducido:

$$cd = E_0 - E = 173 - (160 + 4{,}88) = 8{,}12\ V$$

Comprobación:

$$bc + cd + ed = 4{,}88 + 8{,}12 + 2 = 15\ V$$

c) Al mantenerse la excitación, que podría conseguirse intercalando una resistencia en serie con el circuito de excitación, la caída de tensión total sería:

$$ae - ed = 15 - 2 = 13\ V$$

Y el coeficiente de regulación:

$$\varepsilon = \frac{E_0 - V_b}{V_b} \cdot 100 = \frac{173 - 160}{160} \times 100 = 8{,}125\ \%$$

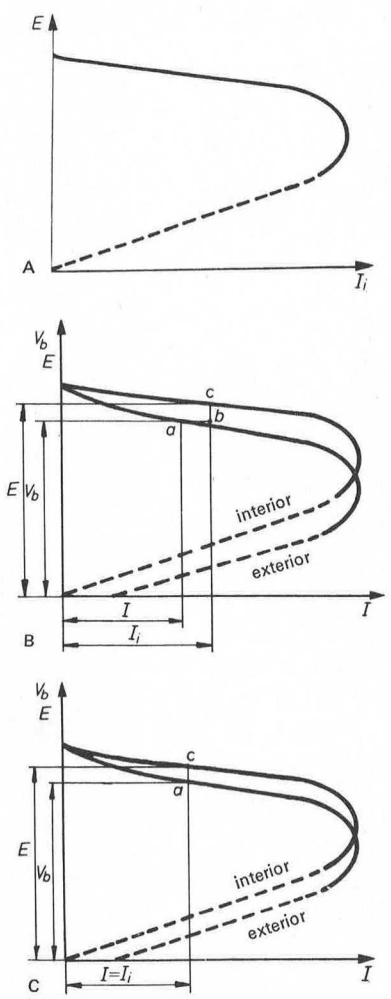


Fig. 9.13 Características de una dínamo derivación: A, *característica interior;* B, *características exterior e interior reales;* C, *característica exterior real e interior aproximada.*

9.1.5 *Característica interior*

La característica interior E = f (I_i) se obtiene indirectamente a partir de la característica exterior, si bien no coincide con la característica de la dínamo de excitación independiente.

La representación de la característica interior ha de hacerse tomando como eje de abscisas la corriente I_i y para el eje de ordenadas la f. e. m. (*E*) (fig. 9.13A). No obstante, es posible situar las características exterior e interior en un mismo gráfico, para lo cual es necesario hacer una corrección por no coincidir la intensidad que suministra el inducido y la exterior:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

$$I_{ex.} = \frac{V_b}{R_d}$$

en donde:

I = corriente exterior
$I_{ex.}$ = corriente de excitación en derivación
I_i = corriente del inducido
R_d = resistencia del circuito de excitación

por lo que:

$$\boxed{I_i = I + \frac{V_b}{R_d}}$$

Los diferentes valores de f. e. m. se obtienen a partir de la tensión en bornes:

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$$

(sin arrollamientos de conmutación).

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e + (R_p \cdot I_i)$$

(con arrollamientos de conmutación).

Cada punto de la característica interior se obtiene representando los pares de valores I_i, E, para lo cual es necesario sumar los términos $I_{ex.}$ y $2\ U_e + I_i\ (R_i + R_p)$ a cada punto de la característica exterior (I, V_b), respectivamente. Así, en la figura 9.13B, el punto *a* de coordenadas (I, V_b) pertenece a la característica exterior y, al sumarle los términos *ab* y *bc* se obtienen las coordenadas del punto *c* (I_i, E), que pertenece a la característica interior:

$$ab = \frac{V_b}{R_d}$$

$$bc = 2\ U_e + I_i\ (R_i + R_p)$$

Así, pues, las nuevas coordenadas del punto *c*, pertenecientes a la característica interior $E = f\ (I_i)$, son:

$$\text{Abscisa} = I + ab = I + \frac{V_b}{R_d} = I_i$$

$$\text{Ordenada} = V_b + bc = V_b + 2\ U_e + I_i \cdot (R_i + R_p) = E$$

9.1.5.1 *Aproximación en la característica interior*

Dado que, en la mayoría de generadores de excitación en derivación, el valor de la corriente de excitación es mínima frente a la corriente exterior, podrá simplificarse notablemente el cálculo de la característica interior, si se desprecia el término *ab*. Así, la nueva característica interior se obtiene directamente al sumar a cada punto de la exterior las caídas óhmicas y de escobillas (fig. 9.13C); al sumar la caída de tensión $2\ U_e + I_i \cdot (R_i + R_p)$ al punto *a*, se obtendrá el punto *c* de la característica interior.

Ejercicio de aplicación

Dada la característica exterior de una dínamo con excitación en derivación:

V_b (V): 505, 495, 483, 470, 455
I (A): 0, 40, 80, 120, 160

Se trata de calcular y representar gráficamente su característica interior.
Datos: $R_i = 0{,}1\ \Omega$, $R_p = 0{,}05\ \Omega$, $R_d = 50\ \Omega$ y caída de tensión en escobillas 2 V.

Solución:

A partir de la característica exterior, se deducirán los puntos correspondientes a la característica interior, mediante las siguientes relaciones:

$$I_i = I + \frac{V_b}{R_d}$$

$$E = V_b + I_i \cdot (R_i + R_p) + 2$$

Así, las coordenadas del 2.º punto serían:

$$I_i = 40 + \frac{495}{50} = 49{,}9\ \text{A}$$

$$E = 495 + 49{,}9\ (0{,}1 + 0{,}05) + 2 = 504{,}48\ \text{V}$$

Las coordenadas de los puntos restantes se obtendrían de forma similar. Los resultados de los citados puntos son:

E (V): 505, 504,4, 498,4, 491,4, 482,3
I_i (A): 0, 49,9, 89,6, 129,4, 169,1

La representación de las características exterior e interior, así como el esquema de conexión del generador, se muestran en la figura 9.14.

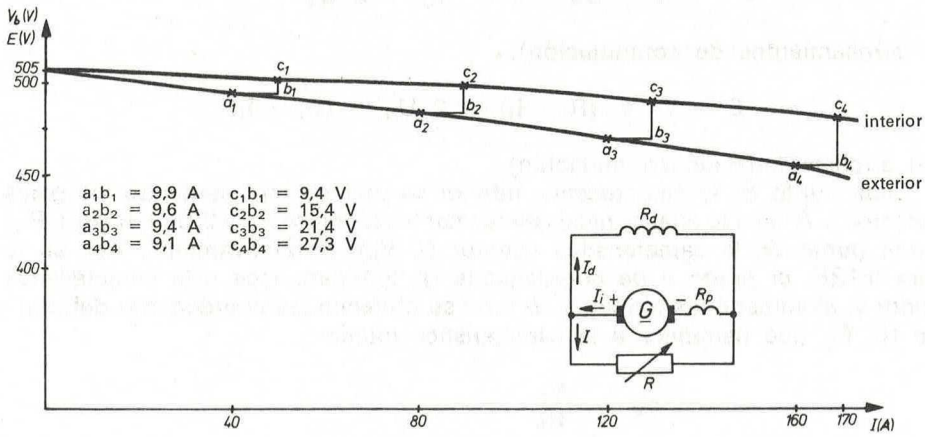


Fig. 9.14 Deducción de la característica interior a partir de la exterior en la dínamo derivación.

9.2 Dínamo con excitación en serie

Este tipo de máquina presenta la ventaja de la autoexcitación y el inconveniente de su inestabilidad a la hora de suministrar tensión.

A continuación, se analizan las curvas características correspondientes a este tipo de generador.

9.2.1 *Característica en vacío*

En la dínamo serie la corriente de excitación es igual a la corriente exterior, por lo que será imposible la obtención de la curva en vacío. Solamente se podrá obtener un punto de la curva, que corresponderá al magnetismo remanente del circuito inductor y para el cual la corriente de excitación será nula.

No obstante, puede determinarse la característica en vacío, al separar el circuito de excitación del inducido y aplicarle una tensión de una fuente exterior.

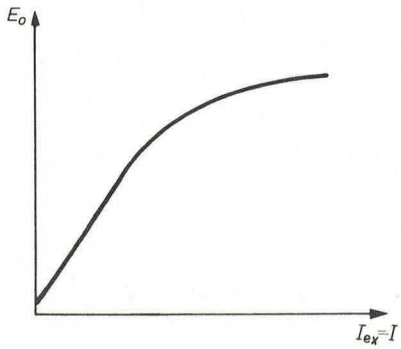


Fig. 9.15 Característica de vacío de una dínamo serie.

La forma de la curva obtenida (fig. 9.15) es similar a las curvas de vacío de las dínamos con excitación independiente y derivación, puesto que en definitiva la curva de vacío identifica el circuito magnético de una máquina. Los ampervueltas inductores calculados para los diferentes tipos de dínamos pueden producirse, en general, de dos formas:

a) Con un número de espiras elevado y una corriente de excitación reducida. Ese es el caso de las dínamos con excitación *independiente* y *derivación.*

b) Con un número de espiras muy reducido y una corriente de excitación elevada, como sucede con la dínamo de excitación en *serie.*

9.2.2 *Características en carga*

El funcionamiento normal de un generador con excitación en serie corresponde al funcionamiento en carga, por ser necesaria la circulación de una corriente por el devanado de excitación. Para que se produzca el *cebado* de la máquina, la dínamo ha de cerrar el circuito a través de una resistencia de carga, de valor inferior a la denominada *resistencia crítica.*

Dado que, en el funcionamiento normal del generador serie, el circuito de excitación es atravesado por la corriente de carga, para evitar pérdidas de tensión y potencia, se construirá el devanado inductor con muy *pocas espiras* de amplias secciones (pletinas de cobre).

De las diferentes curvas características existentes, solamente presenta cierto interés la característica *exterior.*

9.2.3 *Característica exterior*

La característica exterior V_b = f (I) de un generador serie representa la tensión en bornes de los receptores en función de la corriente exterior, manteniéndose la velocidad constante. Esta característica no puede cumplir la condición de mantener la corriente de excitación constante, ya que varía con la carga.

Al observar el esquema de conexión de la dínamo serie funcionando en carga (fig. 9.16B), se comprueba su similitud con el esquema de la dínamo derivación funcionando en vacío (fig. 9.16A), por lo que también existirá cierta relación entre sus curvas características.

En la figura 9.17 se han representado las características exterior $V_b = f(I)$ y de vacío $E_o = f(I)$ de una dínamo serie.

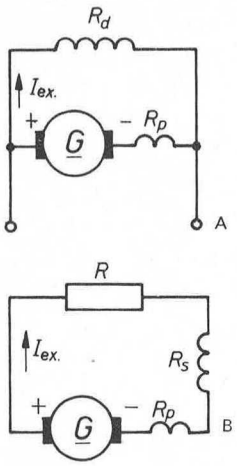


Fig. 9.16 Esquemas de conexiones de generadores: A, *dínamo derivación en paralelo;* B, *dínamo serie en carga.*

9.2.3.1 *Análisis de la característica exterior*

Al principio presenta un curso creciente según una línea recta (fig. 9.17), por lo que será muy *inestable,* ya que una ligera variación en la carga motivará una fuerte variación de la tensión en bornes.

A medida que se va disminuyendo la resistencia de carga, aumentan la corriente de carga y la tensión en bornes, llegando a alcanzarse el valor máximo de la tensión en bornes (fig. 9.17, punto *C*).

Si sigue disminuyendo la resistencia de carga, la tensión en bornes disminuye hasta llegar a anularse, mientras que la corriente aumenta considerablemente hasta alcanzar el valor I_{cc}, que corresponde al funcionamiento del generador en cortocircuito (punto *A*).

La diferencia entre ordenadas de las características de vacío y exterior, representa las caídas de tensión óhmicas y de reacción de inducido. A partir de la zona de máxima tensión en bornes, si sigue aumentando la corriente de carga, provocará una fuerte reacción de inducido, dando lugar a una notable disminución de la tensión en bornes.

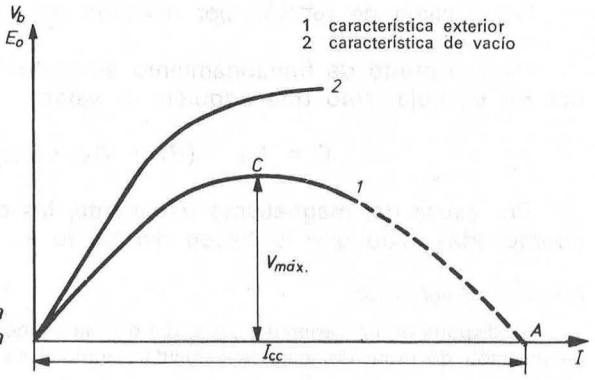


Fig. 9.17 Característica exterior y de vacío de una dínamo serie.

9.2.3.2 *Resistencia crítica*

Cuando el generador está funcionando a plena carga, como sucede con el punto *B* de la figura 9.18, se cumplirá que:

$$\text{tg } \alpha = \frac{V_{p.\,c.}}{I_{p.\,c.}} = R_{p.\,c.}$$

en donde:

$R_{p.\,c.}$ = resistencia de plena carga

Para cualquier otro punto de funcionamiento, se seguirá cumpliendo la igualdad entre la resistencia exterior y la tangente del ángulo que pasa por dicho punto y el eje de abscisas. Sin embargo, al igual que sucedía en la dínamo derivación, existe un valor de *resistencia exterior crítica,* que viene dada por la tangente a la parte rectilínea de la curva:

$$\text{tg } \beta = R_{\text{crítica}}$$

Para conseguir la autoexcitación en el generador serie, es necesario conectarlo a una resistencia de carga inferior a la crítica.

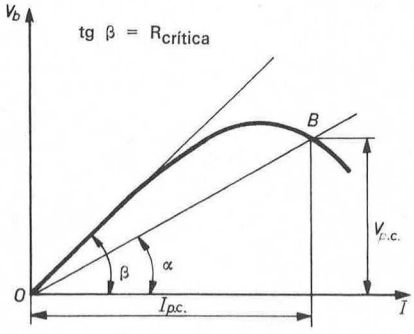


Fig. 9.18 Resistencia crítica de la dínamo serie.

9.2.4 *Característica interior*

La característica interior $E = f(I)$ se obtiene sumando, a las ordenadas de la característica exterior, el término $I \cdot (R_i + R_p + R_s)$ (fig. 9.19).

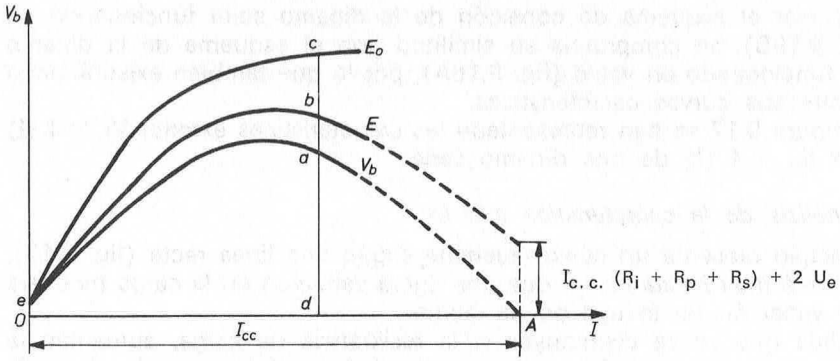


Fig. 9.19 Características de vacío, exterior e interior de un generador serie.

El representar en un mismo sistema de ejes cartesianos las curvas de vacío, exterior e interior, permitirá conocer las caídas de tensión por separado. Así, en el funcionamiento nominal, señalado en el punto *d*, el generador suministrará la corriente I_{od} y dará la tensión V_{ad}; para esa misma excitación, el generador suministrará en vacío la tensión V_{cd}. La diferencia entre ambas tensiones corresponde a las caídas de tensión:

ac = caída de tensión total
ab = caída de tensión óhmica: $I \cdot (R_i + R_p + R_s) + 2\ U_e$
bc = caída de tensión por reacción de inducido

Para el punto de funcionamiento en cortocircuito *A*, la característica interior no es nula, sino que adquiere el valor:

$$E = I_{cc} \cdot (R_i + R_p + R_s) + 2\ U_e$$

Por causa del magnetismo remanente, las curvas no parten del origen de coordenadas, sino que lo hacen del punto *e*.

Ejercicio de aplicación

Se dispone de un generador serie, del que se conocen la característica exterior y la curva de reacción de inducido, para la velocidad nominal de 600 r. p. m.:

V_b (V): 11, 41, 60, 67, 73, 77, 80, 78, 70, 43, 0
I (A): 10, 40, 60, 70, 80, 90, 105, 120, 140, 170, 200
$\varepsilon_{reacc.}$ (V): 2, 7, 10,5, 14,5, 20, 22,5, 26, 30, 40,5, 67,5

Determinar:
1.° Las características interior y de vacío, si R_i = 0,1 Ω, R_s = 0,025 Ω y 2 U_e = 2 V.
2.° La resistencia crítica de la carga. Tensión nominal 70 V.

Solución:

1.° Se representa en un gráfico la característica exterior (1) (fig. 9.20) y, sobre ella, se obtiene la interior (2) al sumar, a las ordenadas, la caída de tensión óhmica y de escobillas, ya que:

$$E = V_b + I_i \cdot (R_i + R_s) + 2\ U_e$$

Ejemplo: para el punto de cortocircuito *A*:

$$E = 0 + 200 \cdot (0{,}1 + 0{,}025) + 2 = 27\ V$$

Uniendo el punto *B* (200 A, 27 V), con el punto *C* (0,2 V), quedará determinada la caída de tensión óhmica y en escobillas para cualquier carga. Si, a la característica interior, se añaden las ordenadas correspondientes a la curva de reacción del inducido, se obtendrá la característica de vacío (3) $E_0 = f(I)$.

Los valores obtenidos para *E* y E_0 son:

I(A)	10	40	60	70	80	90	105	120	140	170	200
E (V)	14	48	69,5	78,5	85	90,5	95	95	89,5	66,5	27
E_0 (V)	16	55	80	93	105	113	121	125	130	134	—

A continuación, se representan las características $V_b = f(I)$, $E = f(I)$ y $E_0 = f(I)$, como se indica en el gráfico de la figura 9.20.

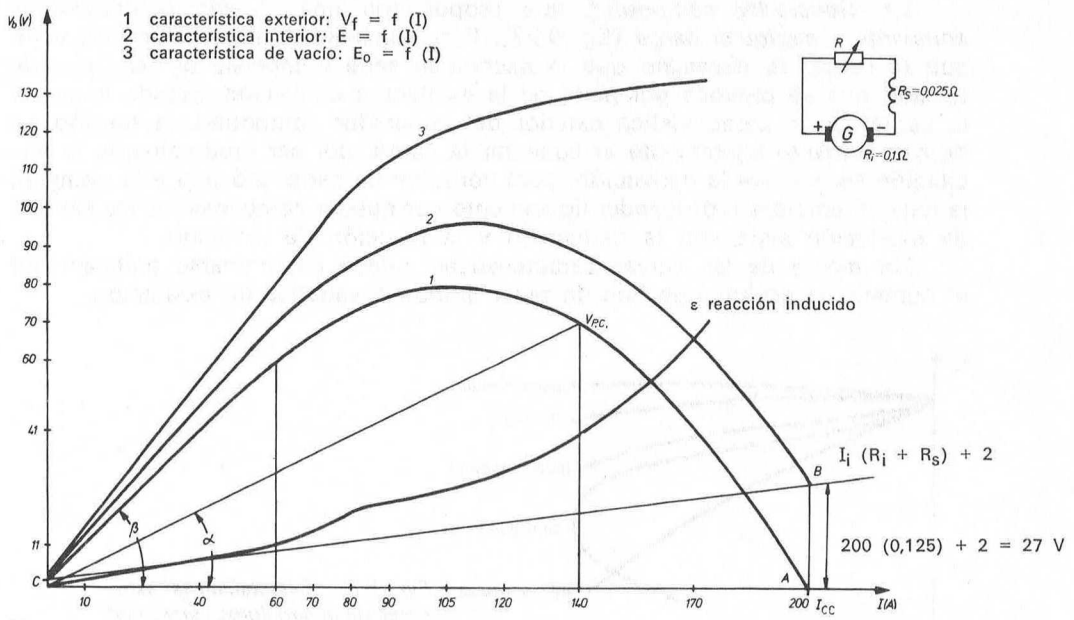


Fig. 9.20 Ejercicio de aplicación sobre un generador serie.

2.° La resistencia crítica es la tangente a la característica exterior que pasa por el origen; así, en la figura, para I = 60 A, será:

$$R_{\text{carga crítica}} = \text{tg } \beta = \frac{60}{60} = 1\ \Omega$$

mientras que la de plena carga es:

$$\text{tg } \alpha = \frac{70}{140} = 0{,}5\ \Omega$$

9.3 Dínamo con excitación mixta o compound

En este generador la excitación es producida por un devanado derivación y otro serie, pudiendo sumarse sus efectos o restarse (fig. 9.21). Cuando ambos devanados producen un campo magnético en el mismo sentido, el generador se denomina *compound aditivo,* mientras que, si actúan en sentidos contrarios, el generador se denomina *anticompound o compound diferencial.*

Las características de funcionamiento del generador compound estarán comprendidas entre las del generador derivación y el generador serie.

Las principales curvas características que responden del comportamiento del generador compound son las de *vacío* y *exterior.*

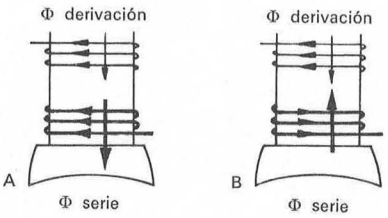


Fig. 9.21 Excitación compound: A, *compound aditivo;* B, *compound diferencial.*

9.3.1 *Característica en vacío*

En el funcionamiento sin carga (vacío), el generador compound se comporta como un generador de excitación en derivación, ya que por el devanado serie solamente pasa una corriente mínima, en la conexión *derivación larga* (fig. 8.8B). La acción producida por la excitación serie será, pues, en este caso, mínima, ya que por su devanado circulará una corriente muy inferior a la nominal.

Así, pues, la forma de la característica será similar a la representada en la figura 9.1. También es necesaria la existencia del *magnetismo remanente* en el circuito magnético, para conseguir la autoexcitación.

9.3.2 *Característica exterior*

En el generador derivación un aumento en la corriente de carga llevaba consigo una disminución de la tensión en bornes (fig. 9.10), mientras que en la dínamo serie la tensión en bornas aumentaba al hacerlo la carga (fig. 9.17).

En el generador compound se combinan las propiedades de los generadores derivación y serie, dando lugar a los tipos siguientes:

1.º *Generador compound,* que proporciona una *tensión prácticamente constante a cualquier carga* (fig. 9.22). Para suministrar una tensión constante con la carga, es necesario que la excitación serie compense el descenso de tensión que se provoca por parte de la excitación derivación cuando aumenta la carga. En la característica exterior del generador compound, la tensión en bornes aumenta ligeramente al conectar la carga, por ser predominante la excitación serie sobre la derivación; para corriente de carga próxima a la nominal, la tensión empieza a descender ligeramente por quedar compensados los efectos de excitación serie con la derivación y la reacción de inducido.

Por medio de las curvas características, puede determinarse gráficamente el número de espiras que han de tener ambos devanados de excitación.

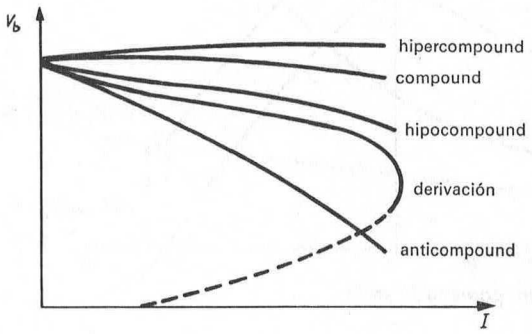


Fig. 9.22 Características exteriores de generadores compound y generador derivación.

2.º *Generador hipocompound,* que proporciona una *tensión en bornes decreciente* con el aumento de la carga. La forma de esta curva se debe al predominio de la excitación derivación sobre la serie.

La característica exterior de esta dínamo está situada entre las características exteriores de los generadores compound y derivación (fig. 9.22).

3.º *Generador anticompound,* que proporciona una *tensión muy decreciente* con el aumento de la carga (fig. 9.22), por oponerse la excitación serie a la derivación.

La característica exterior del generador anticompound está situada por debajo de la característica del generador derivación (fig. 9.22).

4.º *Generador hipercompound,* en el que predomina el efecto de la excitación serie sobre la excitación derivación, motivando un *ligero aumento de tensión en bornes cuando aumenta la corriente de carga.* La característica exterior hipercompound está situada por encima de la compound (fig. 9.22).

Ejercicio de aplicación

Un generador tetrapolar dispone de excitación compuesta en derivación corta (fig. 9.23), formada por 800 espiras en derivación y 12 espiras en serie por polo. Funcionando como generador hipercompound da 110 V en vacío, mientras que en carga suministra una potencia de 18 kW a 120 V.

Si funciona como generador derivación, ha de aumentarse la excitación hasta 2,5 A, para conseguir una tensión de 120 V a plena carga.

Determinar:

1.º Los ampervueltas suministrados por el devanado derivación, si R_d = 120 Ω y R_s = 0,2 Ω.

2.º Los ampervueltas suministrados por el devanado serie.

3.º La resistencia que ha de conectarse en paralelo con el devanado excitación serie, para desviar la corriente de carga necesaria.

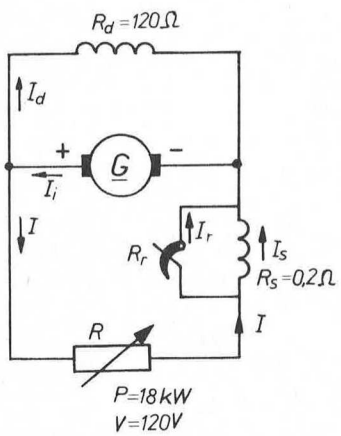


Fig. 9.23 Generador hipercompound, con resistencia desviadora en el circuito serie.

Solución:

1.º Los ampervueltas totales por polo que necesita el generador compound son:

$$X = n \cdot I = 800 \times 2{,}5 = 2\,000 \text{ Av}$$

La corriente de excitación que circula por el devanado derivación a plena carga (despreciando la caída de tensión en la excitación serie) es:

$$I_d = \frac{V_b}{R_d} = \frac{120}{120} = 1 \text{ A}$$

Los ampervueltas que produce la excitación derivación serán:

$$X_d = n_d \cdot I_d = 800 \times 1 = 800 \text{ Av}$$

2.º Los ampervueltas serie serán los restantes:

$$X_s = X - X_d = 2\,000 - 800 = 1\,200 \text{ Av}$$

3.º La corriente de carga es:

$$I = \frac{P}{V_b} = \frac{18\,000}{120} = 150 \text{ A}$$

La corriente que ha de circular por el devanado serie será:

$$I_s = \frac{X_s}{n} = \frac{1\,200}{12} = 100 \text{ A}$$

La corriente que ha de pasar por la resistencia desviadora será la diferencia:

$$I_r = I - I_s = 150 - 100 = 50 \text{ A}$$

La resistencia del reóstato:

$$R_r = \frac{R_s \cdot I_s}{I_r} = \frac{0{,}2 \times 100}{50} = 0{,}4\ \Omega$$

9.4 Comparación y aplicación de los principales tipos de generadores

El estudio comparativo de los diferentes tipos de dínamos puede hacerse a través de sus curvas características, una vez situadas en un mismo diagrama.

La característica que mejor muestra el comportamiento del generador en servicio es la *exterior* (fig. 9.24), por lo que se prescindirá, en este caso, del resto de las curvas características.

A continuación, se establece la comparación entre los diferentes tipos de generadores.

9.4.1 *Dínamo de excitación independiente*

Este generador suministra una tensión en bornes que disminuye cuando aumenta la carga (fig. 9.24), por lo que será necesario disponer de un regulador de tensión en el circuito de excitación con objeto de mantener la tensión constante.

El principal inconveniente de este generador es la *necesidad de una fuente de c. c.* para alimentar el circuito de excitación.

La ventaja principal es de *independencia* entre el circuito de excitación y el circuito del inducido, que la hace muy útil en los casos que es necesario un riguroso control de la tensión de salida a cualquier carga.

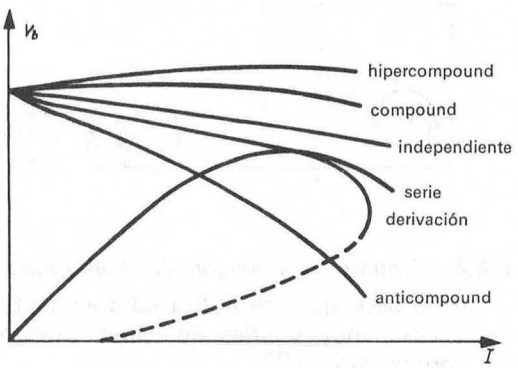


Fig. 9.24 Curvas características de los principales tipos de generadores.

9.4.2 *Dínamo con excitación en derivación*

Este tipo de generador suministra una tensión en bornes que disminuye desde vacío a plena carga algo más que en la dínamo independiente, si bien la disminución no es muy elevada (fig. 9.24).

Es muy *sensible a las variaciones de velocidad,* por lo que se ha de procurar una velocidad constante, para evitar oscilaciones en la tensión.

La autoexcitación necesita del magnetismo remanente del material magnético y limita, en cada caso, el valor de la resistencia del devanado de excitación a un valor inferior a la *resistencia crítica.*

En el generador derivación se puede llegar al funcionamiento en cortocircuito, *aumentando progresivamente la carga* sin peligro alguno para la máquina, mientras que en la dínamo independiente no debe pasarse de un valor muy superior a la corriente nominal, para evitar averías importantes. Si el cortocircuito se produce *repentinamente,* también resultará muy peligroso para la máquina derivación.

La ventaja más destacable en este generador es *su autoexcitación* que, junto a su constancia en la tensión al variar la carga, lo convierte en el generador de c. c. *más utilizado.* Una de sus aplicaciones más utilizadas es la carga de baterías de acumuladores en automóviles (fig. 9.25).

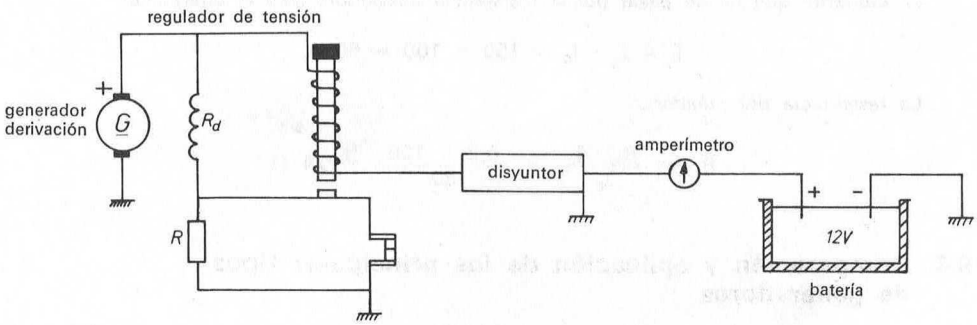


Fig. 9.25 Generador derivación destinado a la carga de batería de un vehículo.

9.4.3 *Dínamo con excitación en serie*

El generador serie presenta una característica exterior en la que destaca su gran *inestabilidad* (fig. 9.24), principal motivo para que este generador se utilice en contadas ocasiones.

Una posible aplicación es hacerle funcionar en la parte ascendente de su característica exterior, a velocidad constante, para que suministre una tensión proporcional a la carga; la conexión se hace en serie con la línea, para compensar la caída de tensión que se produzca (fig. 9.26).

También se aplica indirectamente como freno, al pasar a funcionar de motor serie a generador, como sucede en *tracción eléctrica,* máquinas de elevación, etc.

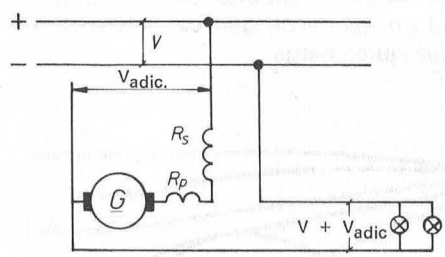


Fig. 9.26 Ejemplo de aplicación del generador serie.

9.4.4 *Dínamo con excitación compound*

Este generador se utiliza para alimentar receptores en los que se produzcan variaciones muy rápidas de carga, puesto que *mantiene constante la tensión en bornes* (fig. 9.22).

El generador hipercompound puede utilizarse para mantener la tensión constante al final de una línea.

El generador anticompound (diferencial) se utiliza en aplicaciones que necesitan de fuertes intensidades a bajas tensiones, como es el caso de *soldadura eléctrica por arco.*

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— El generador derivación aplicado a la carga de baterías de acumuladores en el automóvil.
— Aplicaciones del motor serie.
— Utilización de los generadores con excitación compuesta.

CUESTIONARIO

9.1 Enumerar causas por las que puede anularse el magnetismo remanente de un generador autoexcitado.

9.2 ¿Es suficiente la existencia de magnetismo remanente en un generador derivación para que éste genere f. e. m. al girar a su marcha normal? Razonar la respuesta.

9.3 ¿Puede excitarse un generador derivación puesto en cortocircuito? ¿Y en vacío?

9.4 Dibujar en un solo gráfico las características de vacío de un generador derivación, para diferentes velocidades, y explicar en el gráfico el concepto de velocidad crítica.

9.5 Explicar el comportamiento de un generador ante un cortocircuito producido por un aumento progresivo de la carga, en los casos siguientes:

a) Conectada su excitación en derivación.
b) Como generador de excitación independiente.

9.6 Explicar las principales diferencias entre las características exteriores de un generador derivación obtenidas al funcionar como generador de excitación independiente o como generador derivación.

9.7 ¿Es correcto el funcionamiento de un generador serie en vacío? ¿Y en cortocircuito?

9.8 Explicar, con la ayuda de curvas características, la constancia de la tensión al variar la carga en el generador compound normal.

9.9 Se dispone de una dínamo derivación, cuya característica de vacío se obtiene a partir de los datos siguientes:

E_0 (V): 5, 180, 300, 360, 420, 450
$I_{ex.}$ (A): 0, 0,3, 0,5, 0,65, 0,9, 1,2

Cuando gira a la velocidad nominal, suministra en vacío una tensión de 450 V, con el reóstato eliminado. Se trata de averiguar:

1.° La resistencia del devanado de excitación.
2.° La máxima resistencia del reóstato al intercalarlo en serie con el devanado de excitación.

Respuestas: 1.°: $R_{ex.} = 375\ \Omega$; 2.°: 225 Ω.

9.10 En un generador derivación con resistencia de excitación de 67,5 Ω al girar su velocidad nominal de 1 000 r. p. m., se ha obtenido la característica de vacío siguiente:

E_0 (V): 30, 55, 75, 90, 100, 108
$I_{ex.}$ (A): 0,2, 0,4, 0,6, 0,85, 1,1, 1,6

Determinar:

1.° La característica de vacío cuando su velocidad descienda un 20 %.
2.° La resistencia crítica del circuito de excitación en las características de vacío anteriores.
3.° La velocidad crítica con respecto a la característica obtenida para la velocidad nominal.
4.° La característica de vacío a la velocidad crítica.

Respuestas: 2.°: $R_1 = 135\ \Omega$, $R_2 = 103\ \Omega$; 3.°: 503 r. p. m.

9.11 En el generador derivación del ejercicio anterior, se conecta un reóstato R_r en serie con el devanado de excitación, por lo que disminuye su tensión a 102 V, al funcionar en vacío, y a su velocidad nominal (1 000 r. p. m.).

Determinar:

1.° El valor de la resistencia R_r.
2.° La velocidad crítica del generador.

Respuestas: 1.°: 17,5 Ω; 2.°: 629 r. p. m.

9.12 En un generador derivación de 9 kW, que gira a 600 r. p. m., la característica de vacío viene dada por los valores:

V_0 (V): 2, 73, 140, 187, 212, 228, 242, 250
$I_{ex.}$ (A): 0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,33

A su vez, la característica exterior se obtiene a partir de los siguientes datos:

V_b (V): 250, 249, 247, 245, 242, 239, 235, 230, 225
I (A): 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40

Determinar:

1.° La resistencia del devanado inductor, si la dínamo da en vacío 250 V.
2.° Su velocidad crítica.
3.° La característica en carga $V_b = f(I_{ex.})$, teniendo en cuenta que el circuito de excitación carece de reóstato de regulación.

4.º El coeficiente de regulación, si la corriente de plena carga es de 40 A.

Respuestas: 1.º: $R_{ex.} = 75\ \Omega$; 2.º: 321 r. p. m.; 4.º: $\varepsilon = 11{,}11$.

9.13 Si en el generador del ejercicio anterior la resistencia interior del inducido es de 0,125 Ω y la caída de tensión en escobillas es de 2 V.

Determinar:

1.º La característica interior.

2.º La curva de reacción de inducido en función de la carga.

3.º La distribución de caídas de tensión.

9.14 En un generador serie, la característica de vacío y la curva de reacción de inducido vienen dadas por los siguientes valores:

E_0 (V): 30, 75, 95, 105, 110

$I_{ex.}$ (A): 8, 20, 28, 38, 48

ε (V): 3, 6, 9, 14, 28

Determinar:

1.º La característica exterior, si $R_i = 0{,}15\ \Omega$, $R_s = 0{,}05\ \Omega$ y $2\ U_e = 1{,}4$ V.

2.º La característica interior.

3.º La potencia que suministra la máquina a la tensión nominal de 75 V.

4.º La resistencia de carga y la máxima admisible.

Respuestas: 3.º: 3 375 W; 4.º: $R_c = 1{,}6\ \Omega$; $R_{crítica} = 3{,}18\ \Omega$.

9.15 En un generador tipo compound de corta derivación, las resistencias de los devanados: de inducido, derivación y serie, son de 0,4 Ω, 200 Ω y 0,1 Ω, respectivamente, y la caída de tensión en escobillas, de 1,5 V.

Determinar la característica interior, a partir de los datos correspondientes a su característica exterior:

V_b (V): 440, 443, 445, 444, 442, 438

I (A): 0, 3, 6, 9, 12, 16

BIBLIOGRAFIA

KOSTENKO M., *Máquinas eléctricas I,* Montaner y Simón, S. A., Barcelona, 1968.

Teoría, cálculo y construcción de máquinas eléctricas de corriente continua, Editorial Labor, Barcelona 1966.

FOUILLE, A., *Problemas resueltos de Electrotecnia,* Montesó, Barcelona 1967.

KOSON I. L., *Máquinas eléctricas y transformadores,* Reverté, S. A., Barcelona 1975.

BANDINI A., *Medición Eléctrica II. Ensayos de máquinas,* Rede, Barcelona 1967.

Tema 10

Acoplamiento de generadores de corriente continua

OBJETIVOS

— *Justificar la necesidad del acoplamiento de dínamos.*

— *Clasificar los tipos de acoplamientos de generadores de c. c. más utilizados.*

— *Citar las condiciones que deben reunir los generadores que han de acoplarse en derivación.*

— *Enumerar las maniobras necesarias para el acoplamiento de generadores de excitación independiente y derivación, siguiendo un orden establecido.*

— *Señalar los peligros que lleva consigo una variación en el orden establecido para las maniobras del acoplamiento de generadores derivación.*

— *Valorar la importancia del estudio gráfico sobre el acoplamiento en paralelo de generadores.*

— *Comprobar la utilidad del hilo de equilibrio en los acoplamientos en paralelo de los generadores serie y compound.*

GUION

— Generalidades.
— Tipos de acoplamiento.
— Acoplamiento de generadores de excitación independiente.
— Acoplamiento de generadores de excitación en derivación.
— Acoplamiento de generadores de excitación serie.
— Acoplamiento de generadores de excitación compuesta.

PUNTOS CLAVE

— Comparar entre sí los acoplamientos serie y paralelo.

— Describir el funcionamiento de dos generadores derivación, de diferentes ff. ee. mm. en vacío, al estar acoplados en paralelo.

— Comprobar, con ejercicios de aplicación, las ventajas del estudio gráfico del acoplamiento en paralelo, frente al analítico.

EXPOSICION DEL TEMA

10.1 Generalidades

Si bien la producción y distribución de energía eléctrica se hace, en general, bajo la forma de corriente alterna, no debe olvidarse que en algún tipo de instalaciones es más ventajoso el empleo de corriente continua (ejemplo: tracción de vehículos, electroquímica, etc.).

En este tema se estudian los sistemas de acoplamiento, entre *generadores de corriente continua,* que permiten obtener para cada aplicación las condiciones de máxima seguridad de funcionamiento y mayor rentabilidad.

10.1.1 *Necesidad del acoplamiento*

Como los receptores consumen energía de una forma irregular, a lo largo de la jornada, con predominio de unas horas sobre el resto, es necesario dis-

poner de un generador capaz de suministrar la potencia necesaria en esas horas de plena carga, o bien, repartir la potencia entre varios generadores.

Normalmente, se recurre al empleo de *varios generadores,* por ofrecer más seguridad, autonomía, rentabilidad económica, mayor rendimiento, etc. Así, al producirse una avería en un generador, se pone fuera de servicio y el resto de generadores siguen suministrando parte de la energía; además, puede disponerse de una máquina de reserva de la misma fracción de potencia que la averiada, por dar lugar a una inversión mucho menor que en el caso de tener que disponer de una sola máquina para suministrar toda la energía. El rendimiento de un generador será mayor al trabajar en condiciones nominales, por lo que, en un generador que trabaje con regímenes de carga muy irregulares, el rendimiento será bajo.

10.2 Tipos de acoplamiento

En general, existen dos tipos de acoplamiento:

a) *Acoplamiento en serie.* Utilizado cuando es necesario disponer de tensiones superiores a las que puede proporcionar un solo generador.

b) *Acoplamiento en paralelo.* Utilizado para disponer de una corriente mayor que la que podría suministrar un solo generador.

El acoplamiento en *paralelo* es prácticamente el único utilizado, por lo que será tratado con mayor profundidad.

10.2.1 *Acoplamiento en serie*

En la figura 10.1 se representan tres generadores de c. c. de ff. ee. mm., E_1, E_2, E_3, que pueden suministrar las corrientes I_1, I_2, I_3, respectivamente.

El acoplamiento en serie entre los generadores de c. c. (generadores, pilas, acumuladores) se realiza uniendo el terminal negativo del 1.er generador con el terminal positivo del 2.º, y así sucesivamente (fig. 10.2).

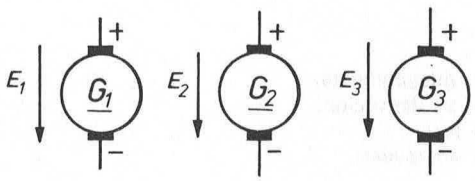


Fig. 10.1 Generadores de c. c. de ff. ee. mm. E_1, E_2, E_3.

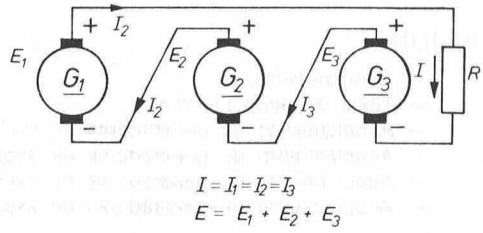


Fig. 10.2 Acoplamiento en serie.

La f. e. m. resultante, E, es la suma de las ff. ee. mm. parciales:

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

La intensidad I es común a todo el circuito:

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

Cada generador debe estar preparado para dar la corriente total I, si bien sus ff. ee. mm. pueden ser diferentes.

Si los generadores son de intensidades nominales diferentes, habrá de utilizarse la menor, para evitar posibles averías.

Ejercicio de aplicación

Se dispone de 3 generadores en serie, según el esquema de la figura 10.2, para alimentar a varios receptores con un consumo de 3 000 W. Los datos de los generadores son: E_1 = 150 V; E_2 = 100 V; E_3 = 60 V; R_{i1} = 0,3 Ω; R_{i2} = 0,4 Ω y R_{i3} = 0,3 Ω. Se trata de averiguar la corriente que circula por los generadores, sabiendo que la intensidad máxima permitida para un generador es de 15 A.

Solución:

En la conexión serie se cumple:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 150 + 100 + 60 = 310 \text{ V}$$

La tensión en bornas de los receptores será:

$$V_b = E - R_t \cdot I = 310 - (0{,}3 + 0{,}4 + 0{,}3) \cdot I = 310 - I$$

A su vez, la potencia absorbida por los receptores será:

$$P = V_b \cdot I = (310 - I) \cdot I = 3\,000 \text{ W}$$

De donde:

$$310 \cdot I - I^2 = 3\,000$$

$$\boxed{I^2 - 310 \cdot I + 3\,000 = 0}$$

Resolviendo la ecuación de 2.º grado:

$$I = \frac{310 \pm \sqrt{310^2 - 4 \times 3\,000}}{2} = \frac{310 \pm 290}{2} = \begin{cases} 300 \text{ A} \\ 10 \text{ A} \end{cases}$$

La solución válida será I = 10 A, ya que uno de los generadores no admite intensidades superiores a 15 A.

10.2.2 *Acoplamiento en paralelo*

En este acoplamiento se unen los terminales positivos de todos los generadores y lo mismo sucede con los negativos (fig. 10.3).

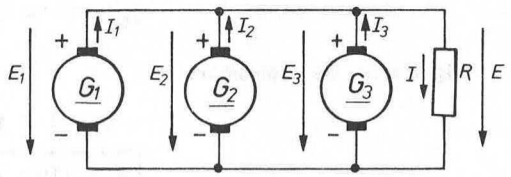


Fig. 10.3 Acoplamiento en derivación.

$I = I_1 + I_2 + I_3$

$E = E_1 = E_2 = E_3$

La intensidad total se obtiene como suma de las intensidades que proporciona cada generador:

$$\boxed{I = I_1 + I_2 + I_3}$$

Las ff. ee. mm. han de ser iguales para todos los generadores, con el fin de evitar corrientes de circulación por el circuito cerrado que forman los generadores:

$$\boxed{E = E_1 = E_2 = E_3}$$

Ejercicio de aplicación

Dos generadores, de resistencias internas $R_{i1} = R_{i2} = 0{,}5\ \Omega$, están acoplados en paralelo y alimentan un receptor que consume 16 A. Al intercalar una resistencia de 6,25 Ω, en serie con la del receptor, la corriente se reduce a la mitad. Las ff. ee. mm. de los dos generadores son iguales y se mantienen constantes en los regímenes de carga citados.

Determinar:

1.º La potencia consumida por el receptor en el primer caso.

2.º La corriente que suministra cada generador en ambos casos.

Solución:

1.º Según el enunciado, el esquema del circuito será el indicado en la figura 10.4. Si el interruptor está en la posición *A*, se conectará la resistencia del receptor y circulará una intensidad de 16 A, cumpliéndose que:

$$V_b = E_1 - (R_{i1} \cdot I_1) = E_2 - (R_{i2} \cdot I_2)$$

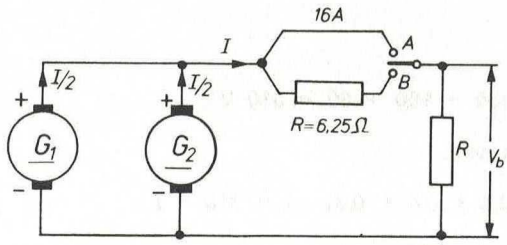


Fig. 10.4 Ejercicio de aplicación sobre generadores acoplados en derivación.

Al ser los dos generadores iguales se cumplirá:

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2}$$

$$R_{i1} = R_{i2} = 0{,}5\ \Omega$$

$$E_1 = E_2 = E$$

Y la expresión anterior se convertirá en:

$$V_b = E - \left(0{,}5 \cdot \frac{I}{2}\right) = E - (0{,}25 \cdot I)$$

Para una intensidad de 16 A:

$$V_b = E - (0{,}25 \times 16) = E - 4$$

A su vez, apl cando la ley de Ohm al receptor:

$$V_b = I \cdot R = 16 \cdot R$$

Igualando las expresiones:

$$E - 4 = 16 \cdot R$$

$$\boxed{E = (16 \cdot R) + 4}$$

Al pasar el interruptor a la posición *B,* la intensidad será la mitad, o sea 8 A:

$$V_b = E - (0{,}25 \times 8) = E - 2$$

$$V_b = (R + 6{,}25) \times 8 = (8 \cdot R) + 50$$

Igualando las dos últimas expresiones:

$$E - 2 = (8 \cdot R) + 50$$

$$\boxed{E = (8 \cdot R) + 52}$$

Según el enunciado, en ambos casos son iguales las ff. ee. mm., por lo que resultará:

$$(16 \cdot R) + 4 = (8 \cdot R) + 52$$

$$8 \cdot R = 48$$

$$\boxed{R = 6\ \Omega}$$

La potencia consumida por el receptor, en la posición *A* del interruptor, será:

$$P = R \cdot I^2 = 6 \times 16^2 = 1\,536\ W$$

2.º En ambos casos, cada generador suministrará 1/2 de la intensidad, por ser los dos iguales:

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2} \begin{cases} \text{para } I = 16\ A & \boxed{I_1 = I_2 = 8\ A} \\ \text{para } I = 8\ A & \boxed{I_1 = I_2 = 4\ A} \end{cases}$$

10.3 Acoplamiento de generadores de excitación independiente

En este tipo de generador, sólo presenta cierto interés el *acoplamiento en derivación.*

En la figura 10.5 se indica el esquema de conexiones correspondiente a dos generadores de excitación independiente que han de acoplarse en paralelo.

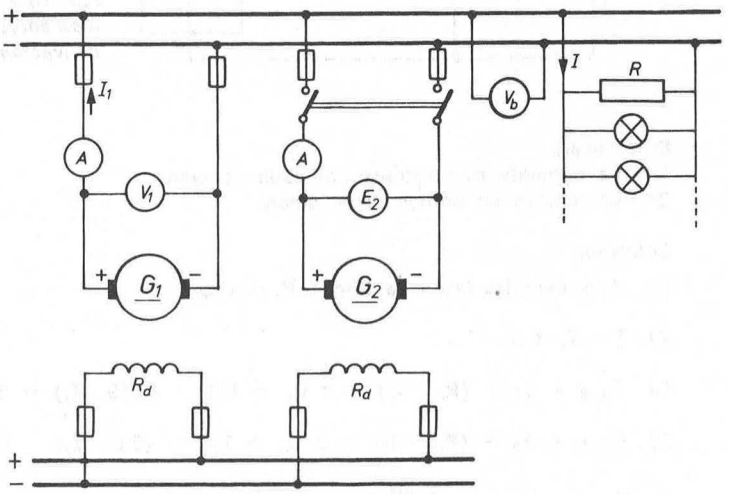


Fig. 10.5 Esquema del acoplamiento de dos generadores de excitación independiente.

En el esquema, el generador G_1 de resistencia interna R_{i1} está suministrando una corriente I_1 a una red exterior y, por aumento de la demanda, es necesario acoplar el generador G_2, de resistencia interna R_{i2}, para lo cual han de cumplirse las condiciones siguientes:

10.3.1 *Condiciones previas al acoplamiento en derivación*

1.ª Los bornes positivo y negativo del generador G_2 han de conectarse al positivo y negativo de la red respectivamente. Una polaridad opuesta daría lugar a un cortocircuito.

2.ª La f. e. m. del generador G_2 debe ser igual a la tensión en bornes de la red, para evitar una corriente de circulación elevada.

Aun conectando los terminales con la polaridad correcta, puede ocurrir que la f. e. m. E_2 generada por G_2 sea superior o inferior a la tensión de red V_b en el momento del acoplamiento y, por tanto, circular una corriente I_c que valdrá, según los casos:

1.º

$$I_c = \frac{E_2 - V_b}{R_{i2} + 2\ U_e}$$

para $E_2 > V_b$ (funcionamiento como generador).

2.º

$$I_c = \frac{V_b - E_2}{R_{i2} + 2\ U_e}$$

para $V_b > E_2$ (funcionamiento como motor).

Dado el pequeño valor del denominador, la corriente I_c puede llegar a ser muy elevada, aun sin haber gran diferencia entre los términos E_2 y V_b. Este valor excesivo de I_c puede motivar un par *resistente brusco* en el primer caso (generador), o bien, un *par motor brusco* en el segundo caso; en ambos, el efecto es perjudicial al funcionamiento del grupo.

Ejercicio de aplicación

Se dispone de dos generadores G_1 y G_2, conectados en paralelo, para alimentar un circuito formado por 3 resistencias de 20 Ω conectadas en paralelo (fig. 10.6). Los datos relativos a los generadores son: $E_1 = 105$ V; $R_{i1} = 0{,}15$ Ω; $2\ U_e = 2$ V; $E_2 = 100$ V; $R_{i2} = 0{,}4$ Ω; $2\ U_e = 2$ V.

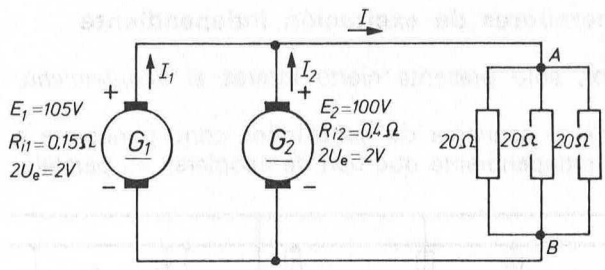


Fig. 10.6 Ejercicio de aplicación sobre dos generadores en derivación.

Determinar:
1.º La corriente suministrada por cada generacor.
2.º La tensión en bornes de la carga.

Solución:

1.º Aplicando las leyes de Kirchhoff, resultará:

A) $I = I_1 + I_2$

B) $V_{A\text{-}B} = E_1 - (R_{i1} \cdot I_1) - 2\ U_e = 105 - (0{,}15 \cdot I_1) - 2 = 103 - (0{,}15 \cdot I_1)$

C) $V_{A\text{-}B} = E_2 - (R_{i2} \cdot I_2) - 2\ U_e = 100 - (0{,}4 \cdot I_2) - 2 = 98 - (0{,}4 \cdot I_2)$

D) $V_{A\text{-}B} = R \cdot I = \left(\frac{20}{3}\right) \cdot I$

Igualando *B* y *C* y despejando I_1:

$$103 - (0{,}15 \cdot I_1) = 98 - (0{,}4 \cdot I_2)$$

E) $$I_1 = \frac{103 - 98 + (0{,}4 \cdot I_2)}{0{,}15} = \frac{5 + (0{,}4 \cdot I_2)}{0{,}15}$$

Al sustituir *A* en *D*, e igualar a *C*, quedará:

F) $$\frac{20}{3}\ (I_1 + I_2) = 98 - (0{,}4 \cdot I_2)$$

Sustituyendo en *F* el valor obtenido para I_1 en *E*:

G) $$\frac{20}{3} \times \left(\frac{5 + (0{,}4 \cdot I_2)}{0{,}15}\right) + \left(\frac{20}{3} \cdot I_2\right) = 98 - (0{,}4 \cdot I_2)$$

Para eliminar denominadores, se multiplican todos los términos por 0,45:

$$100 + (8 \cdot I_2) + (3 \cdot I_2) = 44{,}1 - (0{,}18 \cdot I_2)$$

De donde se obtendrá el valor de I_2:

$$11{,}18 \cdot I_2 = -55{,}9$$

$$\boxed{I_2 = -5\ A}$$

El valor de I_1 se obtiene sustituyendo el valor obtenido para I_2 en *E*:

$$I_1 = \frac{5 + 0{,}4 \times (-5)}{0{,}15} = \frac{3}{0{,}15} = \boxed{20\ A}$$

La corriente que llega a los receptores se obtiene al sustituir I_1 e I_2 en *A*:

$$I = I_1 + I_2 = 20 + (-5) = 15\ A$$

El generador G_2, en realidad, no suministra corriente a la red, sino que la absorbe del G_1; por tanto, se comporta como un receptor. El motivo de su comportamiento se debe a su bajo valor de f. e. m. con respecto a E_1.

2.º La tensión en bornes se obtiene sustituyendo los valores de las intensidades en cualquiera de las expresiones *B*, *C* o *D*; así, en la expresión *D*:

$$V_{A\text{-}B} = R \cdot I = \frac{20}{3} \times 15 = \boxed{100\ V}$$

Comprobación en *B* y *C*:

$$V_{A\text{-}B} = E_1 - (R_{i1} \cdot I_1) - 2\,U_e = 105 - (0{,}15 \times 20) - 2 = 100\ V$$

$$V_{A\text{-}B} = E_2 - (R_{i2} \cdot I_2) - 2\,U_e = 100 - [0{,}4 \times (-5)] - 2 = 100\ V$$

10.3.2 *Maniobras para el acoplamiento*

Una vez cumplidas las dos condiciones citadas, se efectuarán las maniobras del acoplamiento del generador G_2, según el siguiente orden:

1.º Se hace girar el generador G_2 a su velocidad nominal, mediante el motor de arrastre M_2 (fig. 10.7).

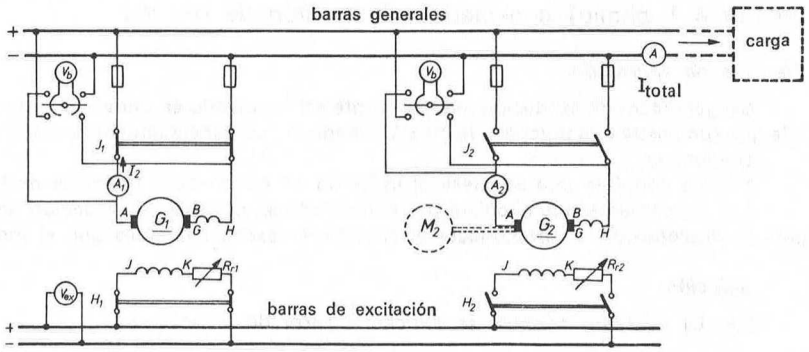


Fig. 10.7 Acoplamiento en paralelo de dos generadores de excitación independiente.

2.º Se cierra el interruptor automático H_2 y quedará conectado el circuito de excitación, generándose una f. e. m. E_2. Se comprueba la correspondencia de la polaridad entre G_2 y la red. Puede utilizarse, para la comprobación, un voltímetro electromagnético de bobina móvil. En este caso, se ha utilizado un conmutador rotativo de dos posiciones para medir la tensión de red y del generador G_2 en cada posición.

3.º Mediante el reóstato de campo R_{r2}, se actúa sobre la corriente de excitación hasta conseguir que la máquina dé una f. e. m. E_2 igual a la tensión de red V_b.

4.º Se cierra el interruptor automático J_2, por lo que G_2 quedará acoplado en paralelo con la red y, por tanto, con G_1. Se observará que el amperímetro A_2 no señala paso de corriente debido al equilibrio entre la f. e. m. de G_2 y la tensión de red.

5.º Para conseguir que el generador G_2 suministre corriente a la red, ha de actuarse sobre la excitación disminuyendo la resistencia de R_{r2}. Al disminuir la resistencia de excitación de G_2, aumentará la corriente de excitación que, a su vez, motivará un aumento de la f. e. m. E_2.

6.º El reparto de las cargas entre los dos generadores se conseguirá actuando sobre la resistencia de excitación y observando las lecturas de los amperímetros A_1, A_2 y el de red A. Una vez conseguido el ajuste de las cargas, el generador G_1 dará una corriente inferior a la que suministraba antes del acoplamiento, y la tensión en bornes podrá aumentar ligeramente.

La marcha de las máquinas acopladas es muy estable, por lo que podrán funcionar sin demasiada vigilancia, ya que una variación en la carga apenas repercute en la tensión en bornes, según puede observarse en la característica exterior del generador de excitación independiente (ver apartado 8.8).

Una disminución considerable en la velocidad del motor de arrastre M_2 puede dar lugar a la *inversión* en el funcionamiento del generador G_2, y seguir éste, girando como motor.

10.3.3 *Maniobras para la desconexión*

Cuando sea necesario dejar fuera de servicio un generador (G_2), se realizan las operaciones descritas para el acoplamiento pero en sentido inverso:

1.º Se aumenta la resistencia R_{r2}, por lo que disminuirá la corriente de excitación y la f. e. m. E_2.

Al disminuir la f. e. m., el amperímetro A_2 señalará una intensidad que irá disminuyendo hasta llegar a ser próxima a cero.

2.º Se abre el interruptor J_2, por lo cual la máquina seguirá funcionando en vacío.

3.º Se desconecta el circuito de excitación, indicando entonces el voltímetro V_b la tensión inducida por el magnetismo remanente.

4.º Finalmente, se lleva a cero la velocidad del grupo, actuando sobre el motor de arrastre.

10.3.3.1 *Peligros en las maniobras para la desconexión*

a) Si, por error, se abre el circuito de excitación del generador G_2 antes que se desconecte el inducido de la red, se producirá un *cortocircuito,* ya que el generador se comportaría como un receptor de resistencia R_{i2} (normalmente inferior a 1 ohmio) conectado a la tensión de red V_b.

Ejercicio de aplicación

Un generador de excitación independiente está acoplado en derivación a una red de 400 V, a la que suministra una potencia de 10 kW, siendo su resistencia interior $R_i = 0{,}5\ \Omega$ y $2\ U_e = 2$ V.

Determinar:

1.º La corriente que atraviesa el inducido en condiciones normales de funcionamiento.

2.º La corriente que circulará por el inducido si, por una equivocación en las maniobras para la desconexión, se desconecta el circuito de excitación antes que el inducido.

Solución:

1.º La corriente nominal se obtiene a partir de la potencia:

$$I_{p.\,c.} = \frac{P}{V_b} = \frac{10\,000}{400} = 25\ \text{A}$$

2.º Al desconectar la excitación y continuar girando el generador, se comportará éste como si el inducido fuese un receptor de resistencia 0,5 Ω, conectado a 400 V. Así, pues, la corriente que circulará por el inducido se obtendría a partir de la tensión:

$$V_b = R_i \cdot I_{cc} + 2\ U_e$$

$$I_{cc} = \frac{V_b - 2\ U_e}{R_i} = \frac{400 - 2}{0{,}5} = 796\ \text{A}$$

Esta corriente de cortocircuito $I_{cc} \approx 32 \cdot I_{p.\,c.}$ quemaría el inducido.

Si en el generador se mantiene el *magnetismo remanente,* se inducirá una f. e. m. de valor mínimo (< 5 V), que quedaría conectada en oposición con la tensión de red. En el caso más favorable (f. e. m. remanente = 5 V), sería:

$$I_{cc} = \frac{V_b - 2\ U_e - 5}{R_i} = \frac{400 - 2 - 5}{0{,}5} = 786\ \text{A}$$

En este caso, el valor de la corriente de cortocircuito es muy similar al anterior.

b) Independientemente de la avería de cortocircuito, también se producirán fenómenos de autoinducción al interrumpirse bruscamente los circuitos de excitación y de carga, por haber una gran variación de corriente en un tiempo muy pequeño.

Ejercicios de aplicación

1.º Un generador de excitación independiente dispone de un devanado inductor de resistencia 50 Ω, que está conectado a una red de 200 V.

Determinar:

a) La f. e. m. de autoinducción al abrir el interruptor de la red en 0,01 s. El coeficiente de autoinducción de la bobina vale L = 0,125 H.

b) La potencia disipada en la apertura del circuito.

Solución:

a) La f. e. m. de autoinducción e_a vale:

$$|e_a| = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta T}$$

En donde:

L = inductancia (H)
ΔI = variación de corriente en el circuito (A)
ΔT = tiempo (s)

La intensidad varía, desde su valor nominal, a cero:

$$I_{ex.} = \frac{V_{ex.}}{R_{ex.}} = \frac{200}{50} = 4 \text{ A}$$

Al sustituir, quedará para e_a:

$$|e_a| = 0{,}125 \times \frac{(4 - 0)}{0{,}01} = 50 \text{ V}$$

b) La energía almacenada será:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \times 0{,}125 \times 4^2 = 1 \text{ J}$$

La potencia disipada P se manifiesta en forma de chispa y vale:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1}{0{,}01} = 100 \text{ W}$$

2.º Tres generadores, G_1, G_2 y G_3, que funcionan en paralelo (fig. 10.8), tienen cada uno una resistencia interior $R_i = 0{,}2\ \Omega$, y el circuito de excitación independiente. En condiciones normales de funcionamiento, alimentan una carga que consume 90 kW a 300 V.

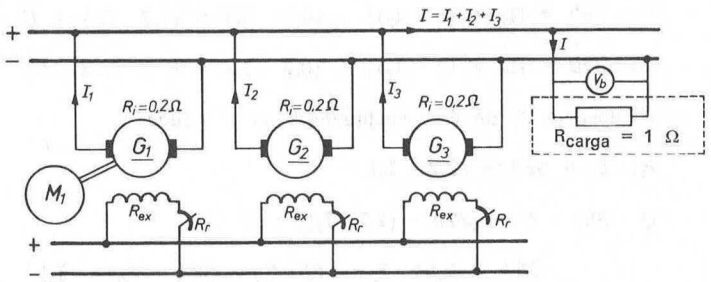


Fig. 10.8 Ejercicio de aplicación sobre tres generadores de excitación independiente acoplados en derivación.

Determinar:

a) La f. e. m. generada por cada dínamo. No considerar la caída de tensión en escobillas.

b) La tensión en bornes de la carga cuando el generador G_1 aumenta su f. e. m. en un 10 %, por variar la velocidad de su motor de arrastre.

c) Las intensidades que suministran los tres generadores, según las condiciones descritas en el segundo apartado.

d) Las potencias suministradas por cada generador, antes y después de la modificación de la f. e. m. de G_1.

Solución:

a) En este caso todas las ff. ee. mm. son iguales:

$$E_1 = E_2 = E_3 = V_b + (R_i \cdot I_1) = 300 + (0{,}2 \cdot I_1)$$

La intensidad total es:

$$I = \frac{P}{V_b} = \frac{90\,000}{300} = 300 \text{ A}$$

La intensidad suministrada por cada generador es:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I}{3} = \frac{300}{3} = 100 \text{ A}$$

Sustituyendo en la expresión de la f. e. m.:

$$E_1 = E_2 = E_3 = 300 + (0{,}2 \times 100) = \boxed{320 \text{ V}}$$

La resistencia de carga R_c:

$$R_c = \frac{V_b}{I} = \frac{320}{320} = 1\ \Omega$$

b) Al aumentar la f. e. m. de G_1, se modificarán los datos del enunciado con el consiguiente *aumento de la tensión en bornes* V_b *y de la intensidad* I.

La f. e. m. de G_1 será ahora:

$$E_1 = 320 + \left(\frac{10}{100} \times 320\right) = 352 \text{ V}$$

Las ff. ee. mm. de G_2 y G_3 no se han modificado ($E_2 = E_3 = 320$ V), y sus corrientes serán ahora $I_2 = I_3$.

Las ecuaciones que se deben plantear serán:

A) $352 = V_b + (0{,}2 \cdot I_1)$

B) $320 = V_b + (0{,}2 \cdot I_2)$

C) $V_b = R_c \cdot I = 1 \cdot I$

D) $I = I_1 + I_2 + I_3 = I_1 + (2 \cdot I_2)$

Sustituyendo *D* en *C*:

E) $V_b = 1 \cdot [I_1 + (2 \cdot I_2)] = I_1 + (2 \cdot I_2)$

Sustituyendo *E* en *A* y en *B*, quedará:

F) $352 = [I_1 + (2 \cdot I_2)] + (0{,}2 \cdot I_1) = (1{,}2 \cdot I_1) + (2 \cdot I_2)$

G) $320 = [I_1 + (2 \cdot I_2)] + (0{,}2 \cdot I_2) = I_1 + (2{,}2 \cdot I_2)$

Al despejar I_1 de *G* y sustituyendo en *F* quedará:

H) $I_1 = 320 - (2{,}2 \cdot I_2)$

I) $352 = 1{,}2 \cdot [320 - (2{,}2 \cdot I_2)] + (2 \cdot I_2)$

$$= 384 - (2{,}64 \cdot I_2) + (2 \cdot I_2) = 384 - (0{,}64 \cdot I_2)$$

$$I_2 = \frac{384 - 352}{0{,}64} = \boxed{50 \text{ A}}$$

La tensión en bornes de la carga se obtiene sustituyendo I_2 en *B*:

$$V_b = 320 - (0{,}2 \cdot I_2) = 320 - (0{,}2 \times 50) = \boxed{310 \text{ V}}$$

c) La intensidad I_1 se obtiene sustituyendo I_2 en *H*:

$$I_1 = 320 - (2{,}2 \times 50) = \boxed{210 \text{ A}}$$

Así, pues, las corrientes serán:

$$\boxed{I_1 = 210 \text{ A}} \qquad \boxed{I_2 = I_3 = 50 \text{ A}}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 210 + 50 + 50 = \boxed{310 \text{ A}}$$

d) Antes de variar la f. e. m. de G_2, la potencia que suministraba cada generador era:

$$P_1 = P_2 = P_3 = \frac{P}{3} = \frac{90}{3} = 30 \text{ kW}$$

Una vez modificada la f. e. m. de G_2, las potencias son diferentes:

$$P_1 = V_b \cdot I_1 = 310 \times 210 = 65{,}1 \text{ kW}$$

$$P_2 = P_3 = V_b \cdot I_2 = 310 \times 50 = 15{,}5 \text{ kW}$$

Comprobación:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 65{,}1 + 15{,}5 + 15{,}5 = \boxed{96{,}1 \text{ kW}}$$

$$P = V_b \cdot I = 310 \times 310 = \boxed{96{,}1 \text{ kW}}$$

En este ejercicio ha podido apreciarse la *influencia de la variación de velocidad* de un generador acoplado en paralelo con otros generadores.

10.4 Acoplamiento de generadores con excitación en derivación

En el *generador derivación* se utiliza, en la mayoría de los casos, el acoplamiento en *paralelo* y muy raramente el acoplamiento en serie.

10.4.1 *Acoplamiento de generadores con excitación en derivación*

En la figura 10.9 se representa el esquema de acoplamiento de dos dínamos derivación, con dos tipos de conexiones en el circuito de excitación:

a) Corresponde al esquema de la figura 10.9A, en el que se aprecia la independencia en la excitación entre los dos generadores, con el consiguiente peligro para el cebado de un generador. Por ejemplo, al cebarse G_2 antes que G_1, se *invertirá la corriente de excitación* en G_1, según indica la flecha de trazos, pudiendo generar una f. e. m. E_1, de sentido contrario a E_2, dando lugar a una tensión en bornes de la carga mínima.

b) Para evitar los inconvenientes surgidos de la conexión anterior, se utiliza la conexión serie en el circuito de excitación (fig. 10.9B). En este caso, no puede haber inversión en la excitación de uno de los generadores y, por ello, el acoplamiento será más estable que el anterior.

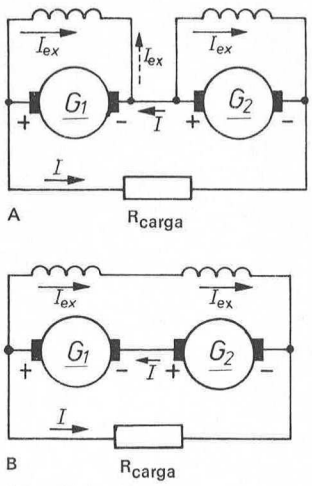


Fig. 10.9 Acoplamiento serie de generadores de excitación en derivación: A, *excitaciones en derivación;* B, *excitaciones en serie.*

10.4.2 *Acoplamiento en paralelo de generadores con excitación derivación*

Es el acoplamiento más empleado, por ser muy práctico y ofrecer gran estabilidad en su funcionamiento, además de su simplicidad al evitar una red para alimentar los circuitos de excitación.

Las condiciones previas al acoplamiento son idénticas a las descritas para el generador de excitación independiente (apartado 10.3.1).

10.4.2.1 *Maniobras para el acoplamiento*

Las maniobras necesarias en la conexión y desconexión también son similares a las del generador independiente.

El esquema general de conexiones se indica en la figura 10.10, apreciándose su paralelismo con el esquema de la figura 10.7, a excepción de las conexiones en los circuitos de excitación.

Dada la similitud entre el acoplamiento de dínamos independientes y dínamos derivación, cabe pensar en la posibilidad de un acoplamiento entre ambos tipos de generadores para alimentar una red, por lo que en alguna ocasión se utilizará este sistema.

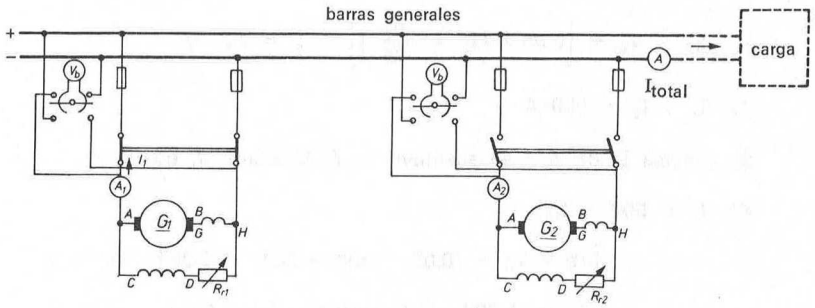


Fig. 10.10 Acoplamiento en paralelo de dos generadores de excitación derivación.

Ejercicio de aplicación

Un generador G_2 se conecta en derivación con un generador G_1 (fig. 10.10), siendo ambos de excitación en derivación, con resistencias $R_{ex.1} = R_{ex.2} = 100\ \Omega$. La corriente que absorbe la carga es de 500 A y las ff. ee. mm. que da cada generador son $E_1 = 440$ V y $E_2 = 450$ V. Se trata de averiguar:

1.º La corriente que suministra cada generador, siendo $R_{i1} = R_{i2} = 0{,}05\ \Omega$ y $2\ U_e = 2$ V.

2.º La tensión en bornes de la carga.

3.º Las corrientes de excitación y total del inducido de cada generador.

Solución:

1.º Aunque son los dos generadores idénticos, puede ocurrir que la f. e. m. sea diferente, bien porque se actúe sobre el reóstato R_{r2}, o porque varíe la velocidad del motor de arrastre M_2.

Las ecuaciones que hay que plantear (fig. 10.11) serán:

A) $I = I_1 + I_2 = 500\ A$

B) $I_{ex.1} = I_{ex.2} = \frac{V_b}{R_{ex.}} = \frac{V_b}{25}$

C) $I_{i1} = I_1 + I_{ex.1}$

D) $I_{i2} = I_2 + I_{ex.2}$

E) $E_1 = V_b + (R_{i1} \cdot I_{i1}) + 2\ U_e = V_b + (0{,}05 \cdot I_{i1}) + 2$

F) $E_2 = V_b + (R_{i2} \cdot I_{i2}) + 2\ U_e = V_b + (0{,}05 \cdot I_{i2}) + 2$

Se sustituye *B* en *C* y en *D*:

G) $I_{i1} = I_1 + \frac{V_b}{25}$

H) $I_{i2} = I_2 + \frac{V_b}{25}$

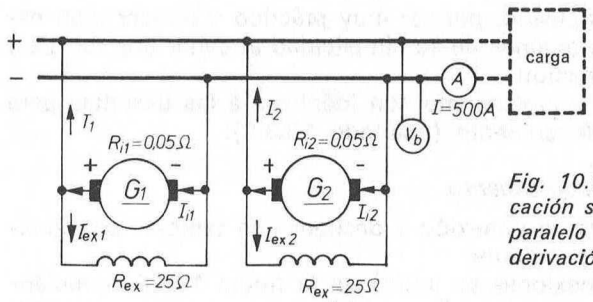


Fig. 10.11 Ejercicio de aplicación sobre acoplamiento en paralelo de dos generadores derivación.

Se sustituye *G* en *E* y *H* en *F*. Al añadir la ecuación *A*, se forma un sistema de tres ecuaciones:

I) $E_1 = V_b + \left[0{,}05 \cdot \left(I_1 + \frac{V_b}{25}\right)\right] + 2 = 440\ V$

J) $E_2 = V_b + \left[0{,}05 \cdot \left(I_2 + \frac{V_b}{25}\right)\right] + 2 = 450\ V$

A) $I_1 + I_2 = 500\ A$

Se despeja I_1 de *A* y se sustituye en *I*. Al añadir *J*, quedará:

K) $I_1 = 500 - I_2$

$$440 = V_b + [0{,}05 \cdot (500 - I_2)] + (0{,}002 \cdot V_b) + 2$$

$$= (1{,}002 \cdot V_b) - (0{,}05 \cdot I_2) + 27$$

L) $440 - 27 = 413 = (1{,}002 \cdot V_b) - (0{,}05 \cdot I_2)$

J) $450 - 2 = 448 = (1{,}002 \cdot V_b) + (0{,}05 \cdot I_2)$

Restando *L* a *J*, se obtiene:

$$448 - 413 = 35 = 2 \times (0{,}05 \cdot I_2) = 0{,}1 \cdot I_2$$

Obteniéndose el valor de I_2:

$$\boxed{I_2 = \frac{35}{0{,}1} = 350\ A}$$

Sustituyendo el valor obtenido de I_2 en *K* se obtendrá el valor de I_1:

$$\boxed{I_1 = 500 - 350 = 150\ A}$$

2.º La tensión V_b se puede obtener de varias ecuaciones; por ejemplo, de *L*:

$$V_b = \frac{413 + (0{,}05 \cdot I_2)}{1{,}002} = \frac{413 + (0{,}05 \times 350)}{1{,}002} = \boxed{429{,}64 \text{ V}}$$

Comprobación en *J*:

$$V_b = \frac{448 - (0{,}05 \cdot I_2)}{1{,}002} = \frac{448 - (0{,}05 \times 350)}{1{,}002} = \boxed{429{,}64 \text{ V}}$$

3.º Finalmente, las corrientes de excitación se obtienen de *B*:

$$I_{ex.1} = I_{ex.2} = \frac{429{,}65}{25} = \boxed{17{,}18 \text{ A}}$$

Las corrientes totales del inducido se obtienen de *C* y *D*:

$$I_{i1} = 150 + 17{,}18 = \boxed{167{,}18 \text{ A}}$$

$$I_{i2} = 350 + 17{,}18 = \boxed{367{,}18 \text{ A}}$$

10.4.3 *Estudio gráfico del acoplamiento en paralelo de generadores derivación*

El reparto de carga entre dos o más generadores en paralelo puede hacerse a través de sus *características exteriores.* Dada la semejanza entre las características exteriores de los generadores independientes y derivación, podrán hacerse extensivos el estudio y conclusiones del acoplamiento en derivación, a los generadores de *excitación independiente.*

10.4.3.1 *Características de dos generadores acoplados en paralelo*

En la figura 10.10 se representaba el esquema del acoplamiento entre los generadores G_1 y G_2, y ahora se tratará de distribuir la corriente total entre los dos generadores, para lo cual será necesario conocer sus características exteriores $V_b = f(I)$.

Para simplificar el gráfico, se suponen rectilíneas las características. En la figura 10.12 se indican dos características de dos generadores de diferente pendiente (*a*, *b*), por lo que suministrarán diferentes corrientes (I_1, I_2) para la misma tensión en bornes V_b. La corriente total se obtiene por suma de las corrientes parciales I_1 e I_2, de forma que el funcionamiento normal vendrá señalado por el punto *P*, cuyas coordenadas son V_b e I.

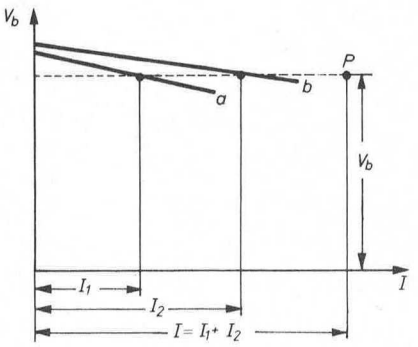


Fig. 10.12 Características exteriores de dos generadores derivación.

10.4.3.2 *Estudio del acoplamiento con las características en sentido inverso*

Resulta más sencillo el estudio gráfico del acoplamiento al representar las características exteriores (1, 2) en *sentido inverso* (fig. 10.13), para lo cual se toman dos ejes de ordenadas para las tensiones (V_{b1}, V_{b2}) y un eje de abscisas común para las intensidades (I_1, I_2). Se ha supuesto que, en vacío, ambos generadores (G_1, G_2) dan la misma tensión, y por ello sus características parten del mismo valor de ordenadas (punto A).

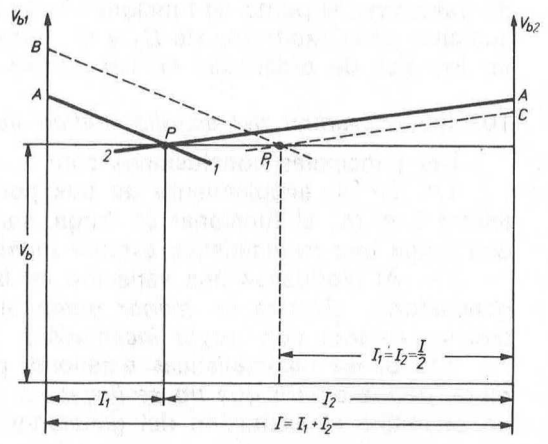


Fig. 10.13 Reparto equilibrado de la carga a tensión constante.

El punto P de intersección de ambas características corresponde al funcionamiento en paralelo de ambos generadores y señala tanto la tensión en bornes de la carga (V_b) como la corriente que suministra cada generador (I_1, I_2).

En el gráfico se observa que el generador de característica exterior *menos inclinada* es el que suministra *mayor intensidad.*

10.4.3.3 *Reparto equilibrado de la carga a tensión constante*

Para conseguir que cada generador suministre el 50 % de la carga, a la tensión anterior V_b, el punto de funcionamiento ha de trasladarse a P_1.

Las tensiones de vacío se obtendrán trasladando paralelas a las características anteriores (1, 2), por el punto P_1; tales paralelas cortarán los ejes de ordenadas en los puntos B y C. Para conseguir estas nuevas características, habrá de aumentarse la corriente de excitación de G_1 y disminuir la de G_2.

10.4.3.4 *Variación de la carga*

Si estando funcionando según el punto P_1 de la figura 10.13, los receptores provocan un aumento de carga de I a I' (fig. 10.14), el punto de funcionamiento se vuelve a trasladar hasta P_2, con la consiguiente variación de la tensión en bornes e intensidad suministradas por cada generador.

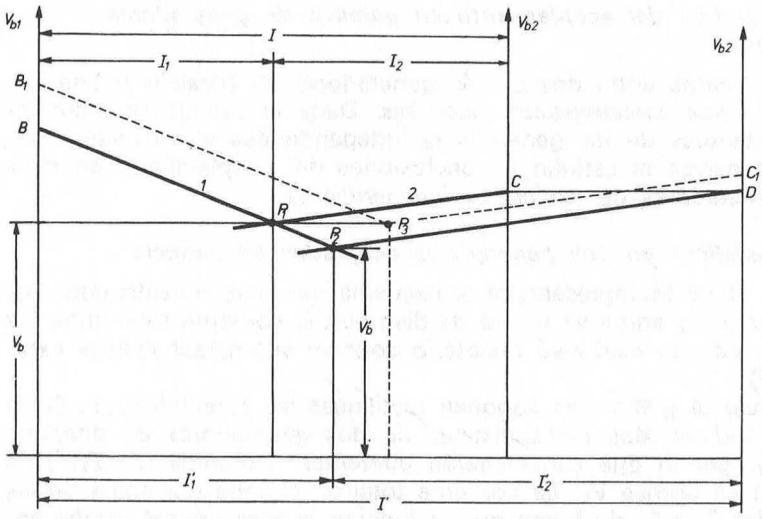


Fig. 10.14 Variación de la carga en el acoplamiento en paralelo de dos generadores.

El punto P_2 se obtiene por intersección de la característica 1 con la paralela a la 2, que pasa por el punto D.

El funcionamiento según el punto P_2 indica una disminución en la tensión en bornes, que toma ahora el valor de V'_b.

También las corrientes se han desequilibrado, siendo G_2 el generador que tendrá que suministrar la mayor parte de la variación de carga. En efecto, ahora G_2 suministra una corriente $I'_2 \gg I_2$, mientras que G_1 da una corriente I'_1 un poco superior a I_1.

Si se quiere recuperar de nuevo el equilibrio y elevar la tensión a V_b, habrá de trasladarse el punto de funcionamiento a P_3 (fig. 10.14), con el consiguiente aumento de la excitación de G_1 y G_2, señalados por líneas de trazos hasta cortar los ejes de ordenadas en los puntos B_1 y C_1.

10.4.3.5 *Resumen del estudio gráfico del acoplamiento*

Las principales conclusiones son:

1.ª En un acoplamiento de dos generadores que producen en vacío la misma f. e. m., al funcionar en carga, suministrará *más corriente* el generador que tenga una característica exterior *menos inclinada.*

2.ª Al producirse una variación en la carga, en un acoplamiento de dos generadores, afectará en *menor grado* al generador que presente su característica exterior con *mayor inclinación.*

3.ª Si las características exteriores presentan una inclinación muy diferente, *podría ocurrir que no se llegase a un reparto del 50 % de la carga,* por no permitirlo la excitación del generador que presente *mayor inclinación.*

Ejercicios de aplicación

1.º Dos generadores de excitación independiente están acoplados en derivación. El generador G_1 da en vacío una tensión de 90 V y, para una carga de 80 A, produce una tensión de 80 V; mientras que G_2 suministra en vacío 95 V y, para una carga de 50 A, da 80 V. Suponiendo las características exteriores rectilíneas, se trata de averiguar la tensión en bornes de la carga y el reparto de corrientes en los casos siguientes:

a) Que la carga total sea de 100 A.

b) Que G_1 trabaje en vacío.

Solución:

a) Se construye un gráfico (fig. 10.15), tomando como ejes de ordenadas las tensiones de cada generador, y como eje de abscisas, la corriente total:

$$I = I_1 + I_2 = 80 + 50 = 130 \text{ A}$$

Se trazan las características exteriores en sentido inverso; así, la de G_1 es la recta (1), que parte de $V_{b1} = 90$ V y pasa por el punto P ($V_{b1} = 80$ V, $I_1 = 80$ A). La característica de G_2 es la recta (2), que parte de $V_{b2} = 95$ V y pasa por el punto P. En el punto P los generadores suministran una carga total de 130 A, a una tensión de 80 V.

Al reducirse la corriente a 100 A, el eje de ordenadas de G_2 se traslada hacia la izquierda, de forma que la tensión en vacío pasa de C a D. La nueva característica de G_2, que se obtiene trazando la paralela a la recta (2) por el punto D, cortará la característica (1) en el punto P_1 y corresponderá al acoplamiento para una corriente total de 100 A.

Las coordenadas de P_1 son:

$$V_b = 82 \text{ V}; \quad I_1 = 59 \text{ A}; \quad I_2 = 41 \text{ A}$$

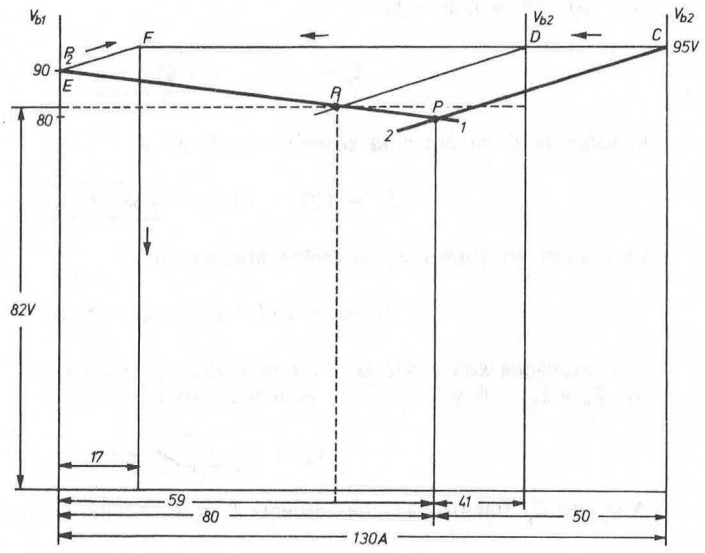


Fig. 10.15 Ejercicio de aplicación sobre reparto gráfico de carga en dos generadores de excitación independiente.

b) Al trabajar G_1 en vacío, no suministrará corriente (punto E), y el punto de funcionamiento de G_2 se obtendrá al trazar una paralela a la recta (2) por el punto E, que cortará la prolongación de la recta CD en el punto F.

Las coordenadas de E son:

$$V_b = 90 \text{ V}; \quad I_1 = 0; \quad I_2 = 17 \text{ A}$$

En el funcionamiento, según el punto E, el generador G_1 no suministra corriente a pesar de estar conectado a la red, debido a que su f. e. m. es igual a la tensión en bornes.

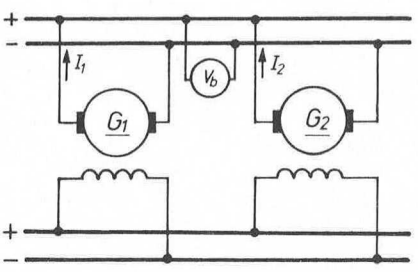


Fig. 10.16 Ejercicio de aplicación sobre el estudio analítico del acoplamiento en derivación representado en la figura 10.15.

2.º Suponiendo que en los generadores del ejercicio anterior está compensada la reacción de inducido, determinar analíticamente el reparto de corrientes y la tensión en bornes, en los casos siguientes:

a) Que la carga total sea de 100 A. Suponer $2\ U_e = 2$ V en ambos generadores.

b) Que G_1 trabaje en vacío. Tómese en G_1, $2\ U_e = 0$; y en G_2, $2\ U_e = 0{,}5$ V.

Solución:

a) Aplicando las ecuaciones sobre ff. ee. mm., podrán determinarse las resistencias internas:

$$E_1 = V_b + (R_{i1} \cdot I_1) + 2\ U_e;\ 90 = 80 + (R_{i1} \cdot 80) + 2;\ R_{i1} = \frac{90 - 82}{80} = 0{,}1\ \Omega$$

$$E_2 = V_b + (R_{i2} \cdot I_2) + 2\ U_e;\ 95 = 80 + (R_{i2} \cdot 50) + 2;\ R_{i2} = \frac{95 - 82}{50} = 0{,}26\ \Omega$$

Cuando suministre una corriente de 100 A, se cumplirá:

A) $I_1 + I_2 = 100$ A

B) $90 = V_b + (0{,}1 \cdot I_1) + 2$

C) $95 = V_b + (0{,}26 \cdot I_2) + 2$

Restando *B* a *C*, quedará:

D) $5 = (0{,}26 \cdot I_2) - (0{,}1 \cdot I_1)$

A) $100 = (I_2 + I_1)$

Multiplicando *A* por 0,1 y sumándola a *D*, se obtendrá I_2:

E) $10 = (0{,}1 \cdot I_2) + (0{,}1 \cdot I_1)$

D) $5 = (0{,}26 \cdot I_2) - (0{,}1 \cdot I_1)$

D + E) $15 = 0{,}36 \cdot I_2$

$$I_2 = \frac{15}{0{,}36} = \boxed{41{,}66\ \text{A}}$$

El valor de I_1 se obtendrá sustituyendo I_2 en *A*:

$$I_1 = 100 - 41{,}66 = \boxed{58{,}33\ \text{A}}$$

La tensión en bornes V_b se puede obtener de *B*:

$$V_b = 90 - (0{,}1 \cdot I_1) - 2 = 83{,}83\ \text{V}$$

Los resultados son similares a los obtenidos gráficamente.
b) Para $I_1 = 0$ y $2\ U_e = 0$, la tensión en bornes será:

$$V_b = E_0 = \boxed{90\ \text{V}}$$

A su vez G_2 suministrará una corriente I_2, que se obtendrá a partir de su f. e. m.:

$$E_2 = V_b + (R_{i2} \cdot I_2) + 2\ U_e$$

En donde:

$$2\ U_e = 0{,}5\ \text{V}$$

$$I_2 = \frac{E_2 - V_b - 2\ U_e}{0{,}26} = \frac{95 - 90 - 0{,}5}{0{,}26} = \boxed{17{,}3\ \text{A}}$$

Los resultados son prácticamente iguales a los obtenidos por el procedimiento gráfico.

10.5 Acoplamiento de generadores de excitación serie

Al igual que en otros tipos de dínamos, se utilizan dos tipos de acoplamiento: serie y paralelo.

Propiamente, como generadores no se emplean sino *indirectamente*, al pasar de motor a generador, como sucede en el frenado por recuperación en tracción eléctrica.

10.5.1 *Acoplamiento en serie de generadores serie*

El esquema de conexiones consiste en unir el terminal positivo del primer generador (G_1) con el terminal negativo del segundo (G_2), y así sucesivamente (fig. 10.17).

Este acoplamiento es muy estable, ya que, aunque disminuya la f. e. m. de un generador, nunca puede producirse la inversión en la excitación de ningún generador, según puede apreciarse por el sentido de la corriente en el circuito.

La conexión serie de generadores es utilizada durante la marcha en recuperación de locomotoras eléctricas, en cualquiera de las combinaciones siguientes:

a) Todos sus motores en serie, para bajas velocidades.
b) Todos sus motores en serie-paralelo, para velocidades medias.
c) Grupos de dos motores serie en paralelo, para altas velocidades.

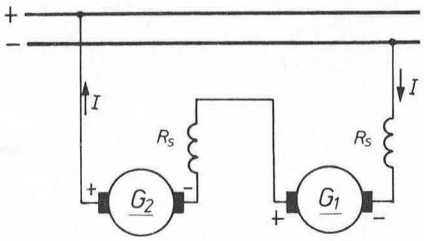


Fig. 10.17 Acoplamiento en serie de dos generadores serie.

10.5.2 *Acoplamiento en paralelo de generadores serie*

Este acoplamiento se realiza uniendo los terminales de la misma polaridad de todos los generadores (fig. 10.18A).

En este acoplamiento se observa que una disminución en la f. e. m. de un generador, por ejemplo E_2, da lugar a una inversión de corriente en su circuito de excitación (fig. 10.18B), que provocará la inversión en el sentido de E_2 (flechas de trazos). En tales condiciones de funcionamiento (fig. 10.18B), circulará una corriente de valor elevado por el circuito y producirá serias averías.

Para evitar el inconveniente anterior, se instalará el *hilo de equilibrio* (L), que unirá las salidas de inducido de la misma polaridad de todos los generadores con sus inductores (fig. 10.18C). Si se produce la disminución de E_2 circulará la corriente de excitación $I_{ex.2}$ en el sentido indicado para el conductor de equilibrio, evitando la inversión del circuito inductor. El hilo de equilibrio debe ofrecer la mínima resistencia, por lo que se dimensionará con *amplia sección.*

También es muy utilizada la *conexión cruzada* (fig. 10.19); en este caso, la corriente que sale del inducido de G_2 pasa por el circuito de excitación de G_1 y viceversa. Si hay variación en la f. e. m. de uno de los generadores (E_1), también la habrá en la excitación del otro (G_2) y, por tanto, su f. e. m. (E_2) variará en la misma proporción y se mantendrá el equilibrio.

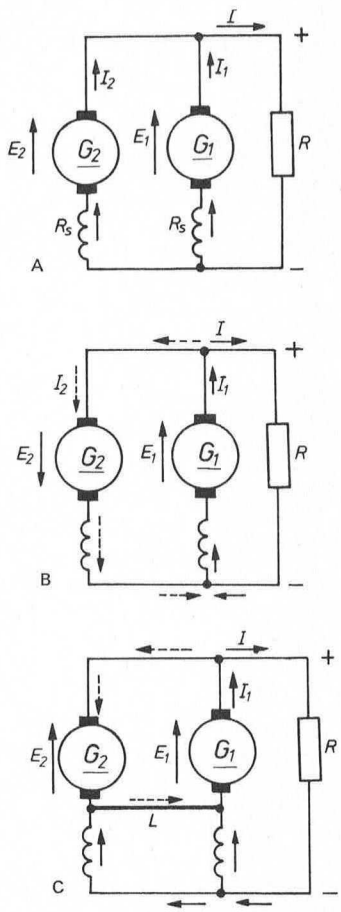


Fig. 10.18 Acoplamiento en paralelo de generadores serie: A, *esquema de dos generadores;* B, *inversión de la f. e. m. en G_2;* C, *acoplamiento con hilo de equilibrio* L.

10.6 Acoplamiento de generadores de excitación compuesta

Los generadores compound también se pueden acoplar en serie y en derivación.

En la figura 10.20 aparece el esquema correspondiente a la *conexión serie,* obtenida combinando las conexiones de los generadores serie y derivación.

10.6.1 *Acoplamiento en paralelo de generadores compound*

Para variaciones de intensidad de carga muy grandes, es aconsejable el acoplamiento en paralelo de los generadores de excitación compuesta.

Para evitar la inestabilidad en los devanados serie, ya descrita en el acoplamiento en paralelo de generadores serie (10.5.2), es necesario instalar el *hilo de equilibrio* (fig. 10.21), quedando así todos los devanados serie conectados en paralelo.

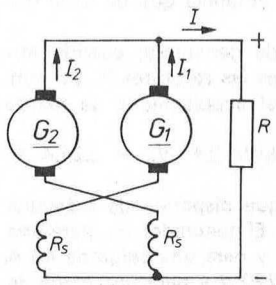


Fig. 10.19 Conexión cruzada de dos generadores serie.

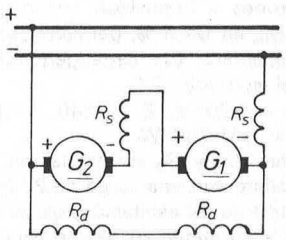


Fig. 10.20 Acoplamiento en serie de dos generadores compound.

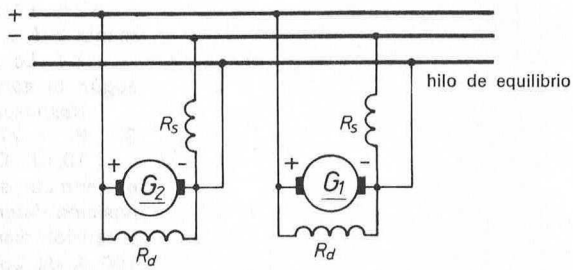


Fig. 10.21 Acoplamiento en paralelo de dos generadores compound.

Si se produce un aumento en la f. e. m. que da el primer generador y aumenta la corriente que suministra, parte de ella se derivará por el devanado serie del segundo generador, con el consiguiente aumento de su f. e. m. y de la corriente, alcanzándose por tanto el equilibrio.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Estudio de los tipos de acoplamientos del motor serie, al funcionar como generador serie en el frenado por recuperación utilizado en tracción eléctrica.

— Analizar gráficamente la estabilidad de marcha de dos generadores con características exteriores: *a)* ascendentes; *b)* descendentes.

— Describir las maniobras necesarias en el acoplamiento en paralelo, tanto en la conexión como en la desconexión de dos generadores compound.

CUESTIONARIO

10.1 ¿Por qué es necesario el acoplamiento de generadores?

10.2 Enumerar los diferentes sistemas de acoplamiento que pueden realizarse entre generadores. ¿Se utilizan todos los sistemas?

10.3 ¿Qué inconvenientes presenta la existencia de corrientes de circulación en el acoplamiento en paralelo de generadores?

10.4 ¿Qué condiciones de estabilidad, en el aspecto eléctrico, ha de reunir un acoplamiento de generadores?

10.5 ¿Es estable el acoplamiento en paralelo de dos generadores derivación?

10.6 ¿Es posible el acoplamiento en paralelo entre un generador anticompound y un generador derivación? Razonar la respuesta.

10.7 Se dispone de dos generadores derivación de la misma potencia y ambos suministran en vacío la misma tensión. Se trata de averiguar si puede conseguirse un reparto equitativo de la carga en los casos siguientes:

1.° Las características exteriores son de la misma inclinación.

2.° Cuando hay gran diferencia en la inclinación de las características exteriores.

10.8 ¿Es estable el acoplamiento en paralelo de generadores serie?

10.9 Dos generadores G_1 y G_2 están conectados en paralelo y alimentan un receptor de resistencia 10 Ω. Los datos de los generadores son: $E_1 = 105$ V, $R_{i1} = 0{,}2\ \Omega$, $2\ U_e = 2$ V, $E_2 = 100$ V, $R_{i2} = 0{,}2\ \Omega$, $2\ U_e = 2$ V.

Determinar:

1.° La corriente que circula por cada generador.

2.° La tensión en bornes del receptor.

Respuestas. 1.ª: $I_1 = 17{,}37$ A, $I_2 = -7{,}42$ A; 2.ª: $V_b = 99{,}48$ V.

10.10 Una vez resuelto el ejercicio anterior, se trata de averiguar el valor mínimo de la f. e. m. de G_2, para que éste suministre corriente al circuito exterior. Tómese $2\ U_e = 2$ V en los dos generadores.

Respuesta: $E_2 = 102{,}98$ V.

10.11 Se dispone de 4 generadores iguales de excitación independiente (G_1, G_2, G_3, G_4) acoplados en paralelo para alimentar una carga que consume 440 kW a 440 V. La resistencia interna de cada generador es de 0,032 Ω.

Determinar:

1.° La f. e. m. que da cada generador, si en ambos generadores $2\ U_e = 2$ V.

2.° El reparto de intensidades cuando el generador G_1 disminuye su f. e. m. en el 10 %, por haber disminuido la velocidad del motor de arrastre. La resistencia de la carga permanece constante.

3.° La nueva tensión en bornes de la carga, según el apartado 2.°.

Respuestas: 1.ª: $E = 450$ V; 2.ª: $I_1 = -810{,}96$ A, $I_2 = I_3 = I_4 = 595{,}28$ A; 3.ª: $V_b = 428{,}95$ V.

10.12 Cinco generadores iguales (G_1, G_2, G_3, G_4, G_5) están acoplados en derivación para alimentar una carga de $R_c = 0{,}1\ \Omega$, que absorbe 2 200 A; la resistencia interior de cada generador es 1/22 Ω, y la caída de tensión en escobillas despreciable.

Determinar:

1.° La tensión en bornes de la carga, así como la f. e. m. y potencia que da cada generador.

2.° La tensión en bornes e intensidad suministrada por cada generador, cuando aumenta la f. e. m. en G_4 y G_5, en un 5 %, permaneciendo constantes las restantes ff. ee. mm.

3.° La potencia suministrada por cada generador, cuando el acoplamiento se realiza según lo establecido en el apartado 2.°.

Respuestas: 1.ª: $V_b = 220$ V, $E = 240$ V, $P_1 = 96{,}8$ kW; 2.ª: $V_b = 224{,}4$ V; 3.ª: $P_1 = 77\,014$ W, $P_u = 136\,256$ W.

10.13 Dos generadores, G_1 y G_2 de excitación derivación, que disponen de reóstatos en serie con su excitación, alimentan una carga de 25,2 kW a 180 V. El generador G_1, para una posición determinada del reóstato de excitación, da en vacío 200 V, y para una carga de 40 A la tensión disminuye a 180 V. El generador G_2 en vacío suministra 220 V y para una carga de 100 A da 180 V. Suponiendo rectilíneas las características exteriores, determinar:

1.° Las ff. ee. mm. de cada generador para conseguir un reparto de cargas equitativo, manteniendo la tensión en bornes.

2.º La máxima corriente que puede suministrar G_1, para V_b = 180 V, si en la posición de reóstato eliminando la f. e. m. que genera en vacío es de 224 V.

Respuestas: 1.ª: E_1 = 214 V, E_2 = 208 V; 2.ª: I_1 = 90 A, I_2 = 50 A.

10.14 Un generador G_1 de excitación derivación da 180 V en vacío, mientras que, al aumentar una carga de 5 600 W, la tensión disminuye a 160 V. Un segundo generador G_2, acoplado en paralelo al anterior, suministra una corriente de 105 A a 160 V y tiene un coeficiente de regulación ε_2 = 12,5 %. Suponiendo que las características de ambos generadores son rectilíneas, determinar:

1.º La f. e. m. de G_2, cuando suministra una corriente de 105 A.

2.º La tensión en bornes de la carga (V_{b2}) cuando ésta aumenta un 28,5 %.

3.º El reparto de corrientes correspondiente al apartado 2.º.

Respuestas: 1.ª: E_2 = 180 V; 2.ª: V_b = 152 V; 3.ª: I_1 = 44 A, I_2 = 136 A.

10.15 En el ejercicio anterior, el generador G_1 puede suministrar una tensión máxima en vacío de 200 V. Se trata de averiguar:

1.º Las ff. ee. mm. que deberían dar G_1 y G_2, para conseguir un reparto equitativo de cargas, cuando el acoplamiento funcione según el apartado 2.º del ejercicio anterior.

2.º La corriente máxima que puede suministrar G_1, para la tensión en bornes (V_{b2}).

3.º La tensión en bornes a que daría lugar G_1 si se realizara un reparto equitativo de corrientes.

Respuestas: 1.ª: E_1 = 210 V, E_2 = 172 V; 2.ª: I_1 = 76 A; 3.ª: V_{b1} = 143 V.

BIBLIOGRAFIA

NIARD J., *Curso de Electricidad I,* Toray-Masson, S. A., Barcelona 1971.

MORILLO J., *Curso de Electricidad I,* Ed. Dossat, S. A., Madrid 1964.

CORTES M., *Máquinas eléctricas de c. c.,* Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona 1965.

FOUILLE A., *Problemas resueltos de Electrotecnia,* Montesó, Barcelona 1967.

Tema 11

Funcionamiento de la máquina de corriente continua como motor

OBJETIVOS

— *Aplicar el principio de fuerza electromagnética al motor de c. c.*

— *Enumerar las variables fundamentales que intervienen en el funcionamiento del motor de c. c.*

— *Describir las fases sucesivas de la puesta en marcha de un motor de c. c.*

— *Justificar la importancia de las características electromecánicas de un motor.*

— *Valorar la importancia del par de aceleración de masas en el tiempo de arranque de un motor.*

— *Comprobar la estabilidad de un motor con la ayuda de las características de par motor y de par resistente, en función de la velocidad.*

GUION

— Generalidades.
— Fundamento del motor de c. c.
— Variables fundamentales de un motor de c. c.
— Corriente absorbida en el arranque del motor de c. c.
— Características fundamentales del motor de c. c.
— Estudio de tiempo de arranque de un motor de c. c.
— Estabilidad de funcionamiento de un motor.

PUNTOS CLAVE

— Relacionar las variables: par, velocidad y corriente absorbida por un motor.
— Resumir el proceso del arranque de un motor.
— Deducir la expresión general del tiempo de arranque de un motor de c. c.

EXPOSICION DEL TEMA

11.1 Generalidades

En alguna ocasión, a lo largo del texto, se ha hablado de la *reversibilidad* de la máquina de corriente continua, indicando que admite su funcionamiento como generador o como motor.

En el *aspecto constructivo, no hay diferencia entre generador y motor.* La única diferencia radica en el *sentido de transformación de la energía:*

— *Generador:* transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

— *Motor:* transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

Actualmente, es mucho más utilizada la máquina de c. c. en su funcionamiento como *motor,* ya que la producción de energía eléctrica se hace, en casi su totalidad, bajo la forma de corriente alterna.

11.2 Fundamento del motor de c. c.

El motor de c. c. está basado en el efecto dinámico de la corriente al estar bajo un campo magnético (leyes de Laplace, Biot y Savart).

La figura 11.1 muestra un conductor por el que circula una corriente I y está bajo la acción del campo magnético de inducción $\vec{B}$.

El paso de la corriente I por el conductor produce un campo magnético circular (fig. 11.2A), que se superpone al campo creado por los imanes (figura 11.2B) y da lugar a un campo resultante (fig. 11.2C).

El campo magnético resultante se ha distorsionado, por lo que aparece una *fuerza F* que actúa sobre cada línea de campo, tendiendo a acortar su trayectoria, como si fuese un hilo elástico.

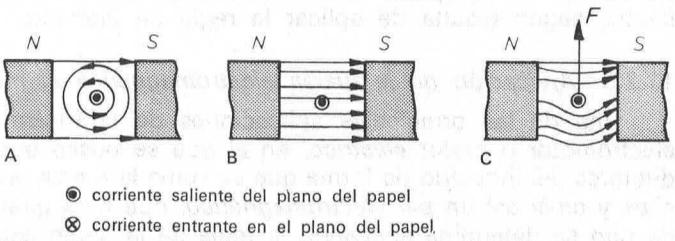


Fig. 11.2 Fuerza electromagnética F *en un conductor:* A, *campo magnético creado por el conductor;* B, *campo magnético creado por los imanes;* C, *campo magnético resultante.,*

11.2.1 *Valor de la fuerza electromagnética en un conductor*

En diversas experiencias, *Laplace* comprobó que la fuerza electromagnética desarrollada sobre un conductor era proporcional:

— a la inducción magnética (B),
— a la intensidad de la corriente que circula por el conductor (I),
— a la longitud del conductor (l),
— al seno del ángulo formado por la inducción y el conductor (sen α).

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

en donde:

B = inducción magnética media (T)
I = intensidad (A)
l = longitud del conductor (m)
F = fuerza ejercida sobre el conductor (N)

En la máquina de c. c. (fig. 11.3), las direcciones de la inducción B y del conductor son perpendiculares ($\alpha = 90°$), por lo que:

$$\operatorname{sen} \alpha = 1$$

$$F = B \cdot I \cdot l$$

Ejercicio de aplicación

Un conductor de 30 cm de longitud, por el que circula una corriente de 20 A, se encuentra bajo la acción de un campo magnético de 400 Gs. Calcular la fuerza electromagnética que se creará sobre el conductor, cuando el ángulo que forman la inducción y el conductor (figura 11.4) es de:

1.° 30°.
2.° 90°.
3.° 180°.

Solución:

1.° La fuerza F (fig. 11.4A) será:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \operatorname{sen} \alpha = (400 \times 10^{-4}) \times 20 \times (30 \times 10^{-2}) \times \frac{1}{2} = 0{,}12 \text{ N}$$

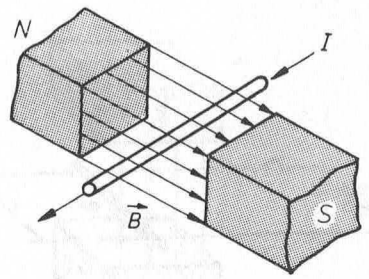


Fig. 11.1 Conductor atravesado por una corriente bajo un campo magnético.

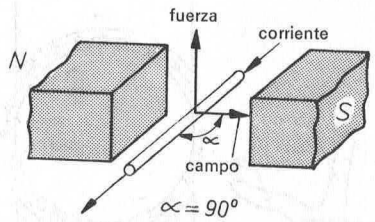


Fig. 11.3 Direcciones de campo, conductor y fuerza.

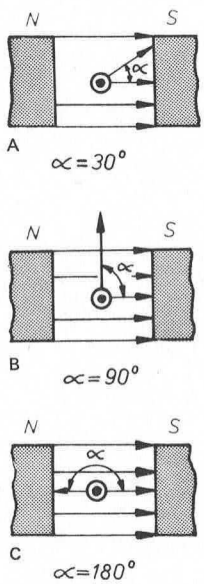


Fig. 11.4 Ejercicio de aplicación: A, *ángulo de 30° entre* B *y* 1; B, *ángulo de 90° entre* B *y* 1; C, *ángulo de 180° entre* B *y* 1.

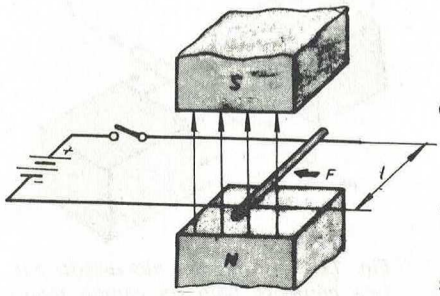


Fig. 11.5 Fundamento del motor.

2.º La fuerza *F* (fig. 11.4B) será:

$$F = (400 \times 10^{-4}) \times 20 \times (30 \times 10^{-2}) = 0{,}24 \text{ N}$$

3.º La fuerza *F* (fig. 11.4C) es nula, por coincidir la dirección de la inducción magnética con la del conductor, aunque de sentido opuesto.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \text{sen } 180^\circ = 0$$

11.2.2 *Sentido de la fuerza electromagnética producida en un conductor*

El sentido de la fuerza electromagnética desarrollada sobre un conductor se determina aplicando la *regla de Fleming de la mano izquierda* (Tema 1).

Al cerrar el interruptor (fig. 11.5), se observará un movimiento del conductor, que se desplaza sobre dos carriles conductores, en la dirección de la flecha, según resulta de aplicar la regla de Fleming.

11.2.3 *Aplicación de la fuerza electromagnética al motor de c. c.*

Una de las principales aplicaciones de la fuerza electromagnética es el electromotor o *motor eléctrico,* en el que se busca la disposición de los conductores del inducido de forma que se sume la fuerza electromagnética en todos ellos y crear así un *par electromagnético,* que hará girar el inducido. El sentido de giro se determina aplicando la regla de la mano izquierda a cualquier conductor que esté bajo campo magnético (fig. 11.6).

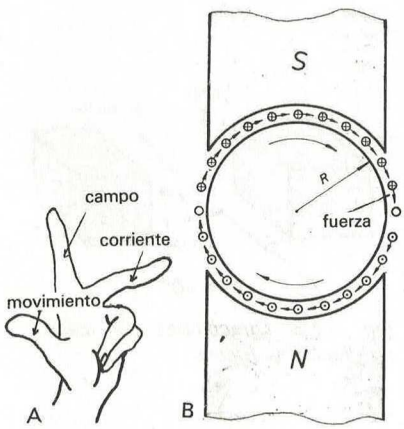


Fig. 11.6 Aplicación de la regla de la mano izquierda: A, *regla de la mano izquierda;* B, *aplicación al motor.*

En el Tema 3 se razonaba sobre las ventajas que presentaba el *devanado en tambor* sobre los restantes, por lo que solamente se utilizaba este tipo de devanado (apartado 3.1.2). También se detallaba la importancia de que los dos lados activos de cada espira debían estar distanciados un valor lo más próximo posible al *paso polar* (apartado 3.2). En el funcionamiento como motor sigue cumpliéndose esa norma, con el fin de conseguir que la *fuerza electromagnética* creada en un conductor de la espira se *sume* a la creada por el otro conductor de la misma espira.

El comportamiento del inducido de la máquina de c. c. al funcionar como *motor* quedó tratado en el Tema 4, por lo que aquí se supondrán conocidas las magnitudes que intervienen en su funcionamiento, como son: fuerza contraelectromotriz (E'), par interno (M_i) y velocidad (N).

11.3 Variables fundamentales de un motor de c. c.

En el funcionamiento de la máquina de c. c. como motor, se produce un *par interno,* que dará lugar al giro del inducido, por lo que tendrá carácter *positivo,* y a la vez aparece una *f. e. m. de reacción,* llamada fuerza contraelectromotriz (E').

Así, pues, las magnitudes que intervienen en el funcionamiento del motor de c. c. son: *fuerza contraelectromotriz, par motor* y *velocidad.*

11.3.1 *Fuerza contraelectromotriz*

Se recuerda que el valor de E' es:

$$E' = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}$$

en donde:

- Φ = flujo útil por polo (Wb)
- n = n.º total de conductores activos del inducido
- N = velocidad de giro del inducido (r. p. m.)
- p = pares de polos de la máquina
- c = pares de circuitos derivados del devanado inducido
- E' = f. c. e. m. (V)

A su vez:

$$E' = V_b - (R_i \cdot I_i) - 2\,U_e$$

$E' = K_1 \Phi N$

en donde:

V_b = tensión aplicada al inducido (V)
$R_i \cdot I_i$ = caída de tensión en el devanado inducido (V)
$2\ U_e$ = caída de tensión total en escobillas (V)

11.3.2 *Par motor*

El par motor interno M_i es:

$$M_i = n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\ \pi} \cdot \Phi \cdot I_i$$

en donde:

$K = n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\ \pi}$ (los valores de n, p y c, son los citados para E')
I_i = corriente del inducido (A)
M_i = par interno (m · N)

El par *motor* es proporcional al flujo inductor útil y a la corriente del inducido.

11.3.3 *Velocidad de rotación*

La velocidad *N*, se deduce de las expresiones de *E'*:

$$N = \frac{V_b - (R_i \cdot I_i - 2\ U_e)}{\Phi \cdot n \cdot \frac{p}{c} \times \frac{1}{60}}$$

11.3.4 *Corriente absorbida por un motor de c. c.*

El valor de la corriente absorbida por un motor se determina a partir de la expresión de la f. c. e. m. Así, para un motor cualquiera:

$$I_i = \frac{V_b - E' - 2\ U_e}{R_i}$$

Ejercicio de aplicación

Un motor bipolar de c. c., que se conecta a una red de 320 V, dispone de 1 500 conductores en el inducido de conexión ondulada, sobre los que actúa un flujo de 0,01 Wb, y gira a una velocidad de 1 200 r. p. m. Averiguar la corriente absorbida por el motor, si $R_i = 0{,}18\ \Omega$ y $2\ U_e = 2$ V.

Solución:

Para averiguar la corriente I_i, es necesario conocer antes la f. c. e. m.:

$$E' = \Phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = 0{,}01 \times 1\,500 \times 1\,200 \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{60} = 300\ V$$

Sustituyendo el valor de *E'* en la expresión de la intensidad:

$$I_i = \frac{320 - 300 - 2}{0{,}18} = 100\ A$$

11.4 Corriente absorbida en el arranque del motor de c. c.

El arranque comprende todas las operaciones necesarias desde la conexión del motor a la red hasta alcanzar su velocidad nominal.

Las principales características que intervienen en el arranque son: *corriente de arranque, par de arranque* y *tiempo de arranque.*

11.4.1 *Corriente absorbida en el arranque directo a la red*

En el momento del arranque, la f. c. e. m. es nula, por serlo la velocidad; la corriente que absorbe el motor de la red será:

$$I_i = \frac{V_b - 2\,U_e}{R_i}$$

en donde: $2\,U_e \approx 2$ V.

Teniendo en cuenta que la resistencia interior del devanado (R_i) es muy pequeña (inferior a 1 Ω), resultaría que en el arranque, la intensidad absorbida por un motor de c. c. sería muy elevada, comparada con la corriente nominal, produciendo aumentos de temperatura muy peligrosos para la máquina.

Ejercicio de aplicación

Se trata de averiguar la corriente absorbida por el motor del ejercicio anterior, al arrancar directamente de la red.

Solución:

La corriente que absorbería en los primeros instantes sería:

$$I_i = \frac{V_b - 2\,U_e}{R_i} = \frac{320 - 2}{0{,}18} = 1\,766 \text{ A}$$

que supone 17,6 veces la nominal, por lo que se quemaría el devanado del inducido.

11.4.1.1 *Arranque del motor a tensión reducida*

Un sistema utilizado para evitar el arranque directo es intercalar, en serie con el inducido, una *resistencia de arranque* (R_A), o bien, aplicar una *tensión muy pequeña* al principio, hasta que el motor adquiera velocidad y, por tanto, aumente el valor de la f. c. e. m. (fig. 11.7); entonces disminuirá el valor de la corriente I_i, con lo que se podrá aumentar la tensión en bornes del inducido, hasta su valor nominal.

La corriente que circulará por el inducido será entonces:

$$I_{máx.} = \frac{V_b - 2\,U_e}{R_i + R_A}$$

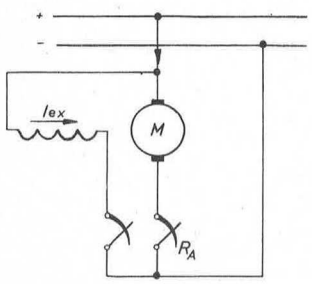


Fig. 11.7 Arranque del motor de c. c. con reóstato en serie con el inducido.

en donde:

R_A = resistencia en serie con el inducido

Ejercicio de aplicación

Según el Reglamento de B. T. (Instrucción 34), la corriente permisible en el arranque de un motor de c. c. de potencia nominal superior a 5 kW es de 1,5 veces la nominal. Averiguar en el motor del ejercicio anterior:

1.º La potencia absorbida de la red por el motor, sin tener en cuenta el circuito de excitación.

2.º La resistencia R_A que habrá de conectarse en serie con el inducido (fig. 11.7) para cumplir la condición exigida por el Reglamento.

3.º La corriente que circula por el inducido si, al permanecer R_A en el circuito, la velocidad del motor se reduce al 50 % de la nominal.

4.º Las pérdidas Joule en la resistencia R_A, para $\frac{1}{2}$ de la velocidad nominal.

Solución:

1.º La potencia que absorbe el motor será:

$$P = V_b \cdot I = 320 \times 100 = 32 \text{ kW}$$

por lo que se aplicará la instrucción del Reglamento de B. T. para motores de potencia superior a 5 kW.

2.º La corriente permitida será:

$$I_{máx.} = 1{,}5 \times I_{p.\,c.} = 1{,}5 \times 100 = 150 \text{ A}$$

El valor de R_A se deduce de la expresión:

$$I_{máx.} = \frac{V_b - 2\ U_e}{R_i + R_A}$$

$$R_A = \frac{V_b - 2\ U_e}{I_{máx.}} - R_i = \frac{320 - 2}{150} - 0{,}18 = 1{,}94\ \Omega$$

3.º Al girar el motor a 600 r. p. m., la f. c. e. m. se reduce a la mitad de la producida para 1 200 r. p. m., y la corriente del inducido será:

$$I_i = \frac{V_b - E' - 2\ U_e}{R_i + R_A} = \frac{320 - 150 - 2}{0{,}18 + 1{,}94} = 79{,}24\ A$$

Al haber disminuido la corriente absorbida de la red, el motor no podrá desarrollar su potencia nominal, por lo que será necesario eliminar la resistencia R_A.

4.º Las pérdidas Joule, al permanecer la resistencia R_A en el circuito, serán:

$$P_J = R_A \cdot I_i^2 = 1{,}94 \times 79{,}24^2 = 12{,}18\ kW$$

Las elevadas pérdidas producidas en R_A, junto a la disminución de intensidad, justifican a necesidad de *anular la resistencia* R_A, una vez que el motor *vaya adquiriendo velocidad.*

11.5 Características fundamentales del motor de c. c.

Las magnitudes fundamentales que intervienen en el funcionamiento de un motor son: 1) la velocidad de rotación (N); 2) el par motor (M); 3) la corriente del inducido (I_i); 4) la corriente de excitación ($I_{ex.}$); 5) la tensión en bornes (V_b). Sin embargo, será suficiente relacionar entre sí las tres primeras para analizar el comportamiento del motor.

La tensión en bornes V_b se supondrá constante en todos los casos.

11.5.1 *Curvas características electromecánicas*

Las relaciones entre las variables más importantes dan lugar a una función de tres variables:

$$f\ (N,\ M,\ I_i) = 0$$

Al igual que sucedía en los generadores (ver apartado 8.3.1), la combinación de variables da lugar a las siguientes características (fig. 11.8):

1.ª *Característica de velocidad.* Es la curva que representa la velocidad del motor en función de la corriente del inducido:

$$N = f\ (I_i)$$

2.ª *Característica de par motor.* Es la curva que representa el par motor en función de la corriente del inducido:

$$M = f\ (I_i)$$

3.ª *Característica mecánica.* Es la curva que representa el par motor en función de la velocidad:

$$M = f\ (N)$$

La determinación de la *característica mecánica* puede hacerse a través de las otras dos, ya que en éstas es común la corriente del inducido. Así, al suponer que las características de velocidad y de par motor están representadas en las figuras 11.8A y 11.8B la característica mecánica sería la indicada en la figura 11.8C.

La interpretación de las diferentes características electromecánicas se hará en el tema siguiente, al estudiar los tipos de motores por su excitación.

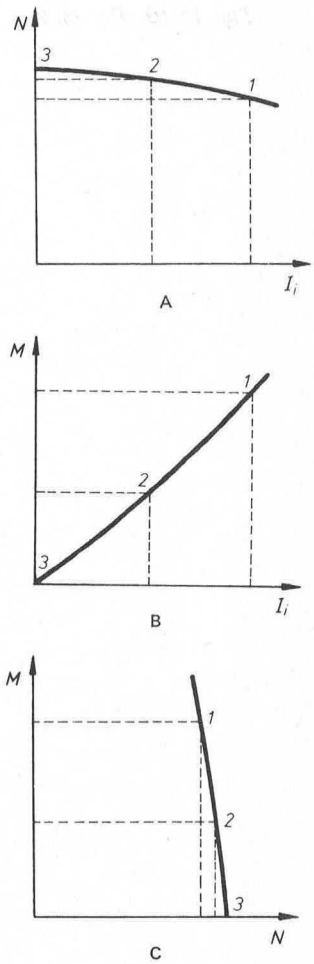


Fig. 11.8 Características electromecánicas del motor de c. c.: A, *característica de velocidad;* B, *característica de par motor;* C, *característica mecánica.*

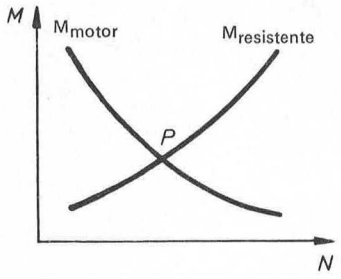


Fig. 11.9 Punto de funcionamiento.

11.5.2 *Importancia de la característica mecánica*

La característica mecánica de un motor es la más importante a la hora de elegir un motor para una determinada aplicación, ya que indica el par útil que suministra en el eje para una determinada velocidad de giro. La elección del motor necesita de la curva del *par resistente* en función de la velocidad (fig. 11.9); así, el punto de funcionamiento corresponderá a la intersección de ambas características (*P*).

11.6 Estudio del tiempo de arranque de un motor de c. c.

Un dato muy importante a tener en cuenta en un motor es su *tiempo de arranque.*

Para facilitar la comprensión de este estudio, se ha creído conveniente repasar algunos conceptos de Física, por utilizarse en los motores eléctricos.

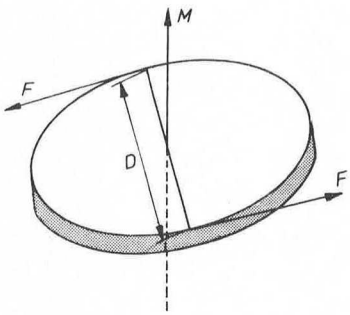


Fig. 11.10 Par motor.

11.6.1 *Par motor*

Dos fuerzas iguales y paralelas, de sentidos opuestos (F_1 y F_2) y situadas a cierta distancia (*D*), producirán un movimiento de rotación o par de giro (*M*) (fig. 11.10), de valor:

$$M = D \cdot F$$

en donde:

D = distancia (m)
F = fuerza (kgf)
M = par (kgf · m)

En los motores, el rotor ejerce sobre el eje un momento de rotación, llamado par motor (ver apartado 4.8.2), de valor:

$$M = 716 \cdot \frac{P}{N}$$

en donde:

P = potencia (CV)
N = velocidad (r. p. m.)
M = par motor (kgf · m)

11.6.2 *Momento de inercia dinámico. Par de inercia*

Supóngase un cuerpo en rotación alrededor de un eje fijo con una velocidad angular ω (fig. 11.11).

Un pequeño elemento de masa m_1 cualquiera, situado a la distancia r_1, tendrá una velocidad lineal:

$$V_1 = \omega \cdot r_1$$

Otro elemento m_2, situado a la distancia r_2, tendrá una velocidad:

$$V_2 = \omega \cdot r_2$$

Un tercer elemento m_3, situado a la distancia r_3, tendrá una velocidad:

$$V_3 = \omega \cdot r_3$$

y así sucesivamente.

Se define *energía cinética* de un cuerpo con *movimiento rectilíneo* al producto de su masa por la velocidad al cuadrado, partido por dos:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

La *energía cinética* del cuerpo *en rotación* de la figura 11.11 será la suma de los productos de todas las masas elementales por un medio de su velocidad al cuadrado:

$$E = \frac{1}{2} (m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2 + m_3 \cdot v_3^2 + \ldots)$$

Al sustituir la relación entre velocidades lineal y angular, quedará:

$$E = \frac{1}{2} (m_1 \cdot \omega^2 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot \omega^2 \cdot r_2^2 + m_3 \cdot \omega^2 \cdot r_3^2 + \ldots)$$

$$= \frac{1}{2} \omega^2 \cdot (m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2 + m_3 \cdot r_3^2 + \ldots)$$

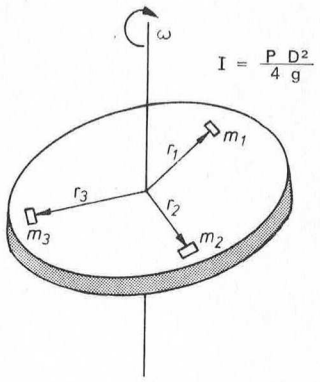


Fig. 11.11 Momento de inercia dinámico.

El factor $(m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2 + m_3 \cdot r_3^2 + \ldots)$ se llama *momento de inercia dinámico* y se representa con una (I) o bien con una (J).

Imaginándose toda la masa (M) concentrada en un punto, situado a una distancia D/2 del eje de giro, el momento de inercia dinámico será:

$$I = M \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{M \cdot D^2}{4} = \boxed{\frac{P \cdot D^2}{4\ g}}$$

en donde:

M = masa del cuerpo (kg)
P = peso del cuerpo (kgf)
D = diámetro de giro (m)
g = aceleración de la gravedad (9,8 m/s²)
P · D² = factor de inercia (kgf · m²)

La energía cinética de rotación sería:

$$\boxed{E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2}$$

11.6.2.1 *Par de inercia en el rotor*

El momento de inercia de un cuerpo sometido a rotación, en este caso el inducido o rotor, da lugar a un par de inercia (M_α):

$$\boxed{M_\alpha = I \cdot \alpha}$$

en donde:

I = momento de inercia de las masas giratorias referido al eje del motor
α = aceleración angular (rad/s²)

A su vez, la aceleración angular (α) es el cociente entre la velocidad angular (ω) y el tiempo (t).

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60 \cdot t}$$

de donde:

$$M_\alpha = I \cdot \alpha = \frac{P \cdot D^2}{4\ g} \times \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60 \times t} = \boxed{\frac{P \cdot D^2 \cdot N}{375 \times t} = M_\alpha}$$

en donde:

N = velocidad de giro (r. p. m.)
t = tiempo (s)

El par de inercia *solamente existe* cuando hay variación de velocidad, o sea, el paso *del estado de reposo a la velocidad de régimen* (arranque).

11.6.3 *Tiempo de arranque del motor*

Al conectar el motor a la red, para que éste pueda girar, habrá de vencer los siguientes pares:

M_u = par útil, que ofrecerá la carga (se supone constante);
M_p = par que presentan las resistencias pasivas (constante);
M_α = par de aceleración de las masas giratorias.

Llamando (M) al par motor, deberá cumplirse que:

$$M = M_u + M_p + M_\alpha$$

La suma de los valores de (M_p) y (M_u) es, en definitiva, el par resistente (M_R):

$$M_R = M_p + M_u$$

Al sustituir las expresiones de los pares parciales en el par motor, será:

$$M = M_R + M_\alpha = M_R + \frac{P \cdot D^2 \cdot N}{375 \times t}$$

Despejando el tiempo de arranque:

$$t = \frac{P \cdot D^2 \cdot N}{(M - M_R) \times 375}$$

en donde:

P	=	peso de las masas giratorias (kgf)
D	=	diámetro de giro (m)
N	=	velocidad de régimen (r. p. m.)
$M - M_R = M_\alpha$	=	par de aceleración (kgf · m)
t	=	tiempo de arranque del motor (s)

En el momento que el motor alcance la velocidad de régimen, *no existirá aceleración;* por tanto, $M_\alpha = 0$, quedando:

$$M = M_R$$

Ejercicio de aplicación

Averiguar el tiempo de arranque de un motor para alcanzar su velocidad nominal de 600 r. p. m., si el $P \cdot D^2$ total es de 7 kgf · m², y el par de aceleración es de 10 kgf · m.

Solución:

El tiempo utilizado para pasar de reposo a la velocidad nominal será:

$$t = \frac{P \cdot D^2 \cdot N}{(M - M_R) \times 375} = \frac{7 \times 600}{10 \times 375} = 1{,}12 \text{ s}$$

11.6.3.1 *Determinación del par de aceleración medio*

Para calcular el tiempo de arranque de un motor es necesario conocer las características del par motor y del par resistente en función de la velocidad, y poder así obtener el valor medio de estos pares durante el arranque.

Normalmente, los fabricantes dan la relación entre el par medio en el arranque (M_A) y el par nominal (M_N), ya que de esta relación *dependerá la aceleración del motor:*

$$\frac{M_A}{M_N} = \frac{\text{Par motor en el arranque}}{\text{Par nominal}}$$

El tiempo de arranque será ahora:

$$t = \frac{P \cdot D^2 \cdot N}{(M_A - M_R) \times 375}$$

en donde:

M_A = par medio en el arranque

La relación $\frac{M_A}{M_N}$ dependerá del tipo de aplicación, ya que pueden presentarse tres casos muy diferentes de arranque: *en vacío, a media carga* y *a plena carga.*

Por ejemplo, en un motor serie especial para grúas y laminación, el par nominal a 300 r. p. m. es $M_N = 1\,130$ kgf · m y el par medio de arranque es $M_A = 3\,390$ kgf · m, por lo cual, la relación anterior será:

$$\frac{M_A}{M_N} = \frac{3\,390}{1\,130} = 3$$

Ejercicio de aplicación

Un motor serie de 125 CV, de $P \cdot D^2 = 34$ kgf · m² y relación $\frac{M_A}{M_N} = 3$, acciona una carga de las siguientes características: velocidad = 430 r. p. m.; $P \cdot D^2 = 400$ kgf · m².

Determinar:

1.º El par resistente que ofrece la carga.

2.º El tiempo de arranque.

Solución:

1.º El valor del par M_R se obtendrá de la expresión general del par motor (M), puesto que en servicio normal la carga ofrece un par M_R, que coincide con el par motor M:

$$\boxed{M_R = M}$$

a la velocidad de régimen.

A su vez:

$$M_R = 716 \times \frac{P\ (CV)}{N\ (r.\ p.\ m.)} = 716 \times \frac{125}{430} = 208\ kgf \cdot m$$

2.º Para hallar el tiempo de arranque, se ha de tener en cuenta el par acelerador (M_α). El par en el arranque M_A es 3 veces el nominal:

$$M_A = 3 \times M = 3 \times 208 = 624\ kgf \cdot m$$

El par acelerador $M\alpha$:

$$M_\alpha = M_A - M_R = 624 - 208 = 416\ kgf \cdot m$$

El factor de inercia total será:

$$P \cdot D^2_{total} = P \cdot D^2_{motor} + P \cdot D^2_{carga} = 34 + 400 = 434\ kgf \cdot m$$

El tiempo de arranque:

$$t = \frac{P \cdot D^2 \cdot N}{(M_A - M_R) \times 375} = \frac{434 \times 430}{416 \times 375} = 1{,}19\ s$$

11.6.4 *Variación del par y del factor de inercia con la velocidad*

Como normalmente no coincide la velocidad del motor con la velocidad de la máquina accionada, será necesario *referir los valores de la carga* a la *velocidad del motor.*

11.6.4.1 *Par resistente referido a la velocidad del motor de arrastre*

Prescindiendo del rendimiento del sistema utilizado para la variación de velocidad (engranaje, polea, etc.), la potencia que se debe transmitir será la misma en el motor y en la carga, cumpliéndose:

a)

$$P\ (CV) = \frac{1}{716} \times N_N \cdot M_N$$

b)

$$P\ (CV) = \frac{1}{716} \times N_R \cdot M_R$$

Dividiendo las dos expresiones quedará:

$$N_R \cdot M_R = N_N \cdot M_N$$

$$\boxed{M_N = M_R \cdot \frac{N_R}{N_N}}$$

en donde:

M_R = par resistente en el eje de la máquina accionada
N_R = velocidad de la máquina accionada
N_N = velocidad del motor de arrastre
M_N = par resistente en el eje del motor

11.6.4.2 *Factor de inercia de las masas giratorias referido a la velocidad del motor de arrastre*

La energía cinética desarrollada por el motor coincide con la energía absorbida por la carga, con la correspondiente reducción de velocidad, como sucedía en la pregunta anterior con respecto a los pares:

$$E = \frac{1}{2} \times \omega^2 \cdot I = \frac{1}{2} \times \omega^2 \cdot \frac{P \cdot D^2}{4\ g} = K \cdot \omega^2 \cdot P \cdot D^2$$

Así, pues, las energías serán:

A) $E = K \cdot \omega_N^2 \cdot (P \cdot D^2)_N$

B) $E = K \cdot \omega_R^2 \cdot (P \cdot D^2)_R$

Dividiendo las dos expresiones, quedará:

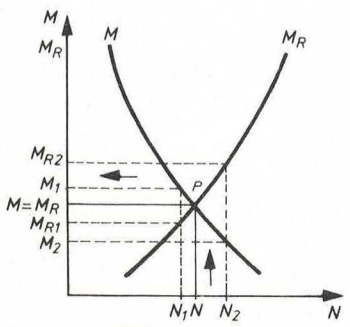
$$\omega_N^2 \cdot (P \cdot D^2)_N = \omega_R^2 \cdot (P \cdot D^2)_R$$

$$\boxed{(P \cdot D^2)_N = (P \cdot D^2)_R \cdot \left(\frac{\omega_R}{\omega_N}\right)^2}$$

en donde:

$(P \cdot D^2)_R$ = factor de inercia referido a la velocidad de la máquina accionada
ω_R = velocidad de la máquina accionada
ω_N = velocidad del motor de arrastre
$(P \cdot D^2)_N$ = factor de inercia referido a la velocidad del motor

Una vez reducidos los $P \cdot D^2$ de todas las masas giratorias a la velocidad del eje del motor, se pueden sumar para obtener el factor de inercia total y poder así hallar el tiempo de arranque.



M = par motor
M_R = par resistente
N = velocidad de régimen

Fig. 11.12 Funcionamiento estable de un motor.

11.7 Estabilidad de funcionamiento de un motor

Un motor funciona en régimen estable cuando cualquier variación que se produzca en sus características da lugar a una recuperación automática, llevando al motor al punto de funcionamiento nominal.

11.7.1 *Funcionamiento estable*

En la figura 11.12, se han representado las características mecánicas del motor (M) y de la carga (M_R), siendo el punto P el que corresponde al funcionamiento nominal a la velocidad de régimen (N).

Si por alguna causa disminuye la velocidad al valor N_1, los nuevos valores

del par serán M_1 y M_{R1}. Al ser el par motor M_1 mayor que el resistente M_{R1}, el motor tenderá a aumentar la velocidad acercándose de nuevo al punto *P*.

Si, en lugar de disminuir la velocidad, aumenta al valor N_2, los nuevos valores del par serían M_2 y M_{R2}. Al ser el par motor M_2 inferior al resistente M_{R2}, el motor tenderá a frenarse y, por tanto, a ocupar la posición de *P*.

En ambos casos, se ha comprobado que el motor tiende a recuperar automáticamente la posición de equilibrio señalada por el punto *P*.

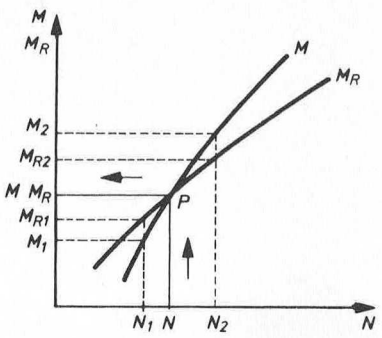
11.7.2 *Funcionamiento inestable*

Cuando las características de los pares motor y resistente en función de la velocidad son como las representadas en la figura 11.13, el punto de funcionamiento normal corresponde al punto *P*.

Si la velocidad disminuye al valor N_1, el par motor M_1 es inferior al resistente M_{R1}, por lo que de nuevo se frenará el motor y cada vez se apartará más del punto *P*.

Al aumentar la velocidad a un valor N_2, el par motor M_2 es superior al resistente M_{R2}, y la velocidad del motor seguirá aumentando, alejándose cada vez más del punto de funcionamiento *P*.

En ambos casos se comprueba que el funcionamiento del motor es inestable, por lo que habrá de buscarse otro tipo de motor para accionar la carga.



M = par motor
M_R = par resistente
N = velocidad de régimen

Fig. 11.13 Funcionamiento inestable de un motor.

11.7.3 *Curvas de pares resistentes*

Cada máquina accionada tiene su propia característica de par resistente, si bien se pueden agrupar en función de la forma que representan.

En la figura 11.14 se representan las características de par resistente en cuatro grupos:

1.º Máquinas con *par resistente independiente de la velocidad* (curva 1), o sea, aproximadamente constante. La potencia es aproximadamente proporcional a la velocidad. A este grupo pertenecen las máquinas que realizan trabajos de elevación, de fricción, de deformación; en especial, montacargas, bombas y compresores de émbolo a presión constante, molinos, máquinas de industria del papel, etc.

2.º Máquinas cuyo *par resistente crece aproximadamente y linealmente con la velocidad* (curva 2). La potencia es aproximadamente proporcional al cuadrado de la velocidad.

3.º Máquinas cuyo *par resistente crece aproximadamente con el cuadrado de la velocidad* (curva 3). La potencia es aproximadamente proporcional a la velocidad elevada al cubo. Dentro de este grupo están las bombas rotativas, ventiladores, sopladores, batidoras, etc.

4.º Máquinas cuyo *par resistente decrece aproximadamente según una hipérbola* (curva 4). La potencia es aproximadamente constante. Tienen otras características las máquinas que arrollan bandas de chapa fina, tejidos o papel con tiro constante y velocidad constante. El diámetro y el par van creciendo al arrollarse el material, mientras que la velocidad va disminuyendo.

Finalmente, se indica que hay máquinas cuyas características de pares resistentes son diferentes a las anteriores y que pueden considerarse como composición de algunas de ellas.

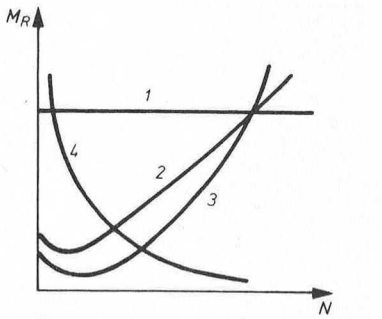


Fig. 11.14 Curvas de pares resistentes.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Principio de reversibilidad de la máquina de c. c.
— Importancia de las dimensiones del rotor, en el tiempo de arranque de un motor.
— Deducir las características mecánicas de los motores que han de accionar a las cargas representadas en la figura 11.14, para conseguir un funcionamiento estable.

CUESTIONARIO

11.1 ¿Qué ventajas presenta el alternador sobre la dínamo, puesto que han dado lugar a su desplazamiento?

11.2 ¿Puede pasar una máquina de c. c. de funcionar como motor a generador sin modificarse las conexiones? Aplicación a tracción eléctrica.

11.3 Explicar la diferencia entre f. e. m. y f. c. e. m. de una máquina de c. c.

11.4 ¿Cómo se clasifican los tipos de motores de c. c.? Representar sus esquemas según normas.

11.5 ¿Es lo mismo par electromagnético que trabajo? Razonar la respuesta.

11.6 ¿Se produce par útil, en cualquier instante, en cada conductor del rotor? Razonar la respuesta. Se parte de la existencia de campo magnético y corriente por el inducido.

11.7 Definir: *a)* arranque de un motor; *b)* par inicial de arranque de un motor; *c)* par máximo de arranque; *d)* par medio en el arranque; *e)* par nominal y *f)* par máximo de trabajo.

11.8 ¿Cuáles son las características electromecánicas de un motor de c. c.?

11.9 ¿Qué ventajas e inconvenientes presenta el arranque de un motor de c. c. por conexión directa a la red?

11.10 ¿Cómo habrá de elegirse un motor, en una determinada aplicación, para que el tiempo de arranque sea muy pequeño?

11.11 Un motor de excitación independiente suministra una potencia de 40 CV a la velocidad de 1 000 r. p. m., cuando aplica al inducido una tensión de 200 V.

Determinar:

1.º El par motor nominal.

2.º La corriente que absorberá en vacío en el momento del arranque si $R_i = 0{,}2\ \Omega$ y $2\ U_e = 2$ V.

Respuestas: 1.ª: $M = 28{,}64$ kgf · m; 2.ª: $I = 990$ A.

11.12 El motor del ejercicio anterior tiene un rendimiento industrial del 85 %.

Determinar:

1.º La corriente nominal, si el circuito de excitación absorbe el 3 % de dicha potencia.

2.º La relación entre la corriente de arranque y la nominal.

3.º La resistencia que habrá de conectarse en serie con el inducido para limitar la corriente de arranque a 1,5 veces la nominal.

Respuestas: 1.ª: $I_{p.\,c.} = 167{,}98$ A; 2.ª: $\frac{I_A}{I_{p.\,c.}} = 5{,}89$; 3.ª: $R_A = 0{,}585\ \Omega$.

11.13 Explicar el comportamiento del par de la inercia M_α, en el funcionamiento de un motor en las fases: arranque, marcha de régimen y parada.

11.14 Un motor de $P \cdot D^2 = 0{,}3$ kgf · m² que gira a 1 000 r. p. m. acciona a una máquina mediante una polea a una velocidad de 500 r. p. m., tiene un par resistente de $M_R = 20$ kgf · m y un factor de inercia $P \cdot D^2 = 26$ kgf · m².

Determinar:

1.º El par motor en condiciones normales de servicio.

2.º El $P \cdot D^2$ de las masas giratorias referido a la velocidad del motor.

3.º El factor de inercia total.

Respuestas: 1.ª: $M_N = 10$ kgf · m; 2.ª: $(P \cdot D^2)_N = 6{,}5$ kgf · m²; 3.ª: $(P \cdot D^2)_{total} = 6{,}8$ kgf · m².

11.15 Para accionar una carga, se utiliza un motor de 15 CV, $N = 955$ r. p. m., $P \cdot D^2 = 0{,}3$ kgf · m², con relación $\frac{M_A}{M_N} = 2{,}2$. Las características de la carga son: velocidad 500 r. p. m. (reducción, por tanto, de 1:2), $M_R = 19{,}1$ kgf · m y $P \cdot D^2 = 26$ kgf · m².

Determinar:

1.º El par de aceleración.

2.º El tiempo de arranque.

3.º El tiempo de arranque en el caso de tener la carga un factor de inercia $P \cdot D^2 = 100$ kgf · m² y permanecer constantes los restantes datos.

Respuestas: 1.ª: $M_\alpha = 14{,}75$ kgf · m; 2.ª: $t = 1{,}28$ s; 3.ª: $t = 4{,}78$ s.

BIBLIOGRAFIA

NIARD J., *Curso de Electricidad I,* Toray-Masson, Barcelona 1971.

CORTES M., *Máquinas eléctricas de c. c.,* Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1965.

Información técnica sobre fabricación de maquinaria eléctrica facilitada por la casa *Alconza, S. A.,* Berango (Vizcaya).

KOSOW I. L., *Máquinas eléctricas y transformadores,* Reverté, Barcelona 1975.

Tema 12

El motor de corriente continua en servicio

OBJETIVOS

— *Clasificar los tipos de motores atendiendo a su excitación.*
— *Justificar la identidad en cuanto al funcionamiento de los motores de excitación independiente y derivación.*
— *Interpretar las características electromecánicas de un motor de excitación independiente.*
— *Valorar el gran par de arranque que proporciona el motor serie.*
— *Razonar las características del motor compound a partir de las características de los motores derivación y serie.*
— *Resumir las aplicaciones de los diferentes tipos de motores.*

GUION

— Clasificación de los motores de c. c.
— Características generales utilizadas en los motores.
— Motor de excitación en derivación.
— Motor de excitación en serie.
— Motor de excitación compound.
— Comparación y aplicación de los principales tipos de motores de c. c.

PUNTOS CLAVE

— Analizar la forma de las características de un motor a partir de las expresiones de velocidad y par motor.
— Interpretar la denominación de característica dura que se le da a la característica de velocidad del motor derivación.
— Comparar las características de los motores derivación, serie y compound.

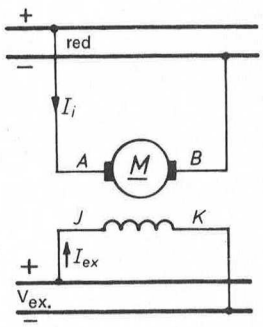


Fig. 12.1 Esquema simplificado del motor de excitación independiente.

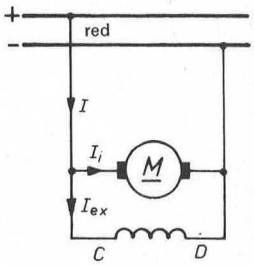


Fig. 12.2 Esquema simplificado del motor derivación.

EXPOSICION DEL TEMA

12.1 Clasificación de los motores de c. c.

Existen varios criterios para clasificar los motores, si bien pueden resumirse en dos:

a) Según su excitación.
b) Según su funcionamiento.

12.1.1 *Tipos de motores según su excitación*

Pueden ser:

a) Motor de excitación independiente (fig. 12.1).
b) Motor de excitación en derivación (fig. 12.2).
c) Motor de excitación en serie (fig. 12.3).
d) Motor de excitación compound (fig. 12.4).

En cuanto a denominación de bornes y características peculiares de cada tipo de excitación, es de aplicación todo lo dicho para generadores.

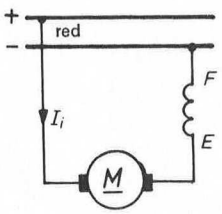


Fig. 12.3 Esquema simplificado del motor serie.

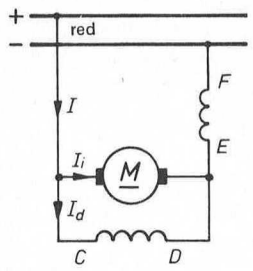


Fig. 12.4 Esquema simplificado del motor compound.

12.1.2 *Tipos de motores según su funcionamiento*

Los motores pueden funcionar:

a) A par constante.

b) A potencia constante.

c) Mixto: par constante hasta una velocidad determinada y potencia constante a partir de esa velocidad.

12.1.3 *Comparación entre los motores de excitación independiente y derivación*

Al observar las figuras 12.1 y 12.2, se aprecia la identidad entre las condiciones de funcionamiento del motor derivación y las del independiente, ya que el devanado de excitación está alimentado en ambos por una red de *tensión constante.*

Así, pues, el estudio sobre las características electromecánicas de los motores derivación e independiente será común y, por esto, solamente se citará uno de ellos (motor derivación).

12.2 Características generales utilizadas en los motores

Las variables utilizadas en el estudio de los diversos tipos de motores son dos: *velocidad de rotación* y *par motor.*

12.2.1 *Expresión general de la velocidad*

La expresión de la velocidad para cualquier tipo de motor se dedujo en el apartado 11.3.3.

$$N = \frac{V_b - (R_i \cdot I_i) - 2\,U_e}{\Phi \cdot n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60}}$$

en donde:

$$n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{60} = \frac{1}{K_1} = \text{constante}$$

$2\,U_e \approx 0$. (frente al valor de V_b)

Y la expresión simplificada será:

$$\boxed{N = K_1 \cdot \frac{V_b - (R_i \cdot I_i)}{\Phi}}$$

expresión de la velocidad para cualquier tipo de motor de c. c.

12.2.2 *Expresión general del par motor*

El par motor deducido en el apartado 11.3.2 era:

$$M_i = n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi} \cdot \Phi \cdot I_i$$

en donde:

$$n \cdot \frac{p}{c} \cdot \frac{1}{2\,\pi} = K = \text{constante}$$

Y la expresión simplificada será:

$$\boxed{M_i = K \cdot \Phi \cdot I_i}$$

para cualquier tipo de motor de c. c.

En los ensayos de laboratorio se obtiene el par útil M_u, si bien para el estudio teórico del funcionamiento del motor es más cómodo utilizar el par interno M_i y por ello será el utilizado en las características.

12.3 Motor de excitación en derivación

Es el tipo de motor de c. c. cuya velocidad no disminuye más que ligeramente cuando el par aumenta.

El estudio del motor se hará a través de sus curvas características.

12.3.1 *Característica de velocidad*

Según la expresión de la velocidad (N), al ser la tensión de red (V_b) constante, solamente intervienen en la expresión los términos $R_i \cdot I_i$ y Φ.

Si el flujo se mantiene constante, la velocidad sería:

$$N = K \cdot [V_b - (R_i \cdot I_i)]$$

teniendo en cuenta que el término $R_i \cdot I_i$ es muy pequeño, la velocidad disminuiría algo con la carga, llegando como máximo, esta disminución, al 5 % (curva 1, fig. 12.5).

En la realidad, el flujo útil que llega a los conductores del inducido *no es constante,* por causa de la reacción de inducido (ver Tema 5), sino que disminuye cuando aumenta la carga, por lo que al disminuir el denominador, tenderá a aumentar la velocidad (curva 2), llegando a mantenerse constante. Este tipo de motor se denomina corrientemente de *característica dura.*

Si el efecto de la reacción de inducido es muy elevado, puede ocurrir que la velocidad aumente ligeramente con la carga (curva 3).

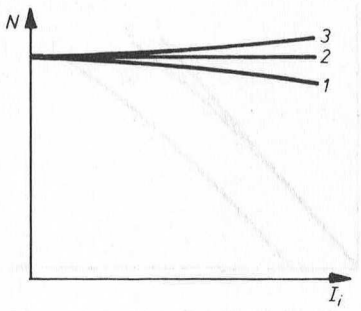


Fig. 12.5 Características de velocidad de un motor de excitación en derivación.

12.3.1.1 *Resumen*

La característica de velocidad se mantiene prácticamente constante con la carga. En todo caso, la ligera variación que se produzca depende del valor que tomen los términos $R_i \cdot I_i$ y la reacción de inducido.

Ejercicio de aplicación

Un motor shunt consume una potencia de 11 kW a 220 V, mientras que en vacío consume el 8 % de la potencia anterior, y gira a una velocidad de 1 000 r. p. m. Este motor dispone de devanado de conmutación, que consigue anular la reacción de inducido. Las resistencias de excitación e inducido son de 200 Ω y 0,2 Ω respectivamente. Se desprecia la resistencia del devanado de conmutación.

Determinar:

1.º La corriente que absorbe el inducido en vacío.

2.º La velocidad del motor en carga.

Solución:

1.º En vacío se absorbe una potencia del 8 % de la normal:

$$P_o = \frac{8}{100} \times 11 = 0{,}88 \text{ kW} = 880 \text{ W}$$

La corriente absorbida de la red (fig. 12.6A) será:

$$I_o = \frac{P_o}{V_b} = \frac{880}{220} = 4 \text{ A}$$

La corriente absorbida por el inducido en vacío será la total menos la del circuito de excitación:

$$I_{ex.} = \frac{220}{200} = 1{,}1 \text{ A}$$

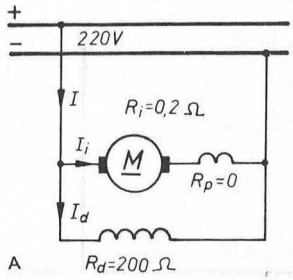
$$I_{io} = 4 - 1{,}1 = 2{,}9 \text{ A}$$

2.º Al funcionar el motor en carga, la velocidad disminuirá algo, ya que el *flujo permanece constante;* por tanto:

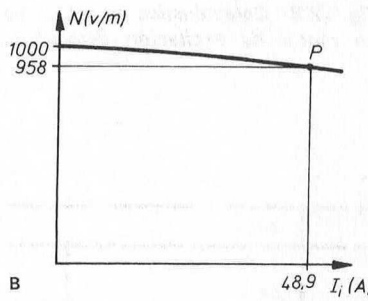
$$N = K_1 \cdot \frac{V_b - (R_i \cdot I_i)}{\Phi} = K \cdot [V_b - (R_i \cdot I_i)]$$

En carga, la corriente que circula por el inducido será:

$$I_i = \frac{P}{V_b} - I_{ex.} = \frac{11\,000}{220} - 1{,}1 = 48{,}9 \text{ A}$$

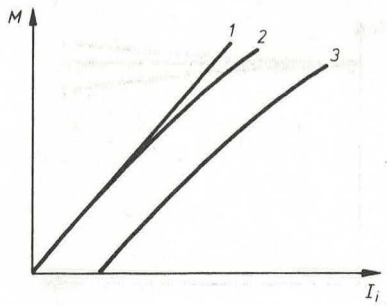


A



B

Fig. 12.6 Ejercicio de aplicación sobre un motor derivación: A, *esquema de conexiones;* B, *característica aproximada de velocidad.*



1 recta del par para flujo constante
2 curva del par interno
3 curva del par útil

Fig. 12.7 Características de par motor (motor derivación).

Así, pues, se cumplirá que:

a) En carga:

$$N = K\ (220 - 0{,}2 \times 48{,}9)$$

b) En vacío:

$$1\,000 = K\ (220 - 0{,}2 \times 2{,}9)$$

Dividiendo las dos expresiones $\frac{A}{B}$:

$$\frac{N}{1\,000} = \frac{220 - 9{,}78}{220 - 0{,}58} = \frac{210{,}22}{219{,}42}$$

De donde:

$$N = \frac{210{,}22 \times 1\,000}{219{,}42} = 958 \text{ r. p. m.}$$

Por tanto, de vacío a plena carga, ha habido una disminución de velocidad relativa de:

$$\frac{N_o - N}{N_o} \cdot 100 = \frac{1\,000 - 958}{1\,000} \cdot 100 = 4{,}2$$

La representación del funcionamiento en carga corresponde al punto *P* de la figura 12.6B, con una disminución de velocidad del 4,2 %.

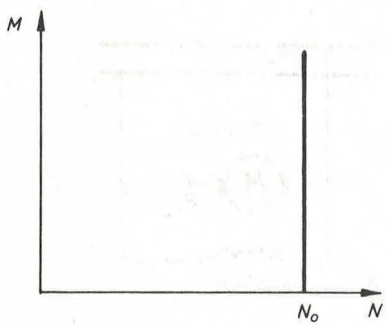


Fig. 12.8 Característica mecánica de un motor de excitación derivación.

12.3.2 *Característica del par motor*

Según la expresión del par motor, si el flujo permanece constante, la característica del par interno será una línea recta que parte del origen de coordenadas (recta 1, fig. 12.7).

Sin embargo, el flujo no es rigurosamente constante, sino que *disminuye ligeramente con la carga,* dando lugar a una característica curvilínea (2).

La característica del par motor útil está situada debajo de la anterior (curva 3), a una distancia prácticamente constante, que corresponde al par que contrarresta las pérdidas. El par que compensa las pérdidas se mantiene constante, de vacío a plena carga, por serlo la velocidad y el flujo.

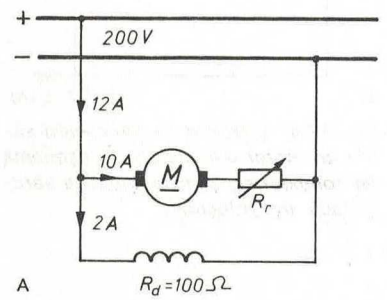
En el estudio de la característica de par motor, se ha supuesto que el flujo inductor permanece constante, por lo que habrá de conectarse el devanado de excitación, desde el primer instante, directamente a la red.

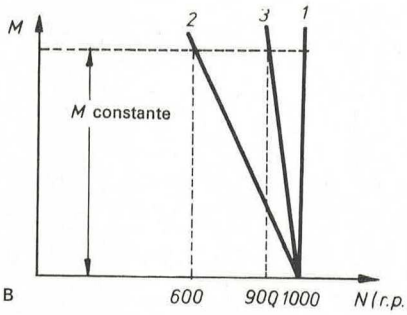
12.3.3 *Característica mecánica*

Para deducir la forma de esta curva es suficiente con eliminar la corriente (I_i), en las características de velocidad N = f (I_i) y de par motor M = f (I_i) (ver apartado 11.5.1). La curva resultante está representada en la figura 12.8.

La abscisa para el valor nulo del par corresponde a la velocidad en vacío (N_o).

La ordenada para velocidad nula corresponde al par de arranque.





1 velocidad nominal
2 característica mecánica con R_r = 7,88 Ω
3 característica mecánica con R_r = 1,97 Ω

Fig. 12.9 Ejercicio de aplicación sobre un motor derivación: A, *esquema de conexiones;* B, *características mecánicas.*

Ejercicio de aplicación

Un motor derivación absorbe una corriente constante y suministra un par constante a cualquier velocidad, para lo cual han de conectarse resistencias en serie con el inducido (figura 12.9A). Las resistencias de los circuitos de excitación e inducido son 100 Ω y 0,1 Ω respectivamente, y la caída de tensión en escobillas es de 2 V. La tensión de red es 200 V, de la que absorbe 12 A a la velocidad nominal 1 000 r. p. m. (sin resistencia adicional). Determinar:

1.º La resistencia adicional para que la velocidad descienda el 40 % de la nominal.

2.º La característica de velocidad, al conectar una resistencia adicional de 1,97 Ω.

3.º Las pérdidas Joule que se producirán en el primer caso, expresándolas en tanto por ciento de la potencia absorbida.

Solución:

1.º Al mantenerse constante el par y la corriente, también lo será el flujo, para lo cual el motor estará dotado de sistema compensador de la reacción de inducido.

La corriente que circula por el inducido será:

$$I_i = I - I_{ex.} = 12 - \frac{200}{100} = 10 \text{ A}$$

La velocidad viene dada por la expresión:

$$N = K\,[V_b - (R_i \cdot I_i) - 2\,U_e]$$

En servicio nominal:

$$1\,000 = K\,[200 - (0{,}1 \times 10) - 2] = K \cdot 197$$

$$K = \frac{1\,000}{197}$$

Al descender la velocidad el 40 % de la nominal, será ahora de 600 r. p. m. (recta 2, fig. 12.9B):

$$600 = K\,[200 - (0{,}1 \times 10) - 2 - (R_r \times 10)] = \frac{1\,000}{197}\,[197 - (10 \cdot R_r)]$$

$$600 = 1\,000 - \left(\frac{10\,000}{197} \times R_r\right)$$

$$R_r = \frac{400 \times 197}{10\,000} = 7{,}88\ \Omega$$

obteniéndose:

$$\boxed{R_r = 7{,}88\ \Omega}$$

2.º La $I_{ex.}$ se mantiene constante; por tanto, $I_i = 10$ A; y la velocidad será:

$$N = \frac{1\,000}{197}\,[200 - (0{,}1 \times 10) - 2 - (1{,}97 \times 10)] = \frac{1\,000}{197}\,(177{,}3) = 900 \text{ r. p. m.}$$

La característica de velocidad se supone rectilínea, según indica la curva 3 (fig. 12.9B).

3.º Las pérdidas Joule son:

$$P_J = R_r \cdot I_i^2 = 7{,}88 \times 10^2 = 788\ W$$

Potencia absorbida:

$$P = V_b \cdot I = 200 \times 12 = 2\,400\ W$$

Las pérdidas Joule, en tanto por ciento, de la potencia absorbida son:

$$P_J = \frac{788}{2\,400} \times 100 = 32{,}83\ \%$$

12.4 Motor de excitación en serie

Es el motor cuya velocidad disminuye sensiblemente cuando el par aumenta y cuya velocidad en vacío no tiene límite teóricamente.

Las características del motor serie se describirán a continuación.

12.4.1 *Característica de velocidad*

Observando la expresión de la velocidad, en el motor serie (fig. 12.10), se tendrá:

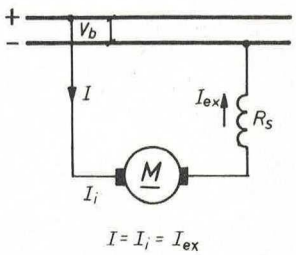
$$N = K_1 \cdot \frac{V_b - [I_i\,(R_i + R_s)] - 2\,U_e}{\Phi}$$

Sin embargo, a diferencia del motor derivación, aquí la corriente de excitación coincide con la de carga:

$$I = I_i = I_{ex.}$$

con lo que el flujo varía automáticamente con la carga.

Al variar la carga, también lo hará el término $I_i\,(R_i + R_s)$ del numerador, aunque dado el pequeño valor de las resistencias (R_i y R_s), esta variación no pasará del 4 ... 8 % de la tensión en bornes.



$I = I_i = I_{ex}$

Fig. 12.10 Esquema simplificado del motor serie.

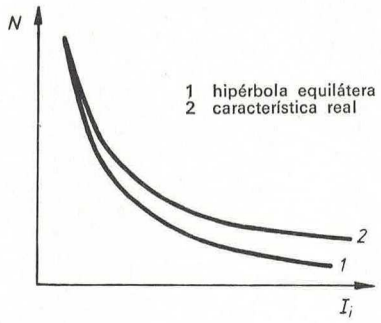


Fig. 12.11 Característica de velocidad del motor serie.

En definitiva, la expresión de la velocidad depende prácticamente del flujo:

$$N \approx \frac{K}{\Phi}$$

$$\boxed{N \cdot \Phi \approx K}$$

ecuación de la hipérbola equilátera.

La característica de velocidad es aproximada a una hipérbola equilátera (curva 1, fig. 12.11), aunque, a medida que aumenta la corriente absorbida, el *motor se satura* y el flujo no aumenta en la misma proporción que (I_i). La característica real será, pues, la curva 2 (fig. 12.11), en la que, para el mismo valor de la corriente absorbida, la velocidad es mayor que la dada por la hipérbola equilátera.

12.4.1.1 *Peligro de embalamiento*

Al observar la característica de velocidad, para corrientes absorbidas muy pequeñas, el motor alcanza velocidades muy elevadas, con el consiguiente peligro de destrucción. Por tanto *no debe trabajar nunca en vacío.*

Solamente en el caso de potencia muy reducida pueden funcionar en vacío sin peligro, por alcanzar su par de resistencias pasivas un valor considerable.

Ejercicio de aplicación

Un motor serie suministra 18 CV a 1 500 r. p. m., con un rendimiento del 90 %, al estar conectado a una red de 220 V. Los datos del inducido son: $R_i = 0{,}35\ \Omega$, $R_s = 0{,}05\ \Omega$, $2\ U_e = 2$ V. Suponiendo que el motor no esté saturado y que el rendimiento se mantenga constante a cualquier carga, determinar:

1.º La velocidad cuando la corriente absorbida aumente un 30 %.
2.º La velocidad cuando la corriente absorbida disminuya un 20 %.
3.º La característica de velocidad.

Solución:

1.º Se ha supuesto que existe proporcionalidad entre el flujo y la corriente que lo produce. En condiciones normales, absorbe una intensidad de:

$$I_1 = \frac{P}{\eta \cdot V_b} = \frac{18 \times 736}{0{,}9 \times 220} = 67\ A$$

La ecuación de la velocidad será:

$$N_1 = K_1 \cdot \frac{V_b - [(R_i + R_s) \cdot I_1] - 2\ U_e}{\Phi_1}$$

$$1\,500 = K_1 \frac{220 - [(0{,}35 + 0{,}05) \times 67] - 2}{\Phi_1} = \frac{K_1}{\Phi_1} \times 191{,}2$$

Al aumentar la corriente en un 30 %, también lo hará el flujo:

$$I_2 = \frac{130}{100} \times I_1 = 1{,}3 \times 67 = 87{,}1\ A$$

$$\Phi_2 = 1{,}3 \times \Phi_1$$

La expresión de la velocidad será ahora:

$$N_2 = K_1 \cdot \frac{220 - [(0{,}35 + 0{,}05) \times 87{,}1] - 2}{1{,}3 \times \Phi_1} = \frac{K_1}{\Phi_1} \times 140{,}89$$

Dividiendo las dos ecuaciones:

$$\frac{1\,500}{N_2} = \frac{191{,}2}{140{,}89}$$

$$\boxed{N_2 = 1\,105\ \text{r. p. m.}}$$

2.º Al disminuir la corriente un 20 %, resultará:

$$I_3 = \frac{80}{100} \times I_1 = 0{,}8 \times 67 = 53{,}6 \text{ A}$$

$$\Phi_3 = 0{,}8 \times \Phi_1$$

La expresión de la velocidad será ahora:

$$N_3 = K_1 \times \frac{220 - [(0{,}35 + 0{,}05) \times 53{,}6] - 2}{0{,}8 \times \Phi_1} = \frac{K_1}{\Phi_1} \times 245{,}7$$

Dividiendo las dos ecuaciones:

$$\frac{1\,500}{N_3} = \frac{191{,}2}{245{,}7}$$

$$\boxed{N_3 = 1\,927 \text{ r. p. m.}}$$

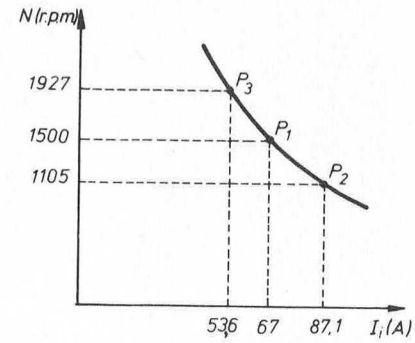


Fig. 12.12 Ejercicio de aplicación sobre la característica de velocidad de un motor serie.

3.º La característica de velocidad se obtiene con los tres puntos: P_1 (67 A, 1 500 r. p. m.), P_2 (87,1 A, 1 105 r. p. m.) y P_3 (53,6 A, 1 927 r. p. m.), según indica la figura 12.12.

12.4.2 *Característica de par motor*

Dado que el par depende del producto entre el flujo y la corriente, y que a su vez el flujo depende de la corriente, quedará:

$$M_i = K \cdot \Phi \cdot I_i = \boxed{K_1 \cdot I_i^2}$$

ecuación de la parábola.

Por tanto, antes de la saturación, la curva de par interno es una rama de parábola que pasa por el origen (curva 1, fig. 12.13).

Cuando la corriente aumenta, *el motor se satura* y la característica del par interno tiende hacia un valor constante (curva 2).

La característica del par útil está situada debajo de la característica interior (curva 3), una vez se le restan los valores del par que contrarrestará las pérdidas.

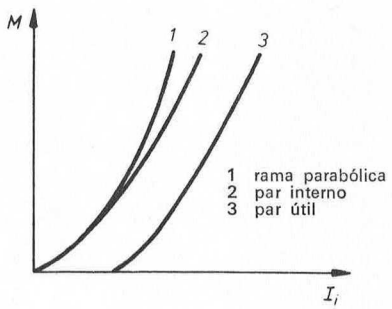


Fig. 12.13 Características de par motor.

12.4.3 *Característica mecánica*

Esta curva se obtiene eliminando la corriente en las características de velocidad N = f (I_i) y de par M = f (I_i). La eliminación de la corriente puede hacerse gráficamente (fig. 12.14) o analíticamente.

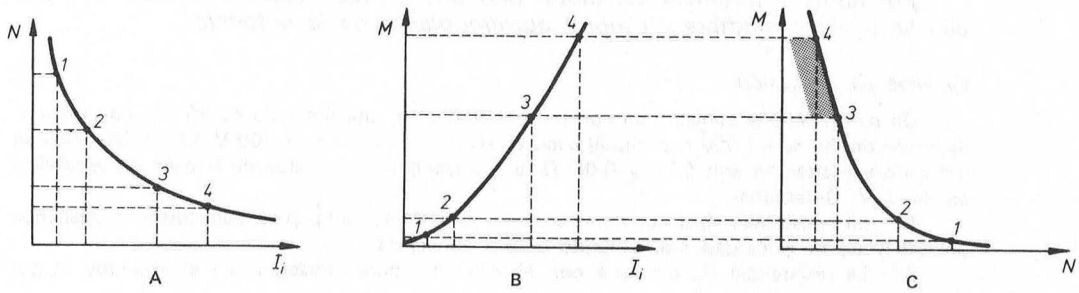


Fig. 12.14 Determinación gráfica de la característica mecánica de un motor serie: A, *característica de velocidad;* B, *característica de par;* C, *característica mecánica.*

12.4.3.1 *Determinación analítica de la característica mecánica*

Cuando no hay saturación se cumple:

$$\left.\begin{aligned} N &\approx \frac{K}{\Phi} = \frac{K_1}{I_i} \\ M &= K \cdot I_i^2 \end{aligned}\right\} \; I_i = \frac{K_1}{N}$$

$$M = K \cdot \left(\frac{K_1}{N}\right)^2 = K_2 \cdot \frac{1}{N^2}$$

O sea, el par:

$$\boxed{M = K_2 \cdot \frac{1}{N^2}}$$

El par varía en razón inversa del cuadrado de la velocidad (zona 1-2-3) (fig. 12.14C).

Cuando hay saturación se cumple aproximadamente:

$$\left.\begin{aligned} N &\approx \frac{K}{\Phi} = \frac{K_1}{I_i} \\ M &\approx K' \cdot I_i \end{aligned}\right\} \quad I_i = \frac{K_1}{N}$$

$$M \approx K' \cdot \frac{K_1}{N} = K_3 \cdot \frac{1}{N}$$

O sea, el par:

$$\boxed{M = K_3 \cdot \frac{1}{N}}$$

o bien:

$$\boxed{M \cdot N \approx \text{cte.}}$$

El par varía en razón inversa a la velocidad, y la forma de la curva se aproximará a la hipérbola equilátera (zona 3-4) (fig. 12.14C).

12.4.3.2 *Autorregulación de potencia*

La característica mecánica del motor serie coincide prácticamente con la hipérbola equilátera, por lo que se cumplirá:

$$M \cdot N \approx \text{cte.}$$

Teniendo en cuenta que la potencia del motor es el producto del par por la velocidad, también se cumple:

$$\boxed{P \approx \text{cte.}}$$

Por tanto la potencia del motor permanece prácticamente constante, y por ello se le da el nombre de *motor autorregulador de la potencia.*

Ejercicio de aplicación

Un motor serie suministra, en condiciones normales, una potencia de 85 CV, con un rendimiento del 85 % a 1 000 r. p. m., al estar conectado a una red de 400 V. Las resistencias de inducido y excitación son 0,15 y 0,05 Ω respectivamente y la caída de tensión en escobillas es de 2 V. Determinar:

1.º La resistencia R_r a conectar, en serie con el inducido, para conseguir un descenso del 50 % de la velocidad manteniendo el par constante.

2.º La resistencia R_r, en serie con el inducido, para conseguir en el arranque el par nominal.

3.º Las características mecánicas de los apartados anteriores.

Solución:

1.º El par producido por un motor serie es proporcional al cuadrado de la intensidad; por tanto, será la intensidad la que deberá permanecer constante.

En servicio normal, la corriente absorbida se obtiene a partir de la potencia:

$$\eta = \frac{P_u}{P}$$

$$P = \frac{P_u}{\eta} = \frac{85 \times 736}{0{,}85} = 73\,600 \text{ W}$$

$$I_i = \frac{P}{V_b} = \frac{73\,600}{400} = 184 \text{ A}$$

La expresión de la velocidad nominal será:

$$N = K_1 \cdot \frac{V_b - [I_i\ (R_i + R_s)] - 2\ U_e}{\Phi}$$

$$1\,000 = K_1 \cdot \frac{400 - [184\ (0{,}15 + 0{,}05)] - 2}{\Phi} = \frac{K_1}{\Phi} \times 361{,}2$$

Al reducirse la velocidad en un 50 %, será ahora de 500 r. p. m., y al ser el par constante, quedará:

$$500 = K_1 \cdot \frac{400 - [184\ (0{,}15 + 0{,}05 + R_r)] - 2}{\Phi} = \frac{K_1}{\Phi} \cdot (361{,}2 - 184\ R_r)$$

Dividiendo las expresiones de las velocidades:

$$\frac{1\,000}{500} = \frac{361{,}2}{361{,}2 - (184 \cdot R_r)}$$

de donde:

$$\boxed{R_r = 0{,}98\ \Omega}$$

2.º En el arranque, la f. c. e. m. es nula, y el valor de la corriente será el nominal, para cumplir con la condición de producir un par constante:

$$V_b = [I_i\ (R_i + R_s + R_r)] + 2\ U_e$$

$$400 = [184\ (0{,}15 + 0{,}05 + R_r)] + 2$$

De donde:

$$\boxed{R_r = 1{,}96\ \Omega}$$

3.º Las características mecánicas se representan en la figura 12.15, pudiendo comprobar cómo van perdiendo la forma de la hipérbola, para hacerse más rectilíneas.

El punto de funcionamiento en cada caso está señalado por los puntos P_1, P_2 y P_3. El par en el arranque corresponde al punto P_3, donde la velocidad es nula.

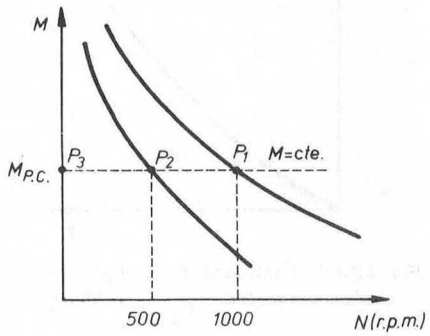


Fig. 12.15 Ejercicio de aplicación sobre la característica mecánica de un motor serie.

12.5 Motor de excitación compound

Es el motor cuya velocidad disminuye cuando el par aumenta y cuya velocidad en vacío es limitada.

Las características del motor compound estarán comprendidas entre las del motor derivación y las del serie.

Los tipos de motor compound son los mismos que para los generadores, resumiéndose al *aditivo* y al *diferencial.*

12.5.1 *Características del motor compound aditivo*

En este motor el flujo se obtiene sumando los efectos de los devanados serie y derivación. Aunque el flujo serie varíe mucho, nunca existirá el peligro de embalamiento, como ocurría en el motor serie, ya que el devanado derivación mantendrá un valor de flujo constante, de vacío a plena carga.

12.5.1.1 *Característica de velocidad (compound aditivo)*

La expresión general de la velocidad será, ahora:

$$N = \frac{K \cdot [V_b - (R_i \cdot I_i) - (R_s \cdot I_i) - 2\ U_e]}{\Phi_d + \Phi_s}$$

en donde:

Φ_d = flujo producido por el devanado derivación
Φ_s = flujo producido por el devanado serie

Al aumentar la corriente del inducido, el flujo serie aumentará y, por tanto, también el flujo total, si bien en menor proporción que en el motor serie.

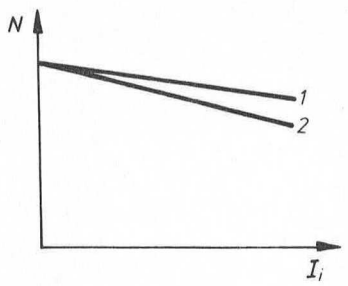


Fig. 12.16 Características de velocidad del motor compound aditivo.

En general, se producirá un aumento de flujo y, por tanto, una disminución de la velocidad, principalmente a plena carga (curva 1, fig. 12.16).

La forma de la curva dependerá de la relación entre ambos flujos; por ejemplo, si predomina el Φ_s sobre Φ_d, la característica será más inclinada (curva 2).

12.5.1.2 *Característica de par motor (compound aditivo)*

El par depende del producto de la intensidad por el flujo resultante; por tanto, cuando aumente la carga, también lo harán el flujo y el par:

$$M_i = K \cdot (\Phi_d + \Phi_s) \cdot I_i$$

En general, el par tiene la forma de una parábola, según indica la figura 12.17.

12.5.1.3 *Característica mecánica (compound aditivo)*

La velocidad disminuye con la carga y el grado de variación dependerá de la relación entre los devanados serie y derivación (fig. 12.18).

La curva 1 corresponde a un motor con predominio de la excitación derivación, mientras que la curva 2 responde a un motor en el que están repartidos por igual los efectos de los devanados serie y derivación.

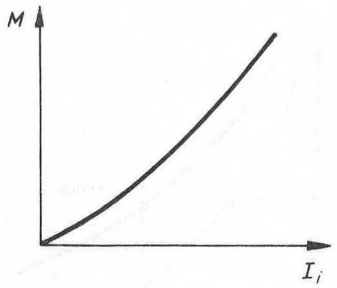


Fig. 12.17 Característica de par motor (compound aditivo).

12.5.2 *Características del motor compound diferencial*

En el motor compound diferencial, el flujo resultante es la diferencia entre el serie y el derivación.

El máximo flujo será el de vacío ya que, en carga, el flujo serie tendrá sentido opuesto al derivación y por ello el flujo total disminuirá.

12.5.2.1 *Característica de velocidad (compound diferencial)*

La velocidad vendrá dada por la expresión:

$$N = \frac{K \cdot [V_b - (R_i \cdot I_i) - (R_s \cdot I_i) - 2\ U_e]}{\Phi_d - \Phi_s}$$

en donde:

Φ_d = flujo producido por el devanado derivación
Φ_s = flujo producido por el devanado serie

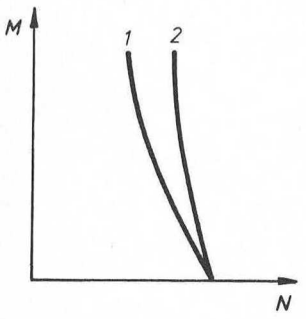


Fig. 12.18 Características mecánicas del motor compound aditivo.

Como el numerador permanece prácticamente constante a cualquier carga, el valor de la velocidad dependerá del reparto entre las excitaciones derivación y serie.

El valor máximo del flujo será el de funcionamiento en vacío, por ser mínima la excitación serie.

A medida que aumente la carga, tomará valor el flujo serie y, por tanto, disminuirá el flujo resultante, motivando un aumento en la velocidad (curva 1, fig. 12.19).

Dimensionando adecuadamente los circuitos de excitación, se puede conseguir que la característica sea una línea recta (curva 2) y, por tanto, se mantenga la velocidad aproximadamente constante desde vacío a plena carga.

12.5.2.2 *Característica de par motor (compound diferencial)*

Según la expresión del par:

$$M = K \cdot (\Phi_d - \Phi_s) \cdot I_i$$

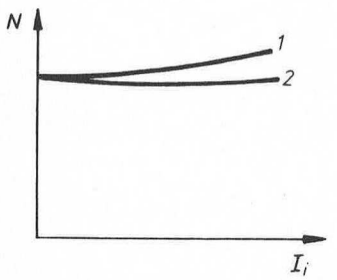


Fig. 12.19 Características de velocidad del motor compound diferencial.

El par aumentará al principio rápidamente con la intensidad, para descender posteriormente. El descenso se debe al predominio de la excitación serie sobre la derivación (curva 1, fig. 12.20).

Si predomina la excitación derivación sobre la serie, la curva resultante será la 2.

12.5.2.3 *Característica mecánica (compound diferencial)*

La velocidad permanece constante a partir del funcionamiento en vacío, y en la zona próxima a plena carga aumenta ligeramente (fig. 12.21).

Como en las características anteriores, la forma de la curva estará condicionada al reparto entre los circuitos de excitación.

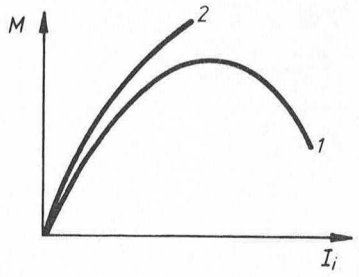


Fig. 12.20 Característica de par motor (compound diferencial).

12.6 Comparación y aplicación de los principales tipos de motores de c. c.

De forma similar al sistema utilizado para los generadores, es el procedimiento utilizado para el estudio de los motores, o sea, por comparación entre sus características electromecánicas.

En la figura 12.22 se representan las características electromecánicas de los motores de c. c. de excitación derivación (similar al independiente), serie y compound. En todas ellas se ha supuesto un punto de funcionamiento común (*P*) para facilitar la comparación.

12.6.1 *Motor de excitación independiente*

Como ya se dijo al principio del tema (apartado 12.1.3), el comportamiento de este motor en servicio es similar al del motor *derivación,* siendo de aplicación todo lo que de él se indique.

En los procesos industriales suelen utilizarse los motores de excitación independiente, por *permitir gran flexibilidad* tanto en el control por el inducido como por el circuito de excitación.

Entre las *aplicaciones industriales* pueden citarse: torneado y taladrado de materiales, trefilación, extrusión de materiales plásticos y gomas, ventilación de hornos, retroceso rápido en vacío de ganchos de grúas, desenrollado de bobinas, retroceso de útiles para serrar, etc.

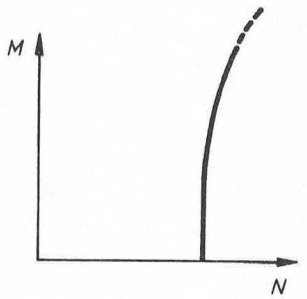


Fig. 12.21 Característica mecánica del motor compound diferencial.

12.6.2 *Motor de excitación en derivación*

La principal ventaja de este motor es su *constancia de la velocidad* para cualquier régimen de carga (fig. 12.22A), que lo hace idóneo para las máquinas que funcionen a *velocidad constante,* incluso aunque desaparezca la carga.

Otra de las ventajas que presenta el motor derivación es la proporcionalidad entre el par (motor o útil) y la corriente del inducido, ya que prácticamente esta característica es una recta (fig. 12.22B).

El par de este motor en el arranque se deduce de la expresión:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I_i$$

En el arranque Φ = cte., pero I_i alcanza el valor máximo; por tanto, el par máximo lo tendrá el motor derivación en el arranque.

Como *aplicaciones* pueden citarse: ventiladores, bombas, máquinas herramientas, etc., además de los citados para el motor de excitación independiente.

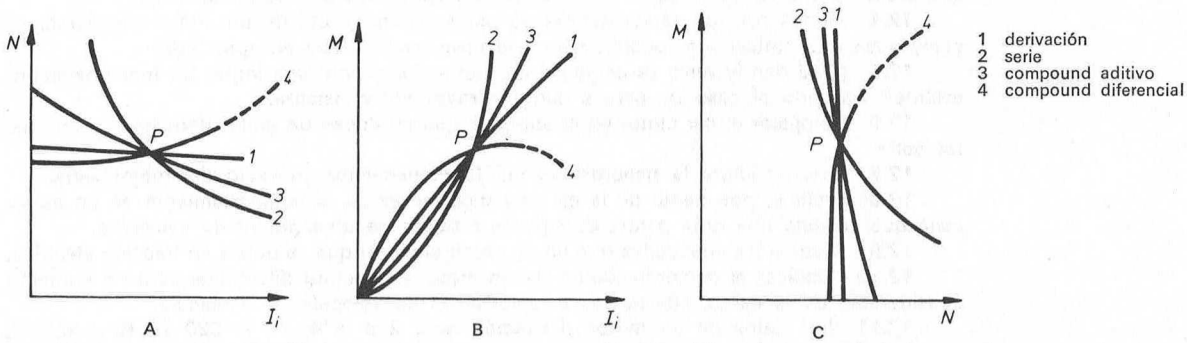


Fig. 12.22 Comparación de las características electromecánicas de los motores de c. c.: A, características de velocidad; B, características de par motor; C, características mecánicas.

12.6.3 *Motor de excitación serie*

La principal ventaja de este motor es su *gran par de arranque,* por ser éste proporcional al cuadrado de la corriente absorbida en el arranque (fig. 12.22B).

Su principal desventaja es la *gran variación de la velocidad con la carga* (fig. 12.22A), de tal forma que si trabaja en vacío, el motor *se embala,* con el consiguiente peligro debido al excesivo valor de la fuerza centrífuga del rotor, que dependerá del cuadrado de la velocidad.

Para evitar el peligro de embalamiento, se suele proteger el motor shuntando el inducido con una resistencia; o bien, shuntando el devanado inductor con un devanado en paralelo, asemejándose a un devanado compound.

Otra ventaja que presenta este motor es la *constancia en la potencia suministrada* (fig. 12.22C), de forma que una variación en el par resistente da lugar a una variación de velocidad en sentido inverso; ejemplo: en tracción eléctrica, en el arranque es necesario vencer un gran par resistente y los motores se conectan en serie; una vez puesto en marcha, disminuirá el par resistente y aumentará la velocidad, por lo que se pasa a la conexión serie-paralelo, y una vez alcanzada la velocidad de régimen, se pasa a la conexión paralelo.

Entre las *aplicaciones* del motor serie caben destacar: tracción eléctrica, grúas, bombas hidráulicas de pistón y, en general, en aquellos procesos donde lo importante sea vencer un par sin gran precisión en la velocidad.

Cabe señalar finalmente la importancia del motor serie en el estudio del *motor universal,* muy utilizado en electrodomésticos y en accionamientos que necesitan altas velocidades.

12.6.4 *Motor de excitación compound*

El motor compound reúne las ventajas de los motores derivación y serie, y atenúa en mayor o menor grado sus inconvenientes. El tipo más utilizado es el *compound aditivo.*

En el *compound aditivo* disminuye la velocidad cuando aumenta la carga algo más que en el motor derivación (fig. 12.22A).

El par motor aumenta en mayor proporción que el derivación y menos que en el motor serie (fig. 12.22B).

El mayor uso del motor compound aditivo es: en extrusadoras, grúas, tracción, calandras, ventiladores, prensas, limadoras, etc.

El motor *compound diferencial* presenta el peligro de embalarse para fuertes cargas, por lo que su empleo es muy limitado.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Analizar la estabilidad del motor derivación al accionar una máquina que ofrece un par constante. Suponer los tres casos representados en las características de la figura 12.5.

— Analizar el comportamiento de un motor compound diferencial en el arranque.

— Ventajas de los motores de c. c. sobre los de c. a.

CUESTIONARIO

12.1 Explicar el funcionamiento, a par constante, del motor de excitación independiente.

12.2 Explicar el funcionamiento, a potencia constante, del motor de excitación independiente.

12.3 Razonar sobre la forma de la característica de velocidad de un motor derivación, que presente una fuerte reacción de inducido a partir de los 3/4 de plena carga.

12.4 Al observar las características de pares interno y útil de un motor derivación, se comprueba que ambas son iguales, sólo que desplazadas entre sí; ¿por qué?

12.5 ¿Qué condiciones se exigen a un motor derivación para lograr un funcionamiento estable? Aplicarlo al caso de cargas con par resistente constante.

12.6 Comparar el par motor en el arranque que producen un motor derivación y un motor serie.

12.7 Razonar sobre la peligrosidad del funcionamiento en vacío del motor serie.

12.8 Explicar, por medio de la característica mecánica, el comportamiento de un motor serie que acciona una grúa para elevar pesos a través de un reductor de velocidad.

12.9 Razonar las cualidades que ha de reunir el motor que se utilice en tracción eléctrica.

12.10 Explicar el comportamiento de un motor compound diferencial para un aumento considerable de la carga. Utilizar las características de velocidad y mecánica.

12.11 Los datos de un motor derivación son: 2 p = 4, R_d = 220 Ω, R_i = 0,1 Ω, n = 160, 2 c = 2, Φ = 60 mWb. Al conectarse a una red de 440 V, absorbe en vacío 12 A y a plena carga 82 A. Prescindiendo de la reacción de inducido y la caída de tensión en escobillas, determinar:

1.º La velocidad en carga.

2.º La velocidad en vacío.

3.º La regulación de velocidad expresada en tanto por ciento.

Respuestas: 1.ª: N = 1 350 r. p. m.; 2.ª: N = 1 372 r. p. m.; 3.ª: 1,6 %.

12.12 Un motor derivación absorbe 22 kW a 220 V y gira a 600 r. p. m. Las resistencias de excitación e inducido son 55 Ω y 0,4 Ω respectivamente. Suponiendo el flujo constante, y caída de tensión en escobillas nula, determinar:

1.º La resistencia que ha de conectarse en serie con el inducido para disminuir su velocidad a 400 r. p. m., manteniendo el par constante.

2.º La velocidad, al disminuir el par en un 40 %, si permanece la resistencia adicional en el circuito.

Respuestas: 1.ª: $R_r = 0{,}63\ \Omega$; 2.ª: N = 530 r. p. m.

12.13 Un motor derivación, conectado a una tensión de 400 V de la que absorbe 160 A, gira a 1 000 r. p. m. Las resistencias son: $R_d = 40\ \Omega$ y $R_i = 0{,}2\ \Omega$. Tómese $2\ U_e = 0$. Determinar:

1.º La resistencia R_r que ha de conectarse en serie con R_d, para que aumente su velocidad a 1 200 r. p. m. sin variar la corriente absorbida.

2.º Las pérdidas que se producirán en el circuito de excitación en el apartado anterior.

Respuestas: 1.ª: $R_r = 8{,}47\ \Omega$; 2.ª: 3 300 W.

12.14 Un motor serie se conecta a una red de 220 V, de la que absorbe 50 A, al girar a 1 500 r. p. m. Datos: $R_i = 0{,}15\ \Omega$, $R_s = 0{,}05\ \Omega$, $2\ U_e \approx 0$. Determinar la velocidad, cuando se conecta una resistencia de 0,8 Ω en serie con el inducido, sabiendo que la corriente absorbida disminuye en un 30 % y el flujo en un 20 %.

Respuesta: N = 1 651 r. p. m.

12.15 En el ejercicio anterior, se trata de averiguar:

1.º La relación entre el par motor para las dos velocidades.

2.º La relación entre las potencias de salida para las dos velocidades.

Respuestas: 1.ª: $\frac{M_1}{M_2} = 1{,}78$; 2.ª: $\frac{P_1}{P_2} = 1{,}61$.

BIBLIOGRAFIA

KOSTENKO M., *Máquinas eléctricas I,* Montaner y Simón, S. A., Barcelona 1968.

MOELLER-WERR, *Máquinas de c. c.,* Ed. Labor, S. A., Barcelona 1961.

UNE, Instituto Nacional de Racionalización y Normalización, Madrid.

FOUILLE A., *Problemas resueltos de Electrotecnia,* Barcelona 1967.

Equipo EPS Zaragoza, *Técnicas de Expresión Gráfica 2.1. Electricidad,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1977.

Tema 13

Convertidores estáticos

OBJETIVOS

— *Describir el funcionamiento del rectificador.*
— *Clasificar los tipos de rectificadores.*
— *Valorar la importancia actual de los semiconductores en relación con el control de la máquina de c. c.*
— *Clasificar los rectificadores según su conexión.*

GUION

— Rectificadores de vapor de mercurio.
— Ignitrón.
— Tiristor.
— Diodos semiconductores.
— Rectificadores de óxido de cobre y selenio.
— Puentes rectificadores.
— Onduladores.

PUNTOS CLAVE

— Conocer los métodos empleados actualmente para la producción de corriente continua.
— Diferenciar los distintos dispositivos utilizados en sistemas de rectificación, su funcionamiento y características.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— No se precisa de conocimientos previos.

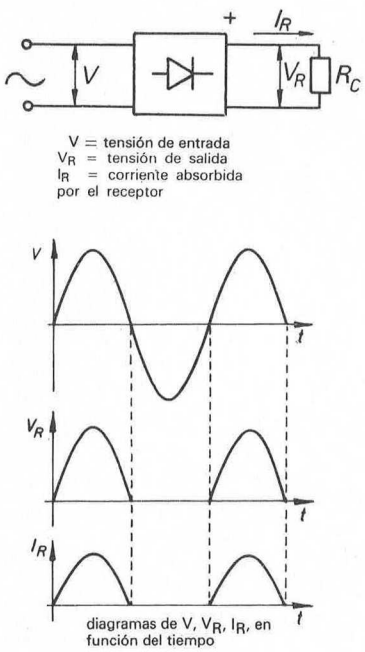


Fig. 13.1 Funcionamiento del rectificador de un circuito con carga óhmica.

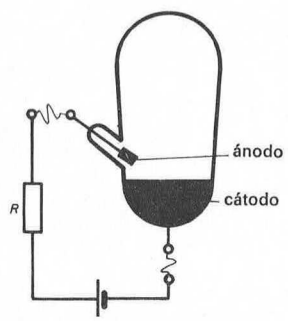


Fig. 13.2 Conexión de un rectificador de mercurio.

EXPOSICION DEL TEMA

13.1 Introducción

La producción y el transporte de energía eléctrica resulta más rentable si se realiza con corriente alterna que con corriente continua; por ello, la distribución se hace en forma de corriente alterna. Pero como existen algunas instalaciones que deben funcionar con corriente continua, como tracción ferroviaria, industria electroquímica, soldadura eléctrica, etc., se hace necesaria la conversión de corriente alterna en continua.

Este trabajo lo realizan, entre otros convertidores, los llamados estáticos, que por su mayor rendimiento, menor volumen y mayor gama de posibilidades en el funcionamiento, han desplazado a los convertidores rotativos.

En la actualidad son los semiconductores los que se han impuesto a los sistemas tradicionales de rectificación. Por su avanzada tecnología y elevado rendimiento se colocan a la cabeza de todos los demás dispositivos.

13.2 Conceptos generales sobre rectificadores

Se denomina *rectificador* todo aparato o dispositivo capaz de convertir corriente alterna en corriente continua.

Un rectificador ideal es el que permite el paso de corriente en un sentido

(sin ofrecer ninguna resistencia) e impide circular la corriente en sentido contrario al anterior (presentando una resistencia infinita).

Los rectificadores reales son los que se aproximan a los ideales.

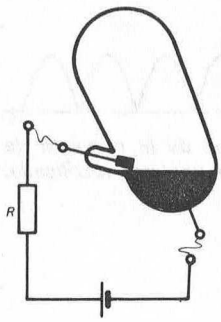


Fig. 13.3 Cebado.

13.3 Funcionamiento de los rectificadores

Puede verse en la figura 13.1.

Al intercalarse en el circuito de corriente alterna, permite el paso de corriente en la semionda positiva, pero no en la negativa, convirtiendo la corriente alterna en pulsatoria.

Se consideran elementos rectificadores los dispositivos que presentan una resistencia mínima a la corriente en un sentido, y muy elevada en el sentido opuesto. Ejemplo de dispositivos que funcionan según este requisito son las válvulas de vapor mercurio, placas de selenio, de silicio, de germanio, de óxido de cobre, ignitrón, tiratrón, tiristor.

13.4 Rectificadores de vapor de mercurio

Están constituidos por una ampolla de vidrio que contiene un ánodo de grafito y un cátodo de mercurio líquido.

Si ánodo y cátodo se conectan a través de un circuito, como el de la figura 13.2 y a continuación se inclina la ampolla hasta que el mercurio toque el ánodo, se cerrará el circuito (fig. 13.3).

Poniendo nuevamente la ampolla en la posición inicial se observa que el amperímetro detecta el paso de corriente. Quiere esto decir que se ha producido un cebado y el circuito se mantiene cerrado (fig. 13.4).

Este fenómeno va acompañado de un desprendimiento de luz azulada y la aparición de una mancha muy brillante (mancha catódica) que se mueve desordenadamente sobre el mercurio líquido; al mismo tiempo se produce una elevación de la temperatura, que da lugar a una evaporación de mercurio, el cual se condensa en las paredes de la ampolla volviendo de nuevo al cátodo.

El cebado se mantiene gracias al llamado campo eléctrico creado por los iones positivos, que se hallan próximos a la mancha catódica; se desceba sólo cuando se abre el circuito; por ejemplo, mediante un interruptor.

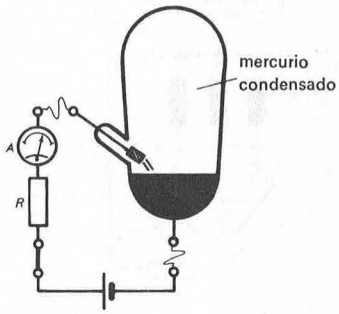


Fig. 13.4 Posición vertical de funcionamiento.

13.4.1 *Anodo de encendido*

Puede comprobarse fácilmente la dificultad práctica que el movimiento de la ampolla entraña cada vez que se desee poner en funcionamiento el circuito.

Esta dificultad se resolvió introduciendo un nuevo elemento: el ánodo de encendido, consistente en un electrodo auxiliar que está en contacto con el mercurio y que, al ser levantado, provoca el arco eléctrico suficiente para el cebado (fig. 13.5).



Fig. 13.5 Rectificador de vapor de mercurio con dispositivo de cebado.

13.5 Rectificador monofásico de vapor de mercurio

Añadiendo un nuevo ánodo principal a la ampolla de vidrio y conectando este conjunto, como aparece en la figura 13.6, se podrá rectificar la corriente alterna del transformador.

En los bornes de salida del secundario del transformador se tendrán polaridades opuestas, que variarán de acuerdo con la frecuencia. Por tanto, los ánodos principales tendrán polaridades contrarias en todo momento por estar conectados a estos bornes de salida.

Cuando se cierre el interruptor de cebado, se producirá el encendido, y el ánodo que en ese momento tenga polaridad positiva, por ejemplo A_1, conducirá a través del arco.

Al cambiar la polaridad en los bornes de salida del transformador, y como consecuencia en los ánodos, dejará de conducir el que lo hacía en el semiperíodo anterior A_1, cebándose el otro ánodo A_2.

Para mantener el cebado sin que tenga que actuar de nuevo el ánodo auxiliar, se conecta en el circuito una bobina que mantendrá la intensidad unos instantes, aun habiendo desaparecido la tensión; instantes suficientes para que

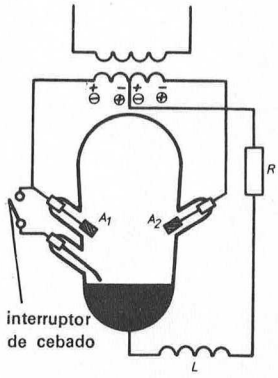


Fig. 13.6 Rectificador monofásico.

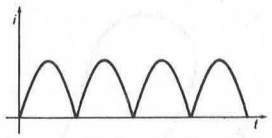


Fig. 13.7 Forma de la corriente de salida una vez rectificada.

el ánodo A_2 alcance el potencial positivo suficiente como para comenzar a conducir, sin que el rectificador se haya descebado.

Las senoides de corriente alterna del transformador se convertirán en ondas de igual polaridad, pudiéndolas considerar por ello como corriente continua y recibiendo el nombre de corriente continua pulsatoria (fig. 13.7).

13.6 Rectificadores de vapor de mercurio polifásicos

La corriente pulsatoria obtenida en la rectificación monofásica, aun siendo de igual polaridad, tiene una componente alterna que resulta excesiva para la mayoría de las aplicaciones.

Para reducir esta excesiva ondulación se recurre a sistemas de rectificación polifásicos, siendo los más utilizados los trifásicos y hexafásicos.

13.6.1 *Rectificador de vapor de mercurio trifásico*

Consta de una ampolla con tres ánodos, alimentados por el secundario de un transformador conectado en triángulo-estrella; cada ánodo conducirá mientras su tensión sea positiva y de valor superior a la de los otros dos, puesto que el campo eléctrico respecto al cátodo será el de valor más elevado.

La conmutación entre ánodos se produce automáticamente cuando éstos van alcanzando valores superiores a los que tenía el ánodo conductor.

En la figura 13.8, se aprecia el circuito de conexión y la señal de salida obtenida.

13.6.2 *Rectificador de vapor de mercurio hexafásico*

Es el más empleado en la práctica y está formado por una ampolla provista de seis ánodos. La alimentación de los ánodos se hace por el secundario del transformador en conexión triángulo-estrella hexafásica.

La conmutación se produce de igual modo que en el caso de rectificador trifásico.

En la figura 13.9, se ven el circuito de conexión y la señal resultante.

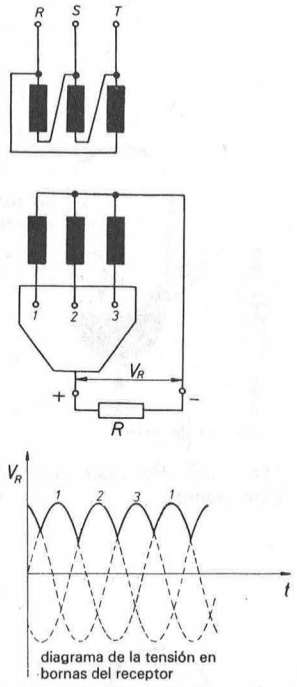


Fig. 13.8 Rectificador trifásico y forma de la señal de salida.

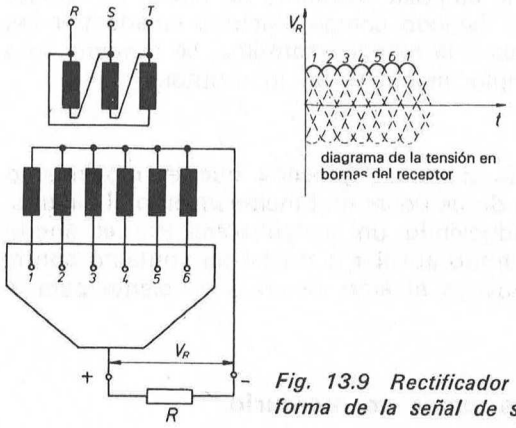


Fig. 13.9 Rectificador hexafásico y forma de la señal de salida.

13.7 Consideraciones generales

En los equipos de rectificación de vapor de mercurio se dan unas características muy de tener en cuenta para el correcto funcionamiento y mantenimiento.

13.7.1 *Mantenimiento del vacío*

El rectificador de ampolla de vidrio pierde su vacío al cabo de un número determinado de horas, que suele estar comprendido entre las 50 000 y las 100 000; y como, además, para corrientes elevadas habría que dar a las ampollas unas dimensiones enormes, ha sido sustituido por recipientes metálicos. El recipiente metálico dispone de doble pared para facilitar la refrigeración, un número de ánodos que oscila entre tres y veinticuatro, y un ánodo de encendido. Como resulta prácticamente imposible conseguir la hermeticidad total del recipiente

metálico en los grandes rectificadores, se instalan bombas de vacío para conseguirlo.

13.7.2 *Refrigeración*

Normalmente la refrigeración se hace por agua que circula por el interior de la doble pared. La temperatura de trabajo de los rectificadores debe ser de 45 °C a 55 °C, y corriente máxima de 8 000 A. Modernamente, se ha sustituido la refrigeración de agua por aire en rectificadores de hasta 1 500 A; refrigeración que se consigue mediante un soplado de aire frío que proporciona un ventilador y que incide sobre las aletas de refrigeración que lleva el rectificador (fig. 13.10).

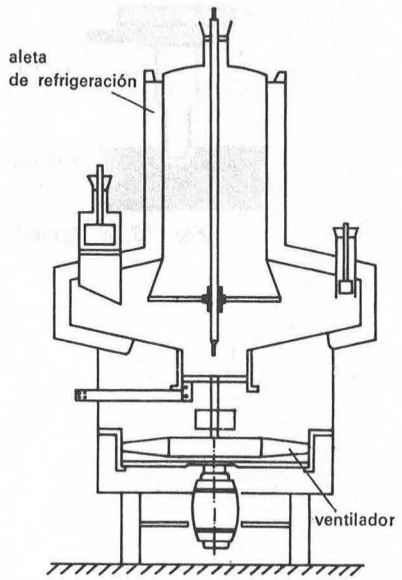


Fig. 13.10 Dibujo esquemático del sistema de refrigeración por aire.

13.7.3 *Características de los rectificadores de vapor de mercurio*

Las más importantes son: la caída de tensión y el rendimiento.

1.° La *caída de tensión* interna de un rectificador de vapor de mercurio se distribuye entre el cátodo, el ánodo y el recorrido del arco; por tanto, depende del tipo y del tamaño del rectificador, aunque normalmente oscila entre 20 y 30 V.

La característica de caída de tensión está en función de su corriente y de la refrigeración del rectificador. En la figura 13.11 se observa que, si la carga aumenta bastante, también lo hace la caída de tensión y, si la refrigeración es eficaz, disminuye considerablemente la caída de tensión.

2.° Rendimiento de un rectificador de vapor de mercurio. Viene expresado por la fórmula:

$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{útil} + P_{perdida}} = \frac{V_c \cdot I_c}{V_c \cdot I_c + v. \cdot I_c} = \frac{V_c}{V_c + v}$$

siendo:

η = rendimiento;
P = potencia;
V_c = tensión rectificada;
v = caída de tensión interna;
I_c = corriente absorbida por la carga.

La característica del rendimiento, en función de la carga, se mantiene aproximadamente constante, a partir de 1/4 de plena carga (fig. 13.12).

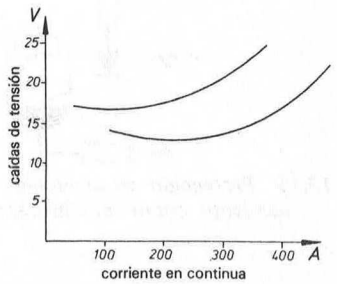


Fig. 13.11 Característica de la caída de tensión.

13.8 Ignitrón

Es una válvula rectificadora cuya envoltura, de acero inoxidable, tiene una doble pared para facilitar el sistema de refrigeración por agua.

En el interior (fig. 13.13), van alojados los siguientes elementos: un cátodo de mercurio que hace contacto con la envoltura poniéndola, por tanto, a su mismo potencial. Un ánodo de grafito sujeto a la envoltura mediante un aislador de vidrio y un ignitor, que es el elemento más característico de este

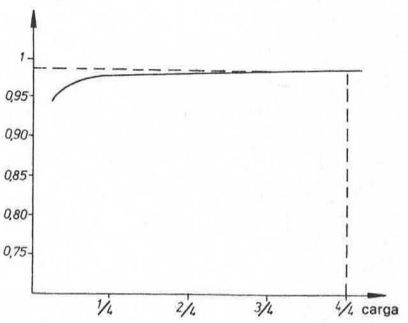


Fig. 13.12 Característica de rendimiento.

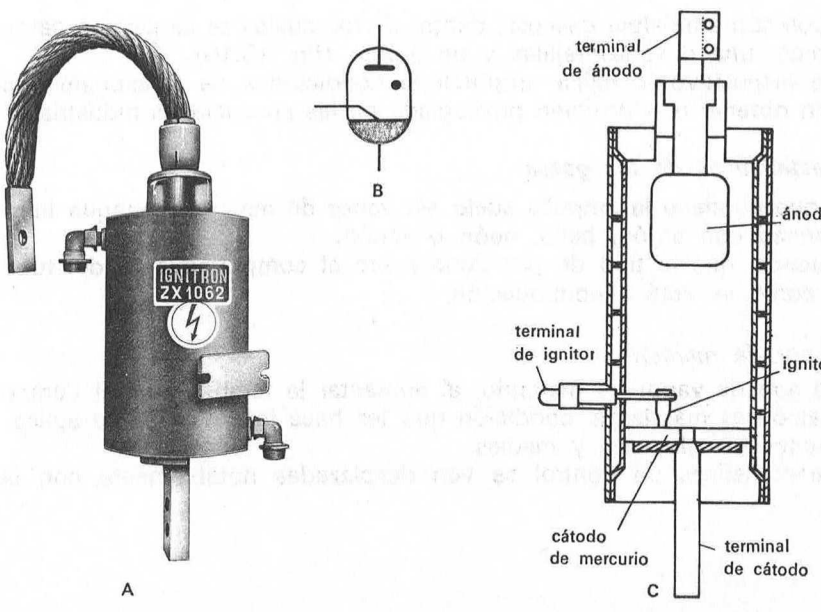


Fig. 13.13 Ignitrón: A, *vista en su forma real;* B, *símbolo;* C, *corte esquemático.*

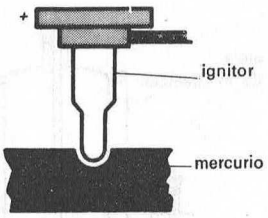


Fig. 13.14 Ignitor.

dispositivo, constituido por una barrita de un aglomerado de carburo de boro, muy resistente al desgaste.

Está aislado de la cuba y aunque su posición es tal que está sumergido en el mercurio, como el extremo sumergido tiene forma de punta de lápiz, penetra en el mercurio sin hacer contacto, ya que éste crea un menisco cóncavo (fig. 13.14).

13.8.1 *Funcionamiento del ignitrón*

Aplicando una diferencia de potencial de unos 120 a 150 V entre ignitor y cátodo, circulará una corriente de unos 10 a 30 A, que provocará un arco entre ellos, suficiente para conseguir una pequeña mancha catódica.

En estas condiciones, cuando en el ánodo haya un potencial positivo, se ionizará la válvula y conducirá.

Cuando el potencial anódico va decreciendo y llega a ser menor que el de arco (de 12 a 18 V), la corriente baja hasta un punto crítico, o cambia la polaridad, se interrumpe la conducción y la mancha catódica desaparece.

13.8.2 *Ignitrones para rectificación*

En su funcionamiento como rectificador de corriente alterna, el número de veces que actúe el sistema de encendido será el del valor de la frecuencia. Esto es, para una corriente alterna de 50 Hz, el sistema de cebado actuaría 50 veces.

Generalmente, suelen trabajar a tensiones que alcanzan hasta los 2 400 V e intensidades medias elevadas.

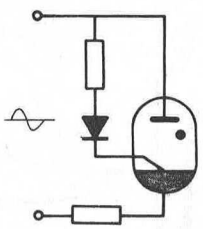


Fig. 13.15 Protección en el funcionamiento como rectificador.

Suelen equiparse con otros elementos adicionales, como son: dos pantallas entre cátodo y ánodo para poder resistir tensiones inversas de varios miles de voltios, un nuevo ignitor que sirve como reserva y un ánodo auxiliar para mantener la mancha catódica, caso de que la intensidad bajase por causas ajenas al funcionamiento correcto.

Para el correcto funcionamiento de los ignitrones se deberán tener muy presentes los valores límite de tensión anódica y la intensidad máxima instantánea que circula por el ánodo; los proporciona el fabricante.

Para la obtención de un rendimiento aceptable, es factor fundamental que el sistema de refrigeración cumpla con su cometido, puesto que si trabajase con dificultad, el calor acumulado provocaría la elevación de la presión de vapor de mercurio y haría saltar arcos inversos, con la consiguiente destrucción de la válvula.

Para asegurar el correcto funcionamiento del ignitrón en los circuitos rectificadores se conecta en serie, entre ignitor y el ánodo, un rectificador seco (fig. 13.15).

Su funcionamiento es el siguiente: en el semiciclo cuyo ánodo es positivo, el ignitor, que está conectado a él, ceba la válvula y conduce. De no ser por este rectificador, al cambiar la polaridad, se produciría una corriente inversa que destruiría la válvula.

13.9 **Tiratrones**

Son tubos con atmósfera gaseosa, dentro de los cuales se alojan: un cátodo termoiónico, una o varias rejillas y un ánodo (fig. 13.16).

En este dispositivo la rejilla proporciona condiciones de funcionamiento que le hacen obtener una posición privilegiada en las aplicaciones industriales.

13.9.1 *Características de los gases*

El gas que contiene la ampolla suele ser vapor de mercurio, aunque también se fabrican con argón, helio, neón o xenón.

La influencia que el tipo de gas tiene sobre el comportamiento del tubo es grande, como se verá a continuación.

13.9.1.1 *Vapor de mercurio*

Cuando son de vapor de mercurio, al aumentar la temperatura, el tiempo de desionización es más largo, condición que les hace inútiles para su aplicación en frecuencias elevadas y medias.

Sus características de control se ven desplazadas notablemente con la

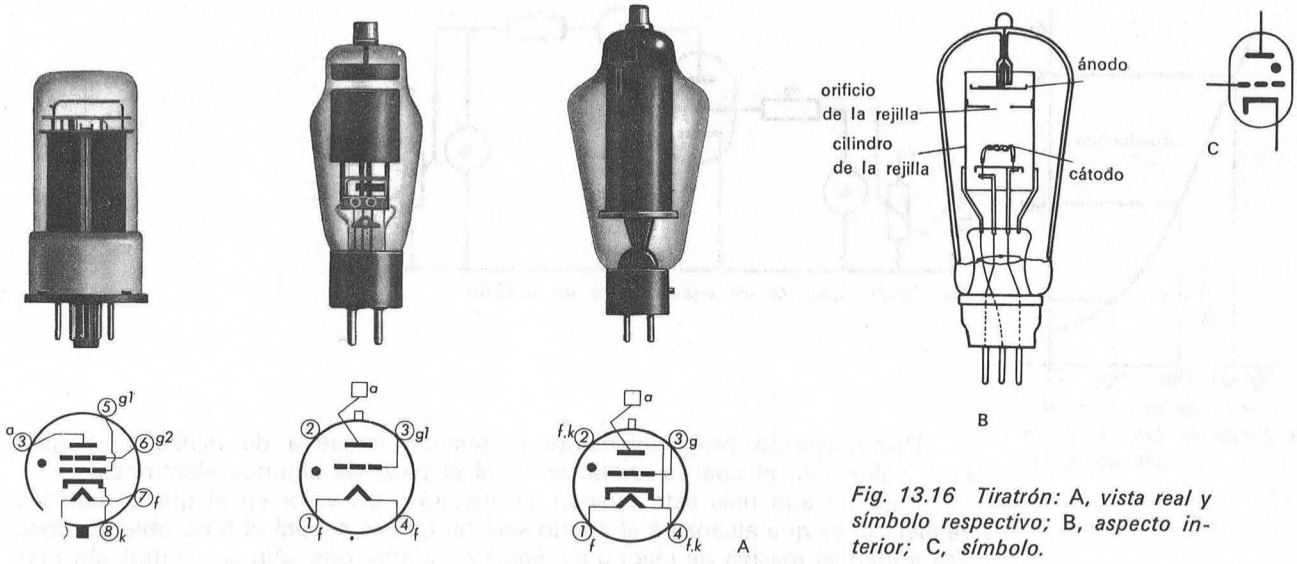


Fig. 13.16 Tiratrón: A, vista real y símbolo respectivo; B, aspecto interior; C, símbolo.

temperatura y, por tanto, los puntos de funcionamiento se trasladan a valores de tensión de rejilla más elevados.

Se precisa de un precalentamiento para producir una evaporación de mercurio que facilite después el encendido.

Deben montarse de manera que permanezcan en posición vertical para que el mercurio líquido se deposite en el fondo de la ampolla.

Es muy difícil que se produzca un arco inverso, y esta ventaja le hace útil para montajes de elevadas potencias, pudiendo alcanzar valores de tensión inversa de hasta 30 000 V.

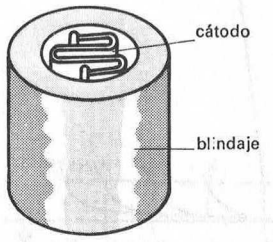


Fig. 13.17 Cátodo y blindaje de un tiratrón.

13.9.1.2 *Gases de argón, helio, neón o xenón*

El aumento de temperatura influye muy poco sobre el normal comportamiento de estos dispositivos ya que, entre los valores de tensión y corriente de trabajo, el aumento de temperatura no llega a influir sobre la presión del gas dentro del tubo hasta valores peligrosos ni tan siquiera a valores suficientes como para desplazar los valores característicos de trabajo.

El tiempo útil de vida es mucho más corto que con mercurio.

La máxima tensión inversa que pueden soportar suele ser de unos 1 300 V.

Pueden emplearse para uso de altas frecuencias pues su tiempo de desionización es muy corto.

Pueden trabajar en cualquier posición.

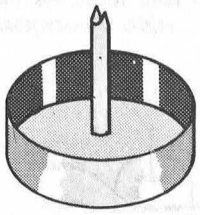


Fig. 13.18 Anodo de un tiratrón.

13.9.2 *Cátodo*

Está recubierto de una capa de óxidos con elevado poder de emisión electrónica, siendo su forma más común la helicoidal. El cátodo suele estar rodeado de un blindaje que reduce las pérdidas caloríficas (fig. 13.17).

13.9.3 *Anodo*

De níquel ennegrecido, está diseñado para irradiar con facilidad el calor, evitando así la emisión termoiónica de electrones por parte del ánodo (fig. 13.18).

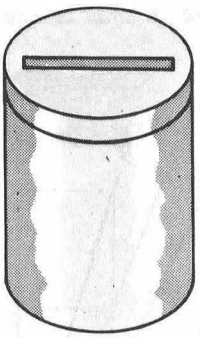


Fig. 13.19 Rejilla de mando.

13.9.4 *Rejilla*

Suele ser de grafito o metal y se aloja rodeando al cátodo (fig. 13.19) o sobre él (fig. 13.20).

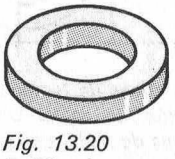


Fig. 13.20 Rejilla de mando.

13.9.5 *Funcionamiento*

Si se polariza la válvula como en el circuito de la figura 13.21, cuando la rejilla posea un potencial lo suficientemente alto, no habrá posibilidad de hacer llegar al ánodo ningún electrón de los que el cátodo emita, por elevado que sea el potencial positivo del ánodo. No obstante, no se debe sobrepasar el valor de tensión anódica recomendado por el fabricante, pues podría, en caso extremo, cebarse el tiratrón y provocar una avería por el excesivo bombardeo.

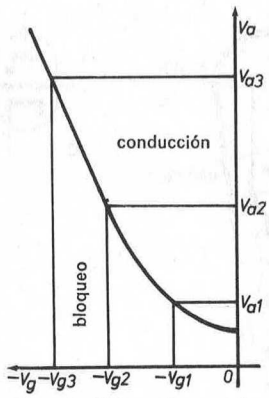


Fig. 13.22 Característica de mando. Tensión de ánodo en función de la tensión de rejilla.

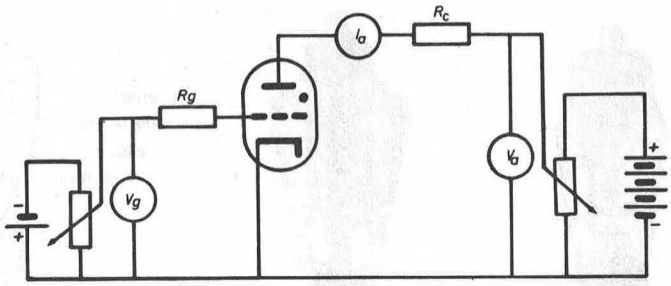


Fig. 13.21 Circuito de ensayo para un tiratrón.

Disminuyendo progresivamente la tensión negativa de rejilla, se llegará a un valor para el cual la rejilla permitirá el paso de algunos electrones.

Bajando aún más esta tensión, se llegará a un valor en el que el número de electrones que alcanzará el ánodo será tal que se cebará el tubo obteniéndose una afluencia masiva de electrones hacia el ánodo, que sólo se controlarán mediante la resistencia de ánodo y el potencial positivo de éste.

Para producir el cebado, los valores de tensiones de ánodo y rejilla van íntimamente ligados, y a cada potencial positivo de ánodo corresponde uno negativo de rejilla (fig. 13.22).

Una vez ionizada la válvula, aunque se aumenten los valores del potencial de rejillas, no se podrá cortar la conducción, ni siquiera controlarla, ya que alrededor de la rejilla se ha formado una nube iónica positiva que evita cualquier intervención de ésta sobre los electrones que fluyen hacia el ánodo.

El tubo se descebará y dejará de conducir sólo cuando la tensión entre ánodo y cátodo sea inferior a la de arco.

No obstante, si antes de desionizarse la rejilla, entre ánodo y cátodo se alcanza la tensión crítica, el tubo vuelve a conducir. De esto se desprende que se debe tener la precaución de no excitar de nuevo la válvula sin haber dejado transcurrir unos microsegundos, necesarios para que la rejilla se desionice y tenga de nuevo control sobre la válvula.

La desionización de la rejilla se produce a través de R_g, evitando así su destrucción.

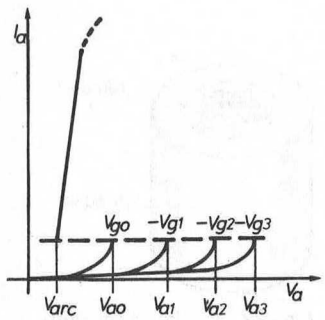


Fig. 13.23 Característica de intensidad de ánodo en función de la tensión de ánodo para tensiones de rejilla constantes.



Fig. 13.24 Tiratrón tetrodo.

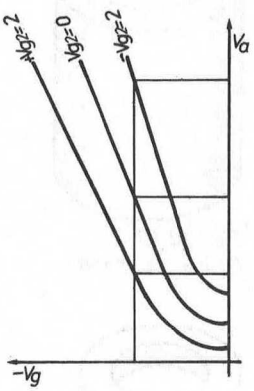


Fig. 13.25 Características de tensión de ánodo en función de rejilla de mando, para tensiones de rejilla constantes.

13.9.6 *Característica de gobierno de un tiratrón*

Con el circuito de la figura 13.21, se podrán obtener los datos necesarios para la formación de las curvas que definan el comportamiento del tiratrón.

Para ello, se regularán las tensiones de rejilla, comprobándose que para producir el cebado será necesario aumentar la tensión anódica. Una vez cebada la válvula se comprobará igualmente cómo la tensión de ánodo es la misma, sean cuales sean los valores de tensión de rejilla y cebado que se han necesitado para poner en funcionamiento la válvula (fig. 13.23).

Ya se comentaba, en el párrafo anterior, la relación existente entre las tensiones de rejilla y ánodo, y cómo ambas se correspondían. Estas curvas características terminan de demostrar lo dicho.

13.10 Tiratrón tetrodo

No sólo se fabrican válvulas con una rejilla (de mando o control), sino que también se construyen con otra rejilla más, llamada *pantalla* (fig. 13.24).

Su misión es *apantallar* la rejilla de mando controlando la emisión electrónica que atraviesa a esta rejilla.

Podrán desplazarse las curvas características de gobierno del tiratrón, dando tensiones adecuadas a esta nueva rejilla (fig. 13.25).

Como se apreciará en dicha figura, cuando se polarice la rejilla pantalla a un valor de tensión negativo, si la tensión de rejilla de mando se ha mantenido constante, se tendrá que aumentar la tensión de ánodo para conseguir el cebado.

Polarizando la rejilla pantalla con tensión positiva, el cebado se conseguirá con una tensión de ánodo mucho menor.

13.11 Aplicación como rectificadores

Alimentando el tiratrón con corriente alterna (fig. 13.26) y la rejilla con una corriente continua de polarización adecuada, en el ánodo se obtendrá una señal como la de la figura 13.27, cebándose la válvula cuando el valor de la tensión de rejilla sea el adecuado.

En la figura 13.28 se puede observar cómo, sobre la característica de mando, al tomar un valor de tensión V_{gb}, de tensión de rejilla de mando, la ignición se retrasa hasta que el ánodo alcanza un valor adecuado de tensión V_{ab}. Aumentando a V_{gc}, V_{gd}, estos tiempos se desplazarían a t_c, t_d y, por consiguiente, a V_{ac} y V_{ad}.

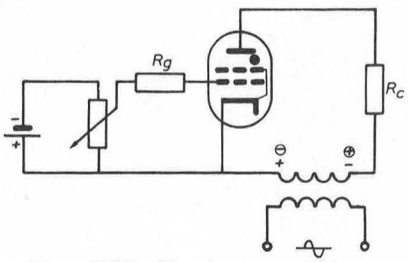


Fig. 13.26 Circuito rectificador con tiratrón.

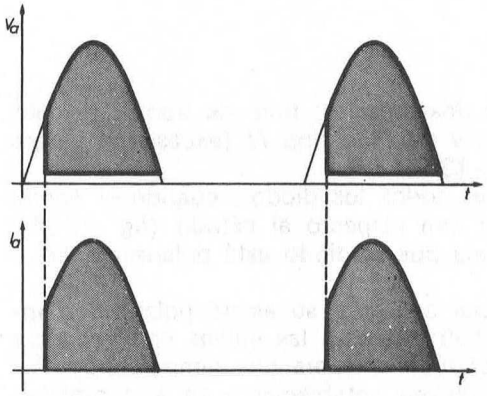
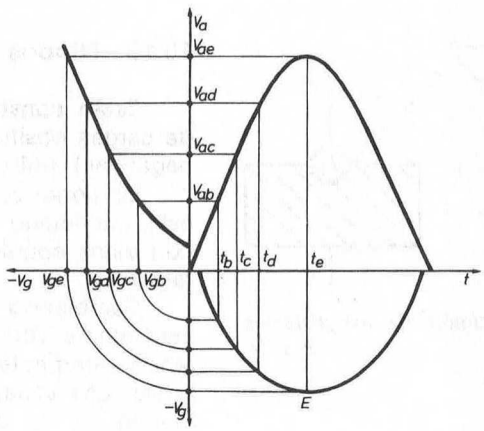
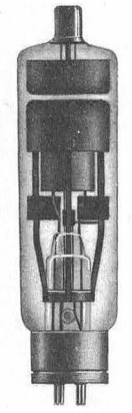


Fig. 13.27 Tensión y corriente de salida.





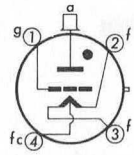


Fig. 13.28 Cebado con tensiones continuas.

El tiratrón conducirá hasta que la tensión de ánodo sea inferior a la tensión de arco, que tras el cebado cae a un valor menor permaneciendo en él constante.

Polarizando la rejilla de mando, mediante corriente continua, el control de cebado no podrá gobernarse pasado el punto *E*, correspondiente a una tensión V_{ge}, o sea, entre 0 y 90°.

13.12 Otros modos de control

Polarizando la rejilla con corriente alterna (fig. 13.29) se obtendrá el control que aparece en la figura 13.30. Este procedimiento es conocido por el nombre de *control horizontal.*

Superponiendo a una tensión continua otra alterna (fig. 13.31) se obtendrán los resultados de la figura 13.32. El sistema se conoce con el nombre de *control vertical.*

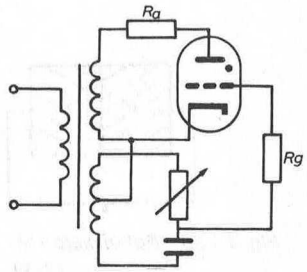


Fig. 13.29 Polarización mediante corriente alterna. Control horizontal.

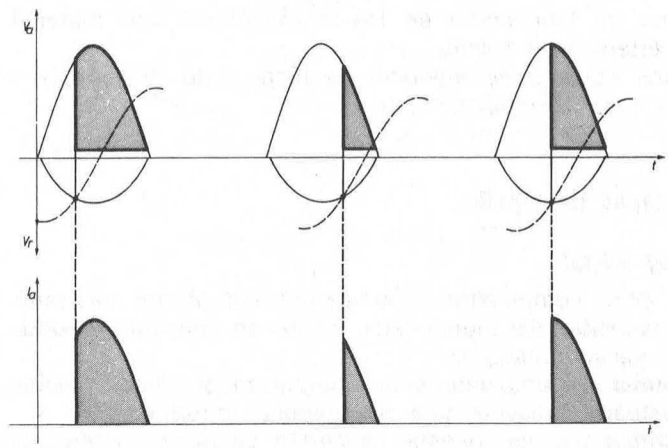


Fig. 13.30 Tensión y corriente de salida. Tres casos de corriente de salida.

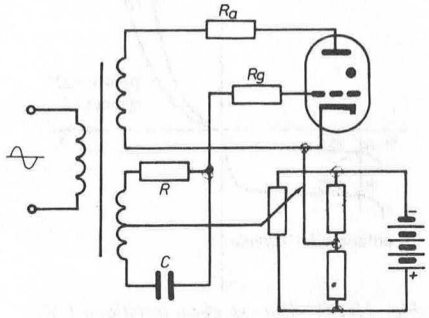


Fig. 13.31 Polarización mediante corriente alterna. Control vertical.

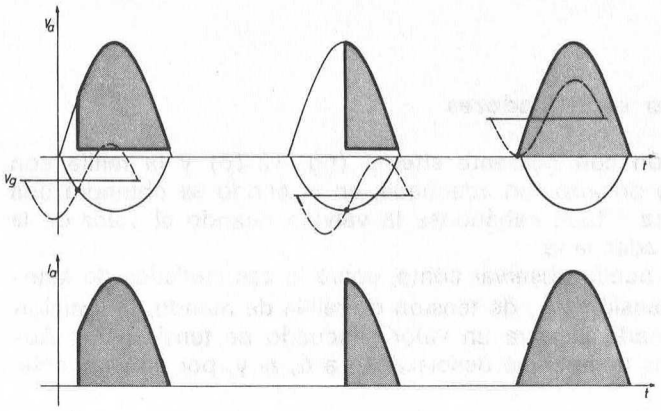


Fig. 13.32 Tensión y corriente de salida. Tres casos de corriente de salida.

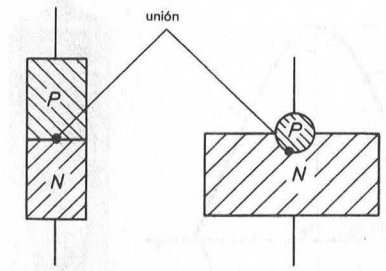


Fig. 13.33 Unión de los sistemas P y N.

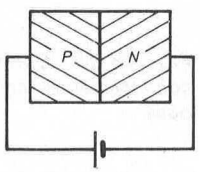


Fig. 13.34 Polarización directa.

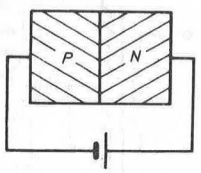


Fig. 13.35 Polarización inversa.

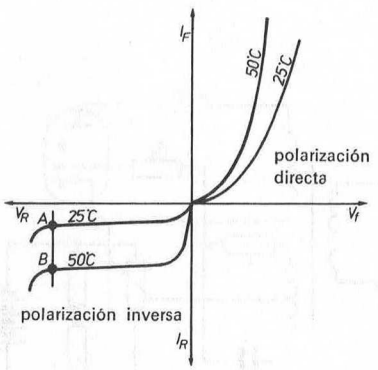


Fig. 13.36 Curvas características I/V en polarización directa e inversa de un diodo a distintas temperaturas.

13.13 Diodos semiconductores

Están constituidos por la unión de dos cristales: uno, de tipo *P* (exceso de cargas positivas), que sirve de ánodo y otro, de tipo *N* (exceso de cargas negativas) utilizado como cátodo; (fig. 13.33).

La conducción se produce, como en todos los diodos, cuando el ánodo está conectado a un potencial positivo con respecto al cátodo (fig. 13.34); con estas condiciones de tensión, se dice que el diodo está polarizado directamente.

Cambiando la polaridad del potencial aplicado, se estará polarizando inversamente (fig. 13.35). En la figura 13.36 aparecen las curvas características tensión-corriente, de dos diodos semiconductores, para dos temperaturas distintas. Las variaciones de temperatura influyen notablemente en el comportamiento de los diodos semiconductores.

En estas curvas se comprobará fácilmente cómo, en polarización directa, la intensidad que circula es muy elevada y la resistencia del diodo muy pequeña; y cómo, en polarización inversa, la tensión tiene que aumentar mucho para conseguir aumentos de intensidad insignificantes, lo cual demuestra la elevada oposición que el diodo presenta en estas condiciones.

Si se sigue aumentando la tensión, se llega a una zona (prohibida), puntos *A* y *B* de la figura 13.36, en la que el diodo se perfora y conduce totalmente.

13.13.1 *Características generales*

En polarización directa no debe sobrepasarse nunca el valor de pico establecido por el fabricante ni la potencia máxima que puede disipar el diodo.

En polarización inversa, la mayor precaución se tendrá en no alcanzar el valor de tensión en el que se produce la *ruptura.*

La ruptura se produce cuando el potencial inverso es tan elevado que arranca electrones de sus órbitas por ruptura del enlace covalente, ruptura que, por otra parte, es rapidísima, fundiéndose los cristales y destruyendo la unión.

13.14 Rectificador de silicio

Hay diversos métodos de fabricación en los rectificadores con material semiconductor, al cual pertenece el silicio.

Se estudiarán aquí los construidos mediante la técnica de difusión, por ser más utilizada en este tipo de diodos.

13.14.1 *Construcción*

Se distinguen dos etapas principales:

13.14.1.1 *Preparación del cristal*

De los halogenuros y otros compuestos se extrae el silicio al que, tras purificar, se somete a un *estiramiento* del monocristal, lo que se consigue introduciendo un germen en la masa fundida.

Esta masa suele contener ya una determinada impureza que hace posible que la barra cilíndrica estirada presente una resistividad uniforme.

Las barras que constituyen el monocristal se cortan en discos según los espesores deseados y se lapean para presentar sus superficies paralelas uniformes.

El monocristal más utilizado es el de tipo N, de unos 24 mm de diámetro, que presenta óptimas características en polarización directa e inversa.

Para conseguir las zonas P y N en el monocristal, se utiliza el sistema de difusión por calentamiento. El procedimiento es muy lento, el tiempo empleado para obtener estas zonas es aproximadamente 24 horas y las profundidades de sus capas se controlan con precisiones de $\pm$ 1 μ de error.

Tras una predifusión de P_2O_5 sobre una capa de monocristal, que crea una capa vitrificada en la superficie, se difundirá el fósforo sobre el silicio.

En la otra cara se habrá formado una película de SiO_2, que se elimina por abrasión; luego se difunde el boro, que da lugar a la zona P.

Se eliminan las capas de óxido formadas en ambas caras durante la difusión y se niquelan, a continuación, para obtener un mejor contacto.

Sobre el níquel se deposita una capa de cobre, que facilitará la soldadura, y otra de oro, que evitará la oxidación del cobre.

Se corta entonces el diodo requerido y se decapan los bornes para evitar corrientes de fuga superficiales (fig. 13.37).

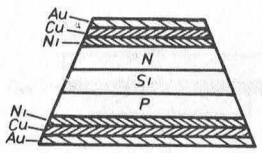


Fig. 13.37 Dibujo esquemático de una tableta de silicio.

13.14.1.2 *Montaje del diodo*

Depende de la potencia para la que se haya diseñado, pero se tiene en cuenta:

a) Robustez y estanquidad de la cápsula, para protección de agentes mecánicos, atmosféricos y térmicos, así como capacidad de disipación del calor.

b) Obtención de altas tensiones de ruptura o perforación, lo que se consigue impregnando el cristal con laca a base de silicona de gran rigidez dieléctrica y estabilidad térmica.

c) Elección de tabletas apropiadas y conductor adecuado para soportar las corrientes elevadas de polarización directa.

13.14.1.3 *Características*

Los valores que deben tenerse en cuenta cuando se manejan diodos de silicio y, en general, esto sucede para cualquier material, serán aquellos que dé el fabricante para el caso; no obstante, aquí se hace un pequeño resumen orientativo.

La caída de tensión directa suele ser de 1 V, soportando una tensión inversa máxima del orden de los 3 800 a 4 000 V.

Soporta una densidad de corriente de unos 100 A/cm^2.

No suele resistir temperaturas superiores a los 200 °C.

Es sólido a sobrecargas y cambios de temperatura, por el amplio dimensionado de la tableta.

Se fabrican para pequeñas, medianas y grandes potencias; los de estas últimas, provistos de aletas de refrigeración (fig. 13.38).

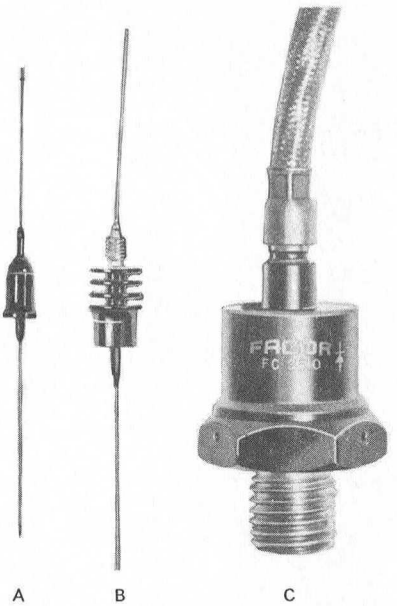


Fig. 13.38 Diodos de silicio: A, pequeña potencia; B, mediana; C, gran potencia.

Requieren protecciones:

a) contra sobreintensidades, fusibles ultrarrápidos;

b) contra sobretensiones, circuitos RC.

13.15 **Rectificadores de germanio**

Pertenecen también al grupo de rectificadores semiconductores.

Generalmente se fabrican por la técnica de unión por aleación.

13.15.1 *Construcción*

Sobre una oblea de material semiconductor de tipo N, que constituye uno de los polos, se coloca una bolita de indio; se calienta el conjunto a elevada temperatura, durante un corto espacio de tiempo, de manera que se produce una fusión; al enfriarse, el indio ha formado la zona P.

Se conectan los terminales de masa y se cubre el conjunto con una resistencia adecuada (fig. 13.39).

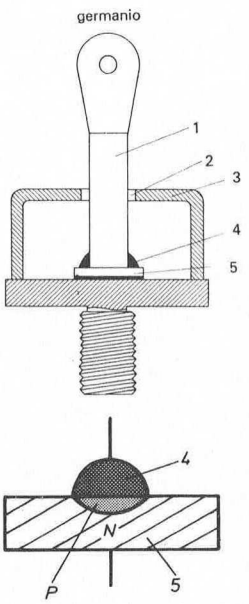


Fig. 13.39 Diodo de germanio: 1, electrodo de cobre; 2, aislante; 3, protección; 4, indio; 5, germanio.

13.15.2 *Características*

De reducidas dimensiones, pero de gran rendimiento, el rectificador de germanio se puede utilizar en las mismas aplicaciones que el de silicio.

Su temperatura de funcionamiento es de 65 °C, aunque es deseable que no alcance este valor.

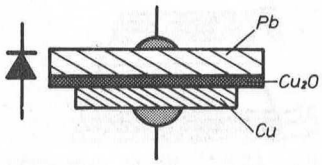


Fig. 13.40 Dibujo esquemático de un diodo de óxido de cobre.

Aplicando 0,2 V, se obtiene ya conducción; el silicio necesita 0,7 V.

Tiene menor resistencia dinámica que el de silicio y mayor rendimiento.

La caída de tensión es de 0,5 V aproximadamente.

La máxima tensión inversa oscila entre 750 y 800 V.

La densidad admisible es un poco menor que la del silicio, pero se acerca a los 100 A/cm^2.

13.16 **Rectificadores de óxido de cobre**

Ha perdido importancia en el campo de aplicaciones industriales porque las técnicas con semiconductores y selenio han dado mejores rendimientos.

13.16.1 *Construcción*

Como placa base se utiliza cobre puro.

Calentándola a 1 000 °C, se forma una capa de óxido de cobre (CuO) de unos 2 mm.

Se uniformiza la capa de óxido de cobre y se cubre con bióxido de cobre, con lo cual habrá un exceso de oxígeno creándose, de este modo, un semiconductor de tipo P.

Se aplica por presión un electrodo de grafito o plomo en la capa oxidada, quedando así constituido este dispositivo (fig. 13.40).

El sentido de la corriente será del cobre hacia el óxido.

13.16.2 *Características*

Les afecta notablemente la temperatura y no pueden superar los 50 °C.

La tensión en polarización directa no supera unos pocos voltios y la inversa máxima que soporta es de unos 8 V, necesitando por ello colocar muchos elementos en serie y derivación cuando aumenta la tensión o la intensidad que no supera los 80 mA/cm^2.

Todo ello justifica su declive.

13.17 **Rectificadores de selenio**

Consiste en una placa metálica, sobre una sola de cuyas caras se deposita una capa de selenio. La placa metálica actúa simplemente de soporte ya que el selenio no posee la consistencia mecánica necesaria.

13.17.1 *Construcción*

En un principio se utilizó como metal soporte el hierro, pero en la actualidad se ha sustituido por aluminio por ser su peso menor, ventaja importante sobre todo en los montajes de bloques que llevan varias placas.

La primera etapa de fabricación consiste en un tratamiento superficial de la placa soporte, para obtener mayor superficie útil y la rugosidad necesaria para una buena adhesión de las capas de metal que se depositen sobre ella y que dan, como resultado, una mejora en las cualidades eléctricas finales.

El aumento de superficie se conseguía haciendo incidir sobre la placa un chorro de arena que producía las rugosidades.

Este procedimiento tiene la desventaja de dejar polvo entre las superficies y necesitar un proceso de limpieza complicado que no daba los resultados apetecidos.

13.17.1.1 *Tratamiento químico*

Sometiendo la placa a una serie de baños se obtiene una superficie ocho veces mayor que por el procedimiento de arena y una mejor limpieza, con la consiguiente disminución de resistencia eléctrica.

Los baños son:

— De H_2SO_4-HNO_3, para desengrasar y limpiar la placa antes del proceso.

— De NaOH, decapado de la superficie de aluminio.

— De HCl, corrosión de la superficie de la placa.

— De HNO_3-HF, limpieza, eliminación de polvo de aluminio, de cloruros, de metales pesados; estabilización del aluminio.

— De níquel, deposición de una capa de níquel sobre el aluminio.

— De selenio, deposición de una capa de selenio sobre el níquel.

Por su mayor interés, se verán a continuación los baños de níquel y selenio.

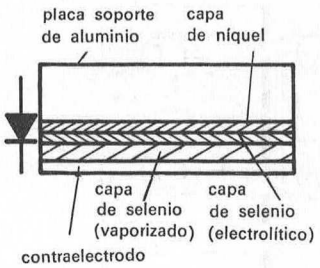


Fig. 13.41 Sección de la placa rectificadora de selenio.

13.17.1.2 *Baño de níquel*

Mediante baño electrolítico se deposita una finísima capa de níquel, que actuará de capa intermedia entre el metal soporte de aluminio y el elemento rectificador, selenio.

El baño consiste, en esencia, en una disolución concentrada de sulfato de níquel y cloruro de níquel.

13.17.1.3 *Baño de selenio*

Es una disolución concentrada de ácido de selenio cristalizado industrial (SeO_3H_2) a la que se le añade un gramo por litro de sauril de sulfato sódico ($C_{12}H_{25}SO_4Na$) para favorecer la electrólisis.

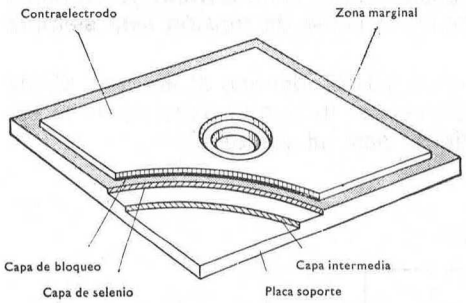
Por simple baño electrolítico, no puede conseguirse la capa necesaria de selenio y debe recurrirse a la vaporización en cámaras de vacío.

Mediante el proceso de cámaras de vacío exclusivamente, la adherencia del selenio a la placa no era perfecta y, por ello, se recurre a depositar primero una fina capa mediante baño electrolítico; y el resto, por cámara de vacío (figura 13.41).

13.17.1.4 *Contraelectrodo*

Sobre la capa de selenio, sólo resta colocar una placa de la aleación de baja fundición, compuesta por estaño-cadmio-bismuto, que recibe el nombre de *contraelectrodo.*

El contraelectrodo no ocupa toda la superficie de la placa de selenio, como se aprecia en la figura 13.42.



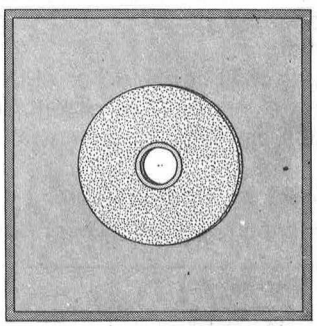


Fig. 13.42 Aspecto de la placa.

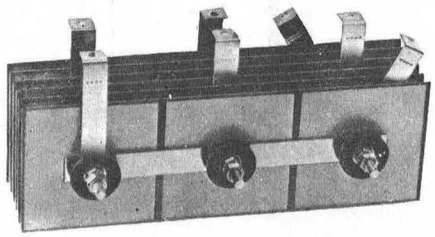


Fig. 13.43 Grupo rectificador de selenio.

13.17.2 *Funcionamiento*

El selenio depositado se ha transformado, por el proceso de fabricación, en extrínseco de tipo P, lo que quiere decir que es portador de cargas positivas.

Así, se ha formado una barrera entre el semiconductor y el contraelectrodo.

El sentido de la corriente será del selenio al contraelectrodo. La dirección de los electrones, por tanto, será el contrario, esto es, del contraelectrodo al selenio.

Su acción rectificadora se comprobará al someter el conjunto a la corriente alterna, ya que éste sólo dejará pasar corriente en aquellos semiciclos en los que la polaridad sea positiva en el electrodo y negativa en el contraelectrodo.

13.17.3 *Características*

Las placas rectificadoras pueden conectarse indistintamente en serie o paralelo. Van montadas una al lado de la otra, en columna, a determinada distancia y sobre bulones roscados aislados (fig. 13.43).

En las columnas rectificadoras para aplicaciones de alta tensión, la última placa rectificadora de cada columna está unida eléctricamente con el bulón.

El tamaño y número de placas de un conjunto rectificador dependen de la intensidad y tensión de carga requerida (fig. 13.44).

Es insensible a las corrientes elevadas y sobreintensidades de corta duración, evitando así la necesidad de una protección.

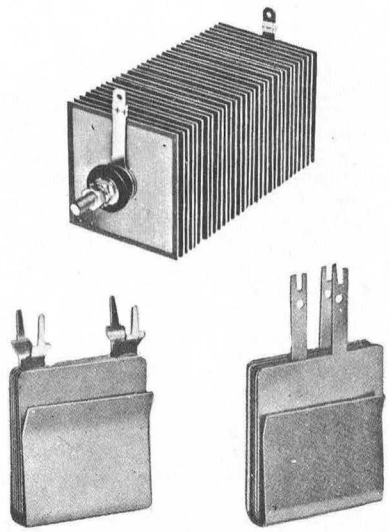


Fig 13.44 Rectificadores de selenio para: A, *pequeñas tensiones;* B, *tensiones elevadas.*

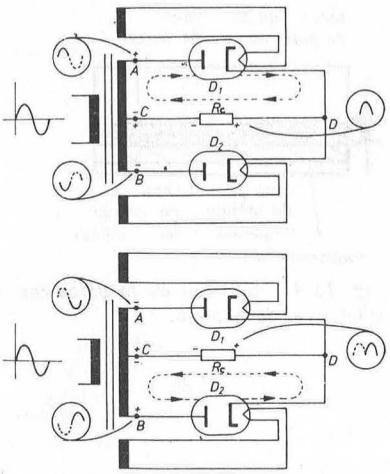


Fig. 13.45 Circuito rectificador de onda completa.

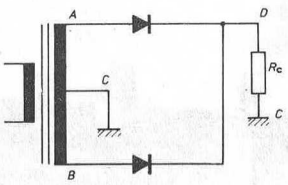


Fig. 13.46 Circuito rectificador de onda completa.

La máxima tensión inversa que soportan es del orden de los 25 a 30 V por elemento.

La densidad de carga de las placas depende, entre otras cosas, de su superficie activa, pudiendo oscilar entre 70 y 100 mA/cm² en refrigeración natural, y 210 a 310 mA/cm² en refrigeración forzada.

Para la vida útil del rectificador de selenio, es esencial la temperatura de servicio de las placas, la cual depende del calor debido a las pérdidas eléctricas (de paso y bloqueo), y de la refrigeración de las placas.

En condiciones de uso normales, se alcanza la temperatura máxima de servicio con 35 °C de temperatura ambiente, entre los 75 y 85 °C.

Con estas temperaturas, las horas útiles de vida alcanzan hasta las 100 000 horas.

13.18 Circuito rectificador de onda completa

Obsérvense los circuitos de la figura 13.45; si se conecta un osciloscopio en el punto *A* y otro en el *B*, se verá que las ondas generadas por la entrada del primario del transformador son iguales y opuestas. Esto, si se toma como común el punto *C*, central del transformador. Así pues, se podrá decir que el punto *A* es positivo respecto al *C* durante el semiciclo positivo, y que el *B* es negativo respecto al *C*. Análogamente, durante el semiciclo negativo, el punto *A* será negativo, y *B* será positivo respecto al *C*.

Por tanto, en el semiciclo positivo, el diodo D_1 conducirá, ya que los electrones salidos del cátodo serán atraídos por el positivo de *A* y existirá corriente de ánodo.

Por el contrario, D_2 permanecerá bloqueado, por ser *B* negativo y estar polarizado inversamente. En el semiciclo negativo, por el contrario, D_2 conducirá y D_1 permanecerá bloqueado, y sólo habrá corriente por el circuito inferior. Obsérvese que, sobre la resistencia R_c, el osciloscopio varía siempre la corriente en un sentido, del punto *D* al *C* y, por tanto, la caída de tensión será siempre de un sentido.

El circuito más conocido es el de la figura 13.46, idéntico al descrito. Basta observar que el punto *C* es potencial de tierra, por lo que el extremo de la resistencia, que también es potencial de tierra, será el punto *C*.

13.18.1 *Valor de la intensidad*

La corriente i_{D_1} vendrá expresada por

$$\boxed{i_{D_1} = \frac{V_o}{r_d + R_c} \cdot \text{sen } \omega t = I_o \cdot \text{sen } \omega t} \quad \text{para } 0 < \omega t < \pi$$

$$\boxed{i_{D_1} = 0}, \quad \text{para } \pi < \omega t < 2\pi$$

y la i_{D_2} por:

$$\boxed{i_{D_2} = 0}, \quad \text{para } 0 < \omega t < \pi$$

$$\boxed{i_{D_2} = \frac{V_o}{r_d + R_c} \cdot \text{sen } \omega t = I_o \cdot \text{sen } \omega t}, \quad \text{para } \pi < \omega t < 2\pi$$

La i_D total que circula por R_c será:

$$\boxed{i_D = i_{D_1} + i_{D_2}}$$

y la ecuación general:

$$\boxed{i_D = |I_o \cdot \text{sen } \omega t|} \quad \text{para } 0 < \omega t < 2\pi$$

La corriente media en la salida será:

$$\boxed{I_{med.} = \frac{2 \cdot I_o}{\pi}}$$

y el valor eficaz de la corriente:

$$I = \frac{2 \cdot I_o}{\sqrt{2}}$$

Análogamente las tensiones,

$$V_{med.} = \frac{2 \cdot V_o}{\pi}$$

y en función del valor eficaz:

$$V_{med.} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \cdot V = 0{,}9 \cdot V$$

13.18.2 *Valor de las potencias y del rendimiento*

La potencia de corriente continua suministrada a la carga es:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = R_c \cdot \left(\frac{2 \cdot V_o}{\pi \cdot (R_c + r_d)} \right)^2 = \frac{4 \cdot V_o^2}{\pi^2 \, (R_c + r_d)^2} \cdot R_c$$

La potencia alterna suministrada:

$$P_{ca} = (R_c + r_d) \cdot I^2 = \frac{V_o^2}{2 \, (R_c + r_d)^2} \cdot (R_c + r_d)$$

El rendimiento de este circuito:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{\dfrac{4 \cdot V_o^2}{\pi^2 \cdot (R_c + r_d)^2} \cdot R_c}{\dfrac{V_o^2}{2 \cdot (R_c + r_d)^2} \cdot (R_c + r_d)} = \frac{\dfrac{4 \cdot R_c}{\pi^2}}{\dfrac{R_c + r_d}{2}} = \frac{8 \cdot R_c}{\pi^2 \, (R_c + r_d)}$$

dividiendo numerador y denominador por R_c

$$\eta = \frac{0{,}812}{1 + \dfrac{r_d}{R_c}}$$

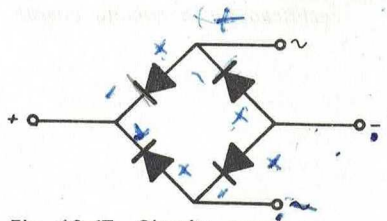


Fig. 13.47 Circuito puente.

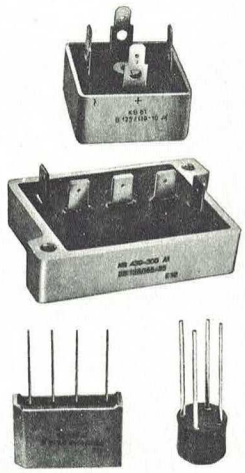


Fig. 13.48 Circuito puente (compacto).

13.19 **Puentes de rectificación**

Su nombre procede de la similitud que guardan estos circuitos (fig. 13.47) con los puentes de medida.

Por su economía, rigidez mecánica, gran rendimiento y ventaja de utilizar transformadores sin toma central, etc., han alcanzado un puesto importante en las aplicaciones industriales.

13.19.1 *Rectificador monofásico de onda completa o rectificador en puente*

El puente rectificador es un componente compacto (integrado) que encierra cuatro diodos (fig. 13.48).

Los primeros puentes rectificadores se construyeron a base de materiales semiconductores (óxido de cobre o selenio), montados sobre chapas de hierro.

Poniendo capas sucesivas, se consiguen los puentes deseados (fig. 13.48).

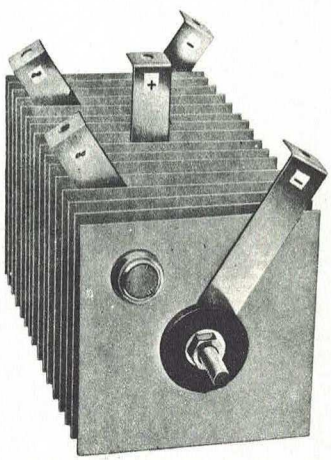


Fig. 13.49 Circuito puente con placas.

13.19.1.1 *Funcionamiento*

Véase cómo funciona un circuito rectificador con estos componentes, o también montado en serie-paralelo de diodo, según el esquema de la figura 13.49.

Sea el circuito de la figura 13.50. Cuando el punto *A* sea positivo respecto al *B*, el diodo D_1 queda polarizado directamente y conduce a través de la resistencia *R* y del diodo D_3 hasta el punto *B*, donde se cierra el circuito. Véase que los diodos D_2 y D_4 se polarizan inversamente.

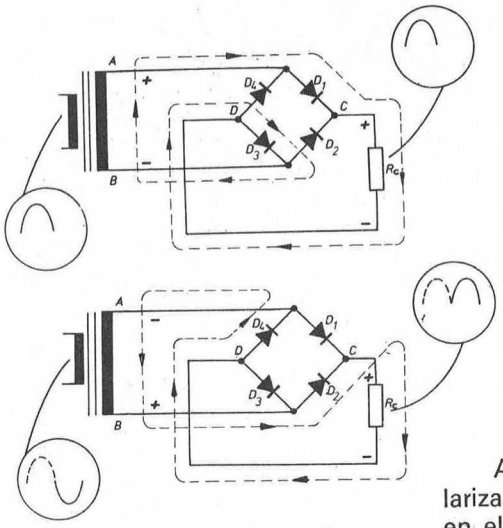


Fig. 13.50 Funcionamiento de un rectificador con circuito puente.

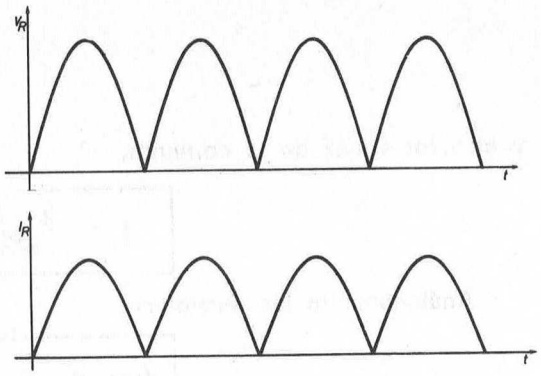


Fig. 13.51 Señal rectificada.

Análogamente, cuando A es negativo respecto de B, el diodo D_2 está polarizado en sentido directo a través de R y D_4. Con ello se consigue que, tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, fluya una corriente en el mismo sentido a través de R.

En bornes de la resistencia R se obtendrá la forma de onda de la figura 13.51.

13.19.1.2 *Valor de intensidad*

La corriente i_R que circula por la resistencia de carga será:

$$i_R = \frac{V_o}{2 \cdot r_d + R_c} \cdot \operatorname{sen} \omega t = I_o \cdot \operatorname{sen} \omega t \quad \text{, para} \quad \begin{cases} 0 < \omega t < \pi \\ \pi < \omega t < 2\pi \end{cases}$$

La corriente media por la resistencia de carga:

$$I_{med.} = \frac{2 \cdot V_o}{\pi \cdot (2 \cdot r_d + R_c)} = \frac{2 \cdot I_o}{\pi}$$

y el valor eficaz de la corriente:

$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

Análogamente las tensiones:

$$V_{med.} = \frac{2}{\pi} \cdot V_o$$

y en función del valor eficaz:

$$V_{med.} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \cdot V$$

13.19.1.3 *Valor de las potencias y del rendimiento*

La potencia de corriente continua suministrada a la carga valdrá:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = \frac{4 \cdot R_c}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{(R_c + 2 \cdot r_d)^2}$$

Siendo el valor de la potencia alterna suministrada:

$$P_{ca} = I^2 \cdot (2 \cdot r_d + R_c) = \frac{V_o^2}{2 \cdot r_d + R_c}$$

El rendimiento de este circuito:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{\dfrac{4 \cdot R_c}{\pi^2} \cdot \dfrac{V_o^2}{(R_c + 2 \cdot r_d)^2}}{\dfrac{V_o^2}{2 \cdot r_d + R_c}} = 0{,}8 \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{2 \cdot r_d}{R_c}}$$

13.19.2 *Rectificador trifásico de onda completa o rectificador trifásico en puente*

Generalmente, en las aplicaciones industriales, se utiliza la corriente eléctrica trifásica por razones de economía, de rendimiento y porque así la sirven las empresas suministradoras. De aquí nace la necesidad de tener grupos convertidores en corriente continua adaptados a estos sistemas trifásicos, siendo el que tratamos aquí el de mayores ventajas.

13.19.2.1 *Funcionamiento*

Se precisará para este montaje un transformador trifásico y seis diodos, conjunto que podrá conectarse de dos modos distintos según como se halle conectado el secundario del transformador.

En las figuras 13.52 y 13.53 se aprecian dos circuitos rectificadores trifásicos en puente conectados a los secundarios de dos transformadores, conectados, a su vez, en estrella y triángulo respectivamente.

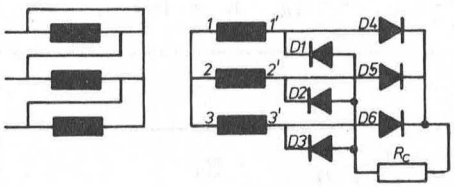


Fig. 13.52 Rectificador trifásico de onda completa o puente rectificador trifásico conectado a un transformador con secundario en estrella.

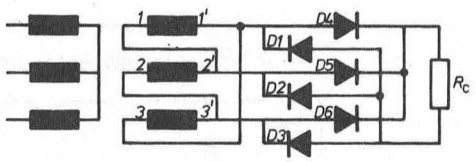


Fig. 13.53 Rectificador trifásico de onda completa o puente rectificador trifásico conectado a un transformador con secundario en triángulo.

El resultado de la rectificación será el mismo en uno y otro caso.

Atendiendo a la figura 12.52, cuando en el bobinado *1-1'* el punto *1'* sea positivo respecto al *1*, la corriente circulará por D_4, puesto que su ánodo es positivo, y no lo hará por D_1, cuyo cátodo es positivo. Unos instantes más tarde, cambiará la polaridad del devanado; entonces *1* será positivo y *1'* será negativo. La corriente ahora entrará en devanado proveniente del diodo D_1, y el diodo D_4 permanecerá bloqueado.

Por características de la corriente trifásica, lo expuesto aquí sucede en todos los devanados y diodos, pero con un pequeño desfase.

En la carga se obtendrá una tensión continua, cuya forma será la de la figura 13.54. En esta figura se aprecia cómo cada diodo permite el paso de la corriente en intervalos de 60°.

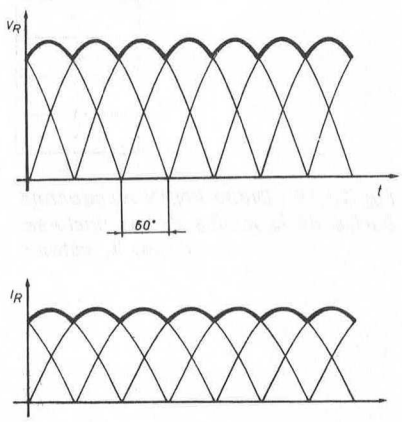


Fig. 13.54 Tensión de salida de puente rectificador trifásico.

13.19.2.2 *Valor de la intensidad*

La corriente rectificada que circula por la resistencia de carga será:

$$I_{med.} = \frac{6}{\pi} \cdot I_o \cdot \text{sen}\ \frac{180^o}{6} = I_o \cdot \frac{6}{\pi} \cdot \frac{1}{2} = 0{,}95 \cdot I_o$$

La corriente de pico rectificada valdrá:

$$I_o = \frac{V_o}{R_c + 2 \cdot r_d}$$

y la corriente eficaz:

$$I = I_o \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{6}{4\,\pi} \cdot \text{sen}\ \frac{2 \times 180^o}{6}}$$

$$= I_o \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{6}{4 \times 3{,}14} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = 0{,}91 \cdot I_o$$

Análogamente las tensiones:

$$V_{med.} = \frac{6}{\pi} \cdot V_o \cdot \text{sen}\ \frac{180^o}{6} = 0{,}95 \cdot V_o \qquad V = 0{,}91 \cdot V_o$$

13.19.2.3 *Valor de las potencias y rendimiento*

La potencia de corriente continua suministrada a la carga valdrá:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = \left(\frac{3}{\pi} \cdot I_o\right)^2 \cdot R_c = \left(\frac{3}{\pi} \cdot \frac{V_o}{R_c + 2 \cdot r_d}\right)^2 \cdot R_c$$

$$= \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{(R_c + 2 \cdot r_d)^2} \cdot R_c$$

Siendo el valor de la potencia alterna suministrada:

$$P_{ca} = I^2 \cdot (2 \cdot r_d + R_c) = \left(\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\ \pi} \cdot I_o}\right)^2 \cdot (2 \cdot r_d + R_c)$$

$$= \left(\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\ \pi}\right) \cdot \frac{V_o^2}{(2 \cdot r_d + R_c)^2} \cdot (2 \cdot r_d + R_c)$$

el rendimiento de este circuito:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{\frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{(2 \cdot r_d + R_c)^2} \cdot R_c}{\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\ \pi} \cdot \frac{V_o^2}{(2 \cdot r_d + R_c)^2} \cdot (2 \cdot r_d + R_c)}$$

$$= \frac{9}{\pi^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\ \pi}\right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r_d}{R_c}\right)}$$

$$= 0{,}998 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot r_d}{R_c}}$$

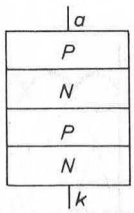


Fig. 13.55 Diodo PNPN o estructura básica de la familia de los tiristores: a, *ánodo;* k, *cátodo.*

13.20 Tiristores

Se construyen con la unión de cuatro cristales, dos de tipo P y dos de tipo N, formando la estructura de la figura 13.55.

En la mayoría de los tratados se estudia primero el diodo PNPN (fig. 13.55), para luego pasar al estudio del tiristor (thyristor).

Se considera más conveniente llamar tiristor a este diodo puesto que, a partir de él, salen una serie de componentes, básicamente de la misma estructura, pero con diferentes funcionamientos. De esta forma, se da un nombre genérico a una gran familia de tiristores.

13.20.1 *Fundamentos*

Véase cómo funciona la estructura básica de esta familia. Para ello se monta el circuito de la figura 13.56 (obsérvese el esquema puesto al lado de la estructura). Si se hace variar la tensión E de la pila, se verá que la corriente va aumentando muy poco. Hay que tener en cuenta que el diodo D_2 está polarizado inversamente y, por tanto, la corriente que mida el amperímetro será muy próxima a la corriente inversa de D_2, ya que D_1 y D_3, al encontrarse polarizados directamente, provocarán una pequeña caída de tensión, casi despreciable, tramo OA del gráfico (fig. 13.56).

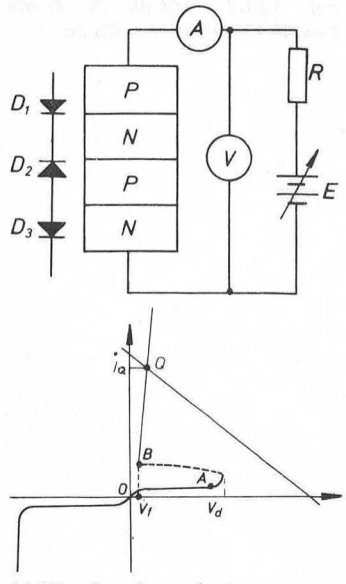


Fig. 13.56 Funcionamiento y característica de un tiristor.

Si se sigue aumentando la tensión V, se ve que, una vez sobrepasada en cierto valor V_d (tensión de disparo), la corriente se desplaza a un valor I_o, que es la intersección de la recta de carga debida a R y la característica de disparo. Este fenómeno ya ocurrió cuando se estudiaban los diodos de gas.

Nótese que, cuando D_1 llega a su tensión de avalancha, la corriente en esa unión ya no es función de la tensión aplicada, por lo que la tensión sobre el tiristor decrece, hasta hacerse igual a la caída de tensión de los diodos D_1 y D_3, punto B.

Si se invierte la pila E, tanto D_1 como D_3 se encuentran polarizados inver-

samente, y D_2 queda en sentido directo, con lo que esta polarización prácticamente es idéntica a la de un diodo.

13.20.2 *Clasificación de los tiristores*

Se desarrollan un sinfín de variantes de esta estructura. Estudiamos, a continuación, las siguientes:

— SCR.
— Diac.
— Triac.

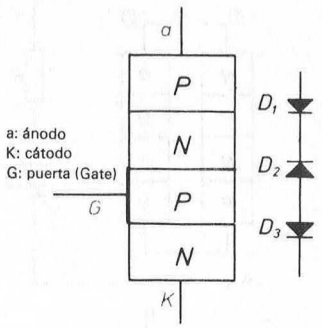


Fig. 13.57 Estructura del SCR.

13.20.2.1 *Rectificador controlado de silicio (SCR)*

Este dispositivo es el que se denomina simplemente tiristor; obsérvese, en la figura 13.57, cómo la estructura del SCR es la misma del diodo PNPN, que se ha dado en llamar familia de tiristores.

También puede verse cómo en la región P central se tiene conectado un nuevo terminal, llamado puerta *G, (Gate),* que es la modificación introducida.

Lo que se pretendió, al desarrollar este componente, fue que la tensión de disparo V_d fuese menor.

1.º *Fundamentos.* Si se inyectan portadores de carga en la zona P (huecos, por tanto) la zona de difusión de D_2 se reducirá y, como consecuencia, también se reducirá la tensión de disparo V_d (fig. 13.58).

Cuanto mayor es la corriente i_g, menor será la tensión de disparo, ya que se introducen mayor cantidad de portadores en relación al tiempo.

$$i_g = \frac{Q}{t}$$

siendo Q la carga introducida.

Además, una vez obtenido el disparo del mismo, ya no es necesario que se mantenga i_g, puesto que la corriente ánodo-cátodo (I) es independiente; nótese que, además, no sólo no es necesario, sino que es peligroso mantenerla, pues por la unión de D_3 pasaría $i_g + 1$, que podría destruir la unión. Por lo que, una vez conseguido el disparo, es necesario abrir el interruptor S.

Por lo general, i_g se consigue mediante la sustitución de E_{GG} por un generador de impulsos de tensión.

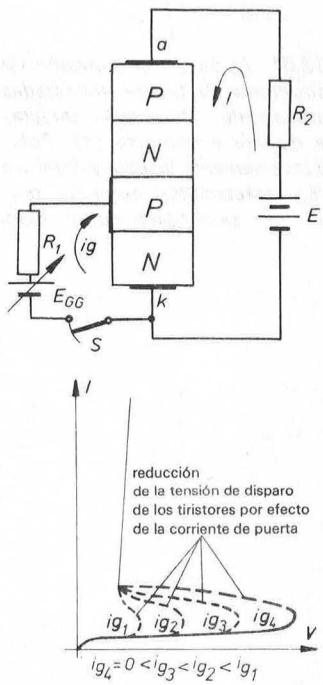


Fig. 13.58 Característica de un tiristor en función de la corriente de disparo.

2.º *Aplicaciones.* El rectificador controlado de silicio (SCR) se utiliza para la rectificación de grandes potencias. La corriente I es del orden de 100 A o más. En la figura 13.59 pueden observarse algunos tiristores y su símbolo.

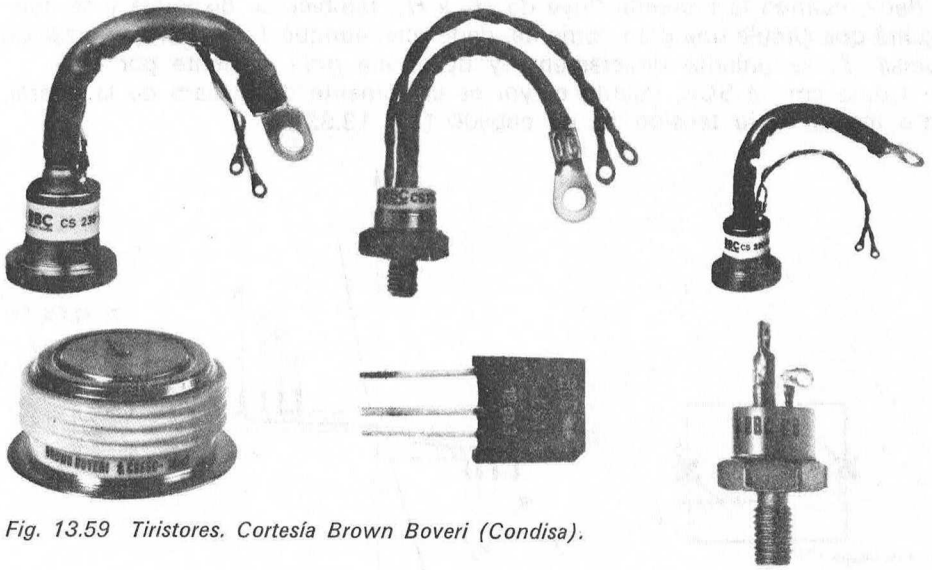


Fig. 13.59 Tiristores. Cortesía Brown Boveri (Condisa).

13.20.2.2 *Diac (diodo alternativo de corriente)*

Otra estructura, derivada de la familia de los tiristores, la constituye el diac (fig. 13.60).

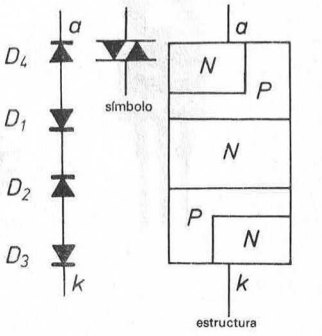


Fig. 13.60 Estructura y símbolo del diac.

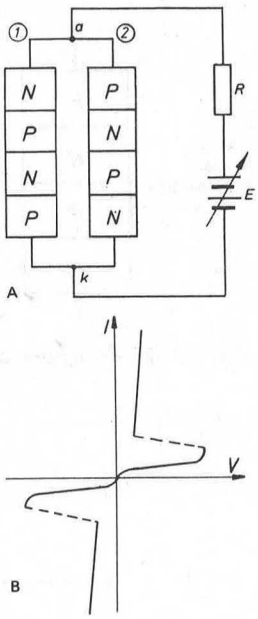


Fig. 13.61 A, diac *con conexión de las estructuras de tiristor conectadas en antiparalelo. Polarizado directamente dispara y conduce (1). Polarizado inversamente dispara y conduce (2);* B, *característica corriente tensión típica de un diac.*

Aunque no del todo correctamente, puede decirse que el diac es como dos estructuras de tiristor conectadas en antiparalelo (fig. 13.61A).

1.º *Fundamentos.* Para ver cómo funciona, basta fijarse en la figura anterior. Si se polariza directamente (a +, K −), al variar *E*, se llega a producir la tensión de disparo en (1) y, como consecuencia, su característica es idéntica a la del tiristor (1); si, por el contrario, se polariza negativamente (a−, K+), se produce la tensión de disparo (2) y su característica es idéntica a la anterior, pero invertida (fig. 13.61B).

2.º *Aplicaciones.* El diac, cuyo símbolo se puede observar en la figura 13.60, se utiliza en algunos circuitos para proporcionar los impulsos que abran al triac (fig. 13.62).

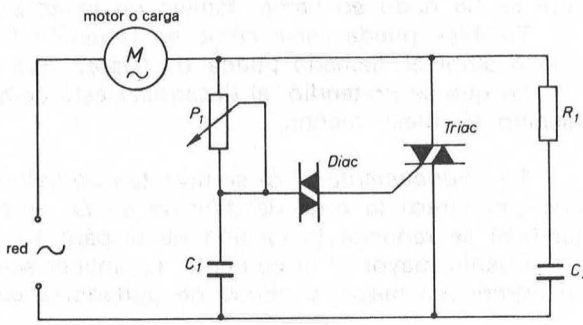


Fig. 13.62 Circuito de utilización diac para control de un triac.

13.20.2.3 *Triac (triodo alternativo de corriente)*

El triac es un componente semiconductor similar al diac, pero que consta de una puerta para controlar la tensión de disparo, tanto en sentido positivo como negativo.

También se conoce a este componente como tiristor bidireccional, ya que se puede suponer como dos SCR conectados en antiparalelo (fig. 13.63A).

1.º *Fundamentos.* De la misma forma que el *tiristor o SCR,* el *triac,* una vez disparado el impulso que excita la puerta, conduce en un sentido hasta que la tensión decrece por debajo de 1 V (la menor tensión de funcionamiento V_f); y no vuelve a conducir mientras no llegue un nuevo impulso que lo vuelva a disparar.

Obsérvese que, si dicho impulso llega en la polarización inversa del triac, es decir, cuando la corriente fluye de H_2 a H_1, también se disparará y se conseguirá que circule una gran corriente, dado que, aunque T_2 esté en polarización inversa, T_1 se polariza directamente y fluye una gran corriente por él.

Como con el SCR, cuanto mayor es la corriente de disparo de la puerta, tanto menor es la tensión V_d de cebado (fig. 13.63B).

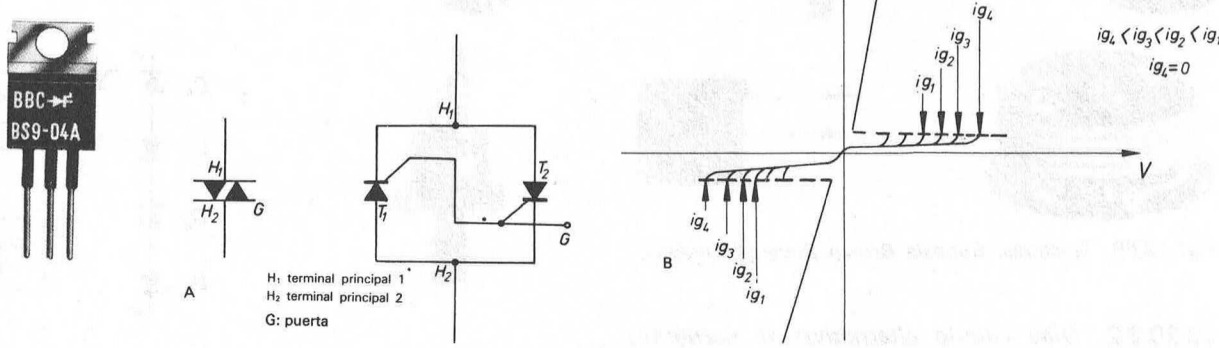


Fig. 13.63 A, *triac con conexión de los SCR en antiparalelo. Símbolo y fotografía;* B, *gráfica corriente/tensión del triac.*

2.º *Aplicaciones.* Por la propiedad de circular corriente en los dos sentidos, se utiliza como interruptor de máquinas de corriente alterna gobernadas electrónicamente. El circuito electrónico de mando le genera los impulsos de disparo, los cuales se aplican a la puerta, con lo que dejará pasar la *c. a.*, siempre que el circuito le mande los impulsos. Cuando no lo haga, se comportará como un circuito abierto. En la figura 13.64 se ve el circuito de mando de un motor con *triac* gobernado por un circuito integrado.

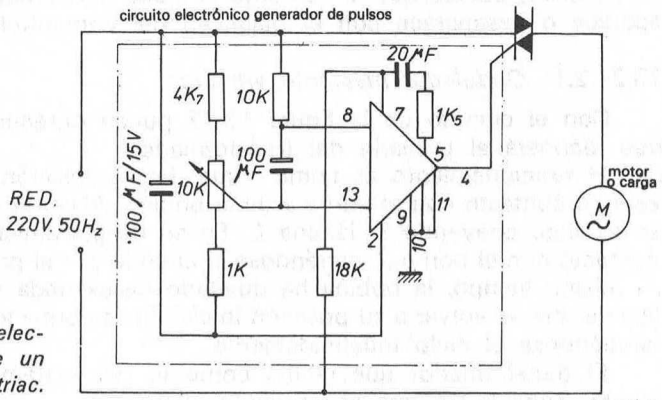


Fig. 13.64 Circuito electrónico de mando de un triac.

13.21 **Onduladores**

Los dispositivos destinados a la obtención de corriente alterna a partir de corriente continua reciben el nombre de *onduladores.*

Para conseguir este propósito, los circuitos generalmente se basan en válvulas de gas y en transistores, pero sobre todo en tiristores, que proporcionan mayor rendimiento, mayor duración y más seguridad.

Por todo ello, en este apartado será a los onduladores con tiristores a los que más importancia se les dará.

13.21.1 *Clasificación*

Pueden agruparse del siguiente modo:

— Onduladores no autónomos

— Onduladores autónomos { Controlados. / Autooscilantes.

13.21.1.1 *No autónomos*

Trabajan acoplados a una fuente de tensión alterna ajena a ellos, que al mismo tiempo les marca la frecuencia de salida y la fase, que será la misma que la de la fuente.

13.21.1.2 *Autónomos controlados*

Por trabajar sin alimentarse de red alterna alguna, reciben el nombre de autónomos. Claro está que ellos marcan su frecuencia y fase en la salida.

Además son controlados, por recibir impulsos de un circuito complementario llamado oscilador o de la red, que es el que controla los tiristores.

13.21.1.3 *Autónomos autooscilantes*

Los impulsos de mando para los tiristores los reciben del circuito de utilización.

13.21.2 *Principio de funcionamiento*

La idea del funcionamiento podrá obtenerse a partir de la figura 13.65.

Estando el conmutador en la posición *A*, la corriente eléctrica circulará por la resistencia de carga en el sentido indicado por la flecha de línea continua.

Pasando el conmutador a la posición *B*, la corriente hará el recorrido indicado por la flecha de línea de trazos.

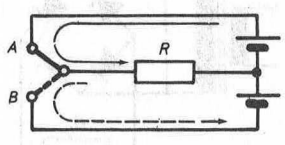


Fig. 13.65 Ondulador electromecánico.

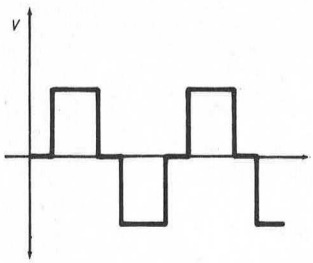


Fig. 13.66 Tensión en bornes de la resistencia de carga.

Haciendo que el conmutador cambie de posición con rapidez, la resistencia de carga recibirá la corriente por un extremo distinto en cada cambio, pudiéndose asegurar que esto es corriente alterna.

La frecuencia dependerá de la velocidad con que el conmutador cambie de posición, y desde luego se obtendría una corriente alterna pero no senoidal (fig. 13.66), ya que mientras el conmutador está sin tocar uno u otro borne, no circula corriente por *R*, consiguiéndose variaciones perpendiculares al eje de abscisas, puesto que la corriente ni crece ni decrece gradualmente, sino que aparece o desaparece con el balanceo del conmutador.

13.21.2.1 *Ondulador mediante vibrador*

Con el circuito de la figura 13.67 puede obtenerse una corriente alterna que recogerá el primario del transformador.

El funcionamiento es como sigue. En la posición de reposo, la lámina *L* está en contacto con el borne *a* de la bobina. Al cerrar el interruptor *I*, la bobina se excitará atrayendo la lámina *L*. En su desplazamiento, la lámina ha hecho contacto con el borne *2*, cerrándose el circuito por el primario del transformador. Al mismo tiempo, la bobina ha quedado desexcitada y ha dejado de atraer la lámina que, al volver a su posición inicial, hace contacto con el borne *1* y con *a*, repitiéndose el ciclo indefinidamente.

El transformador que recibe corriente por extremos opuestos alternativamente, considerará que es corriente alterna.

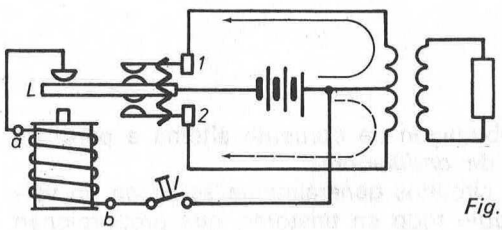


Fig. 13.67 Vibrador.

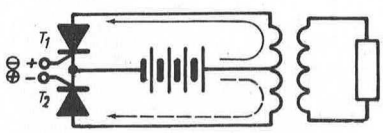


Fig. 13.68 Ondulador mediante vibrador a tiristores.

13.21.3 *Ondulador mediante vibrador de tiristores*

Disponiendo del circuito de la figura 13.68, al introducir una señal que polarice positivamente la puerta de T_1 el tiristor conducirá, y la corriente hará el recorrido indicado por la flecha de trazo continuo. T_2 permanece bloqueado.

Invirtiendo las polaridades, conducirá T_2; T_1 quedará bloqueado, y el recorrido de la corriente será el indicado por la flecha de trazos.

El transformador será recorrido por una corriente que circulará alternativamente en sentidos opuestos y cuya frecuencia dependerá de la velocidad con que sean aplicados los impulsos.

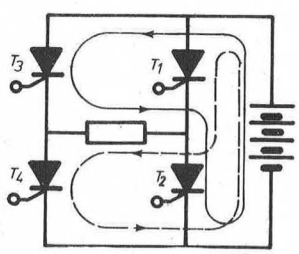


Fig. 13.69 Ondulador en puente.

13.21.4 *Ondulador en puente*

En el circuito de la figura 13.69, al polarizar adecuadamente los tiristores, se conseguirá que conduzcan T_3 y T_2; permanecerán bloqueados T_4 y T_1; y el recorrido de la corriente será el indicado por la flecha de trazo continuo.

Cambiando las polaridades, conducirán T_4 y T_1 y permanecerán bloqueados T_3 y T_2; el recorrido de la corriente será ahora, el de la flecha de trazos.

13.21.5 *Generalidades*

Hay infinidad de circuitos que llevan a los mismos resultados ya descritos y simplemente se nombran algunos aquí para conocimiento general:

- — Ondulador reversible. Actúa con rectificador u ondulador.
- — Ondulador en cascada. Utiliza dos baterías y dos tiristores.
- — Onduladores trifásicos en estrella.
- — Onduladores trifásicos en puente.

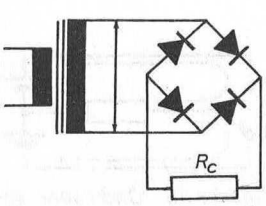


Fig. 13.70 Rectificador en puente.

Ejemplos prácticos

A un circuito rectificador en puente como el de la figura 13.70 se le aplica una tensión en sus bornes de entrada, con valor eficaz de 220. Calcular: 1.º, el valor de la tensión media en la carga; 2.º, la intensidad media que circula por la carga; 3.º, intensidad media que suministrara cada uno de los diodos cuando se hallen en polarización directa.

La resistencia de carga tiene un valor de 100 Ω.

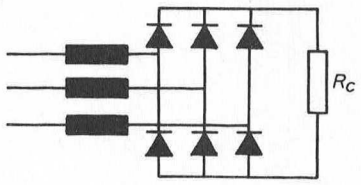


Fig. 13.71 Rectificador trifásico en puente.

1.º $V_{med.} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \cdot V = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times 220 = 198$ V

2.º $I_{med.} = \frac{V_{med.}}{R_c} = \frac{198}{100} = 1{,}98$ A

3.º $I_{F1} = I_{F2} = \frac{I_F}{2} = \frac{1{,}92}{2} = 0{,}99$ A

El circuito rectificador trifásico en puente de la figura 13.71 está alimentado mediante una tensión alterna cuyo valor eficaz es de 220 V. La resistencia de carga tiene un valor de 25 Ω. Calcular: 1.º, la tensión media en la carga; 2.º, la intensidad media que circula por la carga; 3.º, la potencia continua en la carga; 4.º, el rendimiento.

1.º $V_{med.} = 1{,}04 \cdot V = 1{,}04 \times 220 = 229{,}5$ V

2.º $I_{med.} = \frac{V_{med.}}{R_c} = \frac{229}{25} = 9{,}18$ A

3.º $P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = R_c \cdot \left(\frac{3}{\pi} \cdot I_o\right)^2 = \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{R_c^2 + 2\,R_F} \cdot R_c$.

Al ser $V_o = \frac{V_{med.}}{0{,}95} = \frac{229{,}5}{0{,}95} = 241$ V, suponiendo despreciable la resistencia directa de los diodos, y sustituyendo, resulta:

$$P_{cc} = \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{241^2}{25^2} \cdot 25 = 211{,}39 \text{ W}$$

4.º $\eta = 0{,}998 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\,R_F}{R_c}} \approx 0{,}998 \cdot \frac{1}{1} = 0{,}998$

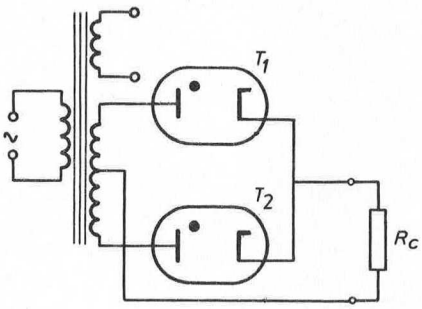


Fig. 13.72 Rectificador de onda completa mediante diodos de gas.

Se han empleado dos diodos de gas conectados como se ve en la figura 13.72, los cuales tienen una tensión de cebado de 17,5 V y la de arco son 12 V. Se desea que por la carga circule una intensidad media máxima de 3,5 A. Si se obtiene una tensión de 2 300 V de tensión eficaz entre cada bobinado del secundario, calcular: 1.º, la tensión media en la carga; 2.º, la resistencia de carga mínima que deberá colocarse en el circuito sin peligro de cortocircuito; 3.º, tensión de pico que soportará cada diodo; 4.º, la potencia continua máxima obtenida.

1.º $V_o = \sqrt{2} \times 2\,300 = 3\,252{,}6$ V

$$V_{med.} = \frac{2 \cdot V_o}{\pi} - V_{arc} = \frac{2 \times 3\,252{,}6}{\pi} - 12 = 1\,023{,}8 \text{ V}$$

2.º $R_c = \frac{V_{med.}}{I_{med.}} = \frac{1\,023{,}8}{3{,}5} = 292{,}51\ \Omega$

3.º La tensión inversa a la que se someterá a cada diodo será doble de la que existe en cada salida del secundario del transformador:

$$2 \cdot V_o = 2 \times 3\,252{,}6 = 6\,505{,}2 \text{ V}$$

4.º $P_{cc} = I_{med.}^2 \cdot R_c = 3{,}5 \times 292{,}51 = 1\,023{,}78$ W

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Montar los circuitos rectificadores y onduladores descritos en el tema y comprobar lo dicho en las descripciones precedentes. Realizar un trabajo teórico-práctico.

— Realícese un trabajo teórico sobre aplicaciones industriales concretas, en las que intervengan un rectificador y un ondulador.

CUESTIONARIO

13.1 ¿Qué es necesario para poner en funcionamiento un rectificador de mercurio?

13.2 Explicar las ventajas de los rectificadores de vapor de mercurio de ampolla metálica, frente a los de ampolla de vidrio.

13.3 ¿Qué diferencias hay en el funcionamiento entre el ánodo de encendido de las válvulas de vapor de mercurio y el ignitor de los ignitrones?

13.4 ¿Cuándo se produce el descebado del ignitrón?

13.5 ¿Para qué sirve la R_g conectada en la rejilla del tiratrón?

13.6 Polarizando con corriente continua la rejilla de mando del tiratrón, ¿entre qué ángulos podemos controlar el tiratrón?

13.7 El control mediante corriente alterna superpuesta a una corriente continua, ¿qué nombre recibe?

13.8 Cuáles son las diferencias, en cuanto a características se refiere, entre el diodo de silicio y germanio.

13.9 Un rectificador de media onda utiliza un diodo de gas que puede suministrar a la carga de 2K7, una intensidad media máxima de 0,5 A, estando conectado a una fuente de corriente alterna que da una tensión en bornes de 1 200 V. La tensión de arco es de 12 V y la de cebado de 18,5 V. Se desea averiguar: 1.º, la tensión media en la carga; 2.º, la intensidad eficaz suministrada por la fuente de corriente alterna.

13.10 Un rectificador en puente trifásico, cuya tensión eficaz aplicada es de 425 V, tiene conectada una carga de 60 Ω. Calcular: 1.º, tensión media en la carga; 2.º, intensidad media que circula por la carga; 3.º, potencia continua en la carga; 4.º, intensidad que circulará por cada rectificador polarizado directamente; 5.º, tensión inversa que soportarán los diodos.

BIBLIOGRAFIA

Revistas *Fagor Electrotécnica* S. C. I.

LECLERCQ GUY A., *Transistores y semiconductores industriales,* Marcombo, S. A., Barcelona 1975.

BERGTOLD, *Circuitos con triacs, diacs y tiristores,* Gustavo Gili, Barcelona 1974.

Transformadores convertidores, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1974.

Tema 14

Dispositivos de regulación y control de las características de un generador de corriente continua

OBJETIVOS

— *Introducir el lenguaje más elemental utilizado en la automatización.*
— *Justificar la necesidad del regulador de tensión en un generador.*
— *Describir la función de un reóstato de regulación.*
— *Calcular un regulador de tensión por método teórico.*
— *Calcular un regulador de tensión a partir de las curvas características.*
— *Calcular un regulador de corriente a partir de las curvas características.*
— *Describir el funcionamiento de un regulador automático.*
— *Reconocer la enorme importancia de los componentes electrónicos y transductores en la automatización de las máquinas eléctricas de c. c.*

GUION

— Generalidades.
— Reóstatos de campo.
— Cálculo teórico del regulador de tensión.
— Cálculo del regulador de tensión por el método de la característica.
— Cálculo del regulador de corriente.
— Regulador automático de tensión.
— Sistemas automáticos de regulación. Regulación de tensión por control electrónico.

PUNTOS CLAVE

— Mantener constante la tensión que suministra un generador para cualquier carga.
— Utilizar las curvas características para el cálculo de los reguladores de tensión e intensidad.
— Citar los componentes que intervienen en un servomecanismo de ciclo cerrado.

EXPOSICION DEL TEMA

En los últimos tiempos el avance técnico, en general, ha sido considerable siendo uno de los factores que más ha contribuido al proceso de la *automatización.*

En la sección de máquinas de c. c., el proceso de automatización ha sido fundamental en el mando y control de motores, haciendo resurgir de nuevo el clásico motor, que había sido sustituido hacía algún tiempo por el motor de c. a.

Actualmente, la máquina de c. c. como generador tiene aplicaciones muy limitadas, entre otras razones, por haber sido reemplazada ventajosamente por el *rectificador controlado de silicio* (SCR), también conocido por *tiristor.* (Ver Tema 13.)

A continuación, se dan unas brevísimas nociones sobre automatización, como son las definiciones de los términos de aplicación a las máquinas de c. c.:

Control. Se refiere al mando, gobierno, regulación, etc., de las características del generador o motor.

Regulador automático. Es un conjunto de dispositivos que actúan para mantener constante una magnitud (tensión, corriente, velocidad, etc.), cuando intervienen agentes externos que tienden a modificar su valor.

Servomecanismo. Conjunto de elementos cuya función es la de controlar una magnitud determinada. Las cualidades que han de reunir los elementos son: poco consumo, gran precisión y rapidez.

Control manual. Intervención del hombre durante la marcha del generador o motor.

Control automático. La intervención del hombre se limita a la conexión de la máquina. En algunas aplicaciones, incluso la conexión se realiza automáticamente.

Control de anillo o ciclo cerrado. Significa que la salida *puede modificar el valor de la entrada* con el fin de no sufrir las variaciones que introducirían las perturbaciones (la salida se refleja a la entrada). Esto se obtiene remitiendo a la entrada una señal de error capaz de influir sobre la misma entrada para compensar el error.

14.1 Generalidades

Al estudiar las características de los *generadores* en servicio, se apreciaba la variación en la tensión, al pasar de la marcha en vacío a la de plena carga, con el consiguiente perjuicio para el funcionamiento de los receptores. Cuando el receptor ha de funcionar con una tensión rigurosamente constante, será necesario controlar las variables del generador y, por ello, necesitará de los *reóstatos* de campo llamados *reguladores de tensión.* Si es la intensidad la que ha de permanecer constante, se denominan *reguladores de corriente.*

El funcionamiento del motor de c. c. también viene dado por sus características electromecánicas, siendo necesario introducir *resistencias variables;* en los circuitos de excitación e inducido para evitar arranques peligrosos, modificar la velocidad, etc.

El funcionamiento de los reóstatos en los circuitos eléctricos de las máquinas de c. c. puede conseguirse de forma manual o automática, aunque en la totalidad de las aplicaciones industriales se realiza *automáticamente.*

Actualmente, están sustituyéndose los reóstatos por reguladores automáticos controlados por dispositivos electrónicos.

Los reóstatos para el *circuito de carga* tienen aplicación en los ensayos de generadores, ya que sustituyen ventajosamente a los receptores. También pueden ser utilizados en serie con el inducido de los motores, como sistema variador de la velocidad.

El presente tema se dedicará al control y regulación del generador, y el siguiente corresponderá al control y regulación del motor de c. c.

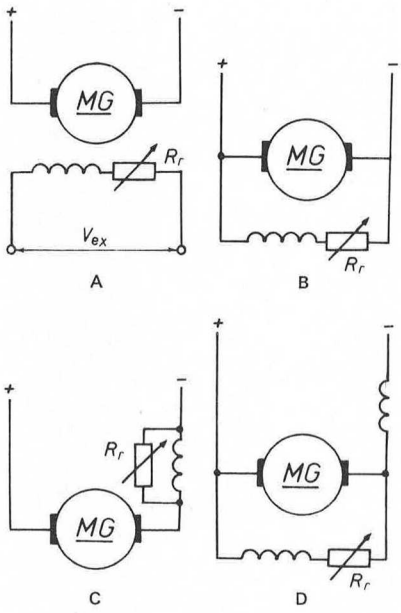


Fig. 14.1 Conexión del reóstato de campo en las máquinas de c. c.: A, *de excitación independiente;* B, *de excitación en derivación;* C, *de excitación en serie;* D, *de excitación compound.*

14.2 Reóstatos de campo

Los reóstatos de campo se intercalan en serie o en derivación, con el devanado inductor, a fin de *modificar el flujo inductor* de una máquina de c. c.

Como norma general, el reóstato de excitación se conecta en serie con el devanado inductor en las máquinas derivación e independiente, y en paralelo en la máquina serie (fig. 14.1).

14.2.1 *Reóstatos de campo en serie con el devanado inductor*

En las máquinas con excitación independiente y derivación, la resistencia del devanado inductor es elevada, por lo que también habrá de serlo la resistencia del reóstato, a fin de conseguir un gran margen de regulación en la corriente de excitación.

Ejercicio de aplicación

La resistencia del devanado de excitación de una máquina derivación es de 100 Ω y, al conectarse a una tensión constante (V), circulará la corriente máxima de excitación $I_{máx.}$.

Determinar la resistencia del reóstato que ha de conectarse en serie con R_d para que circule una corriente de excitación del 15 % de $I_{máx.}$.

Solución:

Según el esquema representado en la figura 14.2, el valor de $I_{ex.}$ dependerá de la resistencia total del circuito, y viene dado por la expresión:

$$I_{ex.} = \frac{V}{R_d + R_r}$$

El valor máximo de corriente se obtiene cuando se ha eliminado la resistencia R_r:

$$I_{máx.} = \frac{V}{R_d} = \frac{V}{100}$$

Para que circule una intensidad del 0,15 × $I_{máx.}$, es necesaria una resistencia mayor:

$$0{,}15 \times I_{máx.} = \frac{V}{R_d + R_r} = \frac{V}{100 + R_r}$$

Dividiendo las dos expresiones:

$$\frac{I_{máx.}}{0{,}15 \times I_{máx.}} = \frac{100 + R_r}{100}$$

de donde:

$$\boxed{R_r = 566{,}6\ \Omega}$$

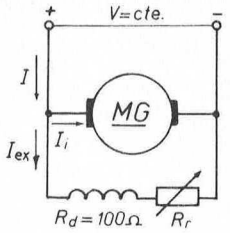


Fig. 14.2 Ejercicio de aplicación sobre máquina con excitación en derivación.

14.2.2 *Reóstatos de campo en derivación con el campo inductor*

En las máquinas con excitación serie, la resistencia del devanado de campo es de un valor mínimo, por lo que también habrán de serlo las resistencias desviadoras de la corriente. Además, las resistencias desviadoras estarán previstas para soportar el paso de fuertes intensidades.

Ejercicio de aplicación

La resistencia del devanado serie de un generador de c. c. es de 0,05 Ω. Determinar la resistencia R_r a conectar en derivación, que permita conseguir una variación del 30 % en el flujo inductor. Suponer que el generador no está saturado.

Solución:

Al no haber saturación, existirá proporcionalidad entre el flujo y la corriente que lo produce.

Para cualquier valor que tome la corriente absorbida por el generador, se cumplirá (figura 14.3):

$$R_s \cdot I_s = R_r \cdot I_r; \quad 0{,}05 \times I_s = R_r \cdot I_r$$

Para conseguir una variación de flujo, habrá de desviarse una parte de la corriente que, en este caso, será del 30 %; así:

$$I_r = \frac{30}{100} \times I_s$$

Así, pues:

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}05 \times I_s = R_r \cdot I_r \\ I_r = \dfrac{30}{100} \times I_s \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} 0{,}05 \times I_s = R_r \times 0{,}3 \times I_s \\ R_r = \dfrac{0{,}05 \times I_s}{0{,}3 \times I_s} = 0{,}166\ \Omega \end{array}$$

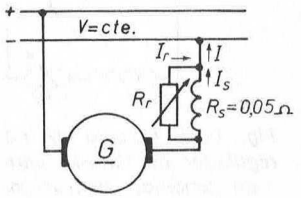


Fig. 14.3 Ejercicio de aplicación sobre un motor con excitación serie.

14.3 Cálculo teórico del regulador de tensión

Cualquier generador, para mantener la tensión de salida constante, necesita actuar sobre el flujo o la velocidad, ya que la expresión de la f. e. m. es:

$$\boxed{E = K \cdot N \cdot \Phi}$$

Normalmente, la velocidad del generador permanece constante, por lo que habrá de modificarse el *flujo inductor* para conseguir la constancia en la tensión en bornes.

El cálculo del reóstato se limitará a determinar el número de pasos y la resistencia de cada uno; por ejemplo, el representado en la figura 14.4 dispone de diez pasos.

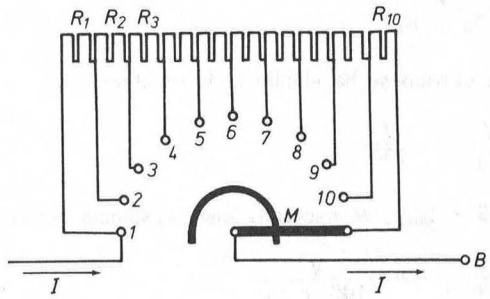


Fig. 14.4 Reóstato para regulación del circuito de excitación.

14.3.1 *Cálculo teórico del reóstato en el generador derivación*

El cálculo del reóstato se hace directamente a través de un ejercicio de aplicación para facilitar su comprensión. El sistema seguido puede utilizarse para el generador independiente, e incluso en el compound, ya que en este último sólo se actúa sobre la excitación derivación.

Ejercicio de aplicación

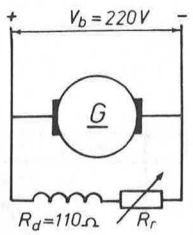


Fig. 14.5 Cálculo de un regulador de tensión para un generador derivación.

Un generador derivación produce una tensión de 220 V a plena carga, siendo la resistencia del devanado de campo de 110 Ω. Para mantener la tensión de salida constante, se conecta un reóstato de 10 pasos en serie con el devanado de excitación, que se intercalará en el circuito cuando disminuya la carga. Hallar:

1.º La resistencia de cada paso del reóstato, teniendo en cuenta que cada paso admite cambios iguales en la corriente de excitación, y que la regulación de excitación necesaria es del 50 %.

2.º Las pérdidas Joule que se producirán en el reóstato, cuando estén intercalados todos los pasos.

Solución:

1.º A plena carga, el reóstato está eliminado, por lo que circulará la corriente de excitación máxima (fig. 14.5):

$$I_{ex.\,(máx.)} = \frac{V_b}{R_d} = \frac{220}{110} = 2\ A$$

Al disminuir la carga, será necesario disminuir la intensidad de excitación y para ello se intercalará, en serie con R_d, un reóstato similar al representado en la figura 14.4.

Al haber 10 pasos, la variación de intensidad que corresponde a cada paso será:

$$\Delta I = \frac{I_{ex.\,(máx.)} - I_{ex.\,(mín.)}}{\text{n.º de pasos}}$$

La mínima corriente es el 50 % de $I_{máx.}$, por lo que, al sustituirla en la expresión anterior, quedará:

$$\Delta I = \frac{2 - 1}{10} = 0{,}1\ A$$

Al intercalar el 1.er paso del reóstato, la maneta hará contacto con el plot n.º 2; la resistencia del circuito de excitación será:

$$R_d + R_1 = \frac{V_b}{I_{ex.1}} = \frac{220}{2 - 0{,}1} = 115{,}78\ \Omega$$

De donde:

$$R_1 = 115{,}78 - R_d = 115{,}78 - 110 = \boxed{5{,}78\ \Omega}$$

Al intercalar el 2.º paso (contacto n.º 3), sería:

$$(R_d + R_1) + R_2 = \frac{V_b}{I_{ex.2}} = \frac{220}{2 - 0{,}2} = 122{,}22\ \Omega$$

$$R_2 = 122{,}22 - 115{,}78 = \boxed{6{,}43\ \Omega}$$

Los restantes valores se obtendrían de forma similar, y los resultados serían: $R_3 = 7{,}18\ \Omega$; $R_4 = 8{,}08\ \Omega$; $R_5 = 9{,}16\ \Omega$; $R_6 = 10{,}47\ \Omega$; $R_7 = 12{,}08\ \Omega$; $R_8 = 14{,}1\ \Omega$; $R_9 = 16{,}66\ \Omega$.
El cálculo del último paso sería:

$$R_{10} = \frac{220}{1} - \frac{220}{1{,}1} = 20\ \Omega$$

Comprobación:

$$I_{ex.\,(mín.)} = 1\ A = \frac{V}{R_d + R} = \frac{220}{110 + R}$$

de donde:

$$\boxed{R = 110\ \Omega}$$

siendo:

R = resistencia total del reóstato

La suma de las 10 resistencias del reóstato ha de coincidir con *R*:

$$R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_{10} = 5{,}78 + 6{,}43 + 7{,}18 + \ldots + 20 = 110\ \Omega$$

2.º Las pérdidas Joule que se producen al estar intercaladas las 10 resistencias del reóstato se obtienen aplicando la ley de Joule, con la intensidad de excitación mínima:

$$P_{Rr} = R \cdot I_{mín.}^2 = 110 \times 1^2 = 110\ W$$

14.3.2 *Cálculo teórico del regulador de tensión en el generador serie*

Aunque este generador se utiliza, como tal, muy poco, se desarrolla un ejercicio similar al del generador derivación para completar el cálculo de los reguladores de tensión clásicos.

Ejercicio de aplicación

Un generador serie de $R_s = 0{,}05\ \Omega$, alimenta una carga a 100 V con un consumo que varía desde 5 kW a 13 kW. Para mantener la tensión constante, se dispone un reóstato de 8 pasos en paralelo con el devanado de campo. Suponiendo que el paso de la carga mínima a la máxima se realice con variaciones idénticas de corriente, determinar:

1.º La resistencia de cada paso del reóstato, teniendo en cuenta que para una carga de 50 A el reóstato está abierto, y que a partir de 50 A, la corriente que ha de desviarse es el: 10 %, 18 %, 25 %, 29 %, 33 %, 36 %, 38 % y 0 %, de la que circule por la carga, en orden creciente de potencia de salida.

2.º Hallar las pérdidas Joule en el circuito de excitación, cuando el generador suministra la mínima y máxima potencias.

Solución:

1.º La corriente absorbida por la carga se obtiene a partir de las potencias:

$$I_{mín.} = \frac{P_{mín.}}{V_b} = \frac{5\,000}{100} = 50\ A$$

$$I_{máx.} = \frac{P_{máx.}}{V_b} = \frac{13\,000}{100} = 130\ A$$

La variación de intensidad que corresponde a cada paso será:

$$\Delta I = \frac{I_{máx.} - I_{mín.}}{\text{n.º de pasos}} = \frac{130 - 50}{8} = 10\ A$$

Al circular I = 50 A, el reóstato está eliminado.

Al circular $I_1 = 60$ A, se desviará por el reóstato el 10 % de 60 A (fig. 14.6), y aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$I_1 = 60 \text{ A} = I_{s1} + I_{r1}$$

$$I_{r1} = \frac{10}{100} \times I_1 = 0{,}1 \times 60 = 6 \text{ A}$$

por tanto:

$$I_{s1} = 60 - 6 = 54 \text{ A}$$

$$R_s \cdot I_{s1} = R_{r1} \cdot I_{r1}$$

$$R_{r1} = \frac{R_s \cdot I_{s1}}{I_{r1}} = \frac{0{,}05 \times 54}{6} = \boxed{0{,}45\ \Omega}$$

siendo R_{r1} el valor de la resistencia total del reóstato.
Al circular $I_2 = 70$ A, se desviará por el reóstato el 18 % de 70 A:

$$I_{r2} = 0{,}18 \times 70 = 12{,}6 \text{ A}$$

$$I_{s2} = 70 - 12{,}6 = 57{,}4 \text{ A}$$

De donde:

$$R_{r2} = \frac{R_s \cdot I_{s2}}{I_{r2}} = \frac{0{,}05 \times 57{,}4}{12{,}6} = \boxed{0{,}227\ \Omega}$$

siendo R_{r2} la resistencia total del reóstato, menos R_7.

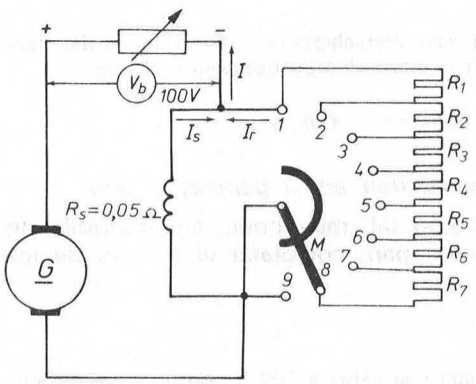


Fig. 14.6 Cálculo de un regulador de tensión para un generador serie.

Los restantes valores se calcularán de forma similar, siendo los resultados: $R_{r3} = 0{,}15\ \Omega$; $R_{r4} = 0{,}122\ \Omega$; $R_{r5} = 0{,}101\ \Omega$; $R_{r6} = 0{,}088\ \Omega$ y $R_{r7} = 0{,}0815\ \Omega$.

La resistencia de cada paso se obtendrá a partir de los resultados anteriores, observando la figura 14.6.

Así, pues, para un valor de corriente exterior de:

a) $I = 50$ A, la maneta *M* del reóstato hará contacto con el plot n.º 9 (reóstato desconectado).

b) $I = 60$ A, la maneta hará contacto con el plot n.º 8, quedando intercalada la resistencia total del reóstato:

$$R = R_{r1} = \boxed{0{,}45\ \Omega}$$

c) $I = 70$ A, la maneta hará contacto con el plot n.º 7, quedando intercalada la resistencia total, menos R_7. El valor de R_7 se deducirá:

$$R_7 = R - (R_6 + R_5 + \ldots + R_1) = 0{,}45 - R_{r2} = 0{,}45 - 0{,}227 = \boxed{0{,}222\ \Omega}$$

d) $I = 80$ A, la maneta hará contacto con el plot n.º 6, quedando intercalada la resistencia total excepto R_7 y R_6. El valor de R_6 se deducirá:

$$R_7 + R_6 = R - (R_5 + \ldots + R_1) = 0{,}45 - R_{r3} = 0{,}45 - 0{,}15 = 0{,}3\ \Omega$$

de donde:

$$R_6 = 0{,}3 - 0{,}223 = \boxed{0{,}077\ \Omega}$$

e) I = 90 A. El valor de R_5 se obtiene por el sistema anterior:

$$R_7 + R_6 + R_5 = R - (R_4 + \ldots + R_1) = 0{,}45 - R_{r4} = 0{,}45 - 0{,}122 = 0{,}3275\ \Omega$$

$$R_5 = 0{,}3275 - (R_7 + R_6) = 0{,}3275 - 0{,}3 = \boxed{0{,}0275\ \Omega}$$

f) I = 100 A. El valor de R_4 será:

$$R_4 = 0{,}45 - R_{r5} - 0{,}3275 = 0{,}45 - 0{,}101 - 0{,}3275 = \boxed{0{,}0208\ \Omega}$$

g) I = 110 A. El valor de R_3 se obtendrá de forma similar:

$$\boxed{R_3 = 0{,}012\ \Omega}$$

h) I = 120 A. El valor de R_2 será:

$$\boxed{R_2 = 0{,}0073\ \Omega}$$

i) Para I = 130 A, el reóstato estará eliminado; por tanto R_1 será:

$$R_1 = R - (R_7 + R_6 + \ldots + R_2) = 0{,}45 - (0{,}222 + 0{,}077 + \ldots + 0{,}0073) = 0{,}0815\ \Omega$$

Así, pues, las resistencias de cada paso serán: $R_1 = 0{,}0815\ \Omega$; $R_2 = 0{,}0073\ \Omega$; $R_3 = 0{,}012\ \Omega$; $R_4 = 0{,}0208\ \Omega$; $R_5 = 0{,}0275\ \Omega$; $R_6 = 0{,}077\ \Omega$; $R_7 = 0{,}222\ \Omega$.

2.º En ambos casos está eliminado el reóstato, siendo las pérdidas:

a) Para I = 50 A:

$$P_J = R_s \cdot I^2 = 0{,}05 \times 50^2 = 125\ W$$

b) Para I = 130 A:

$$P_J = R_s \cdot I^2 = 0{,}05 \times 130^2 = 845\ W$$

14.4 Cálculo del regulador de tensión por el método de la característica

Si se conocen las curvas características del generador, el cálculo del reóstato del circuito de excitación se simplifica enormemente, además de que se obtendrán los *valores reales.*

Como en los casos anteriores, se resolverá un ejercicio para facilitar la comprensión del cálculo.

Ejercicio de aplicación

De un generador derivación, que suministra una tensión constante de 450 V, se conocen los valores de su característica de regulación $I_{ex.} = f(I)$:

$I_{ex.}$ (A): 3, 3,2, 3,3, 3,7, 4,3, 4,7
I (A): 0, 15, 25, 45, 65, 75

Para suministrar una tensión constante, el circuito de excitación dispone de un reóstato de 7 pasos, que admiten, cada uno, cambios iguales de corriente de carga en serie con el devanado inductor. Determinar:

1.º La resistencia de cada paso del reóstato, teniendo en cuenta que en el funcionamiento en vacío está intercalado totalmente y que, al suministrar 31,5 kW (plena carga), está eliminado.

2.º Las pérdidas en el circuito de excitación en el funcionamiento en vacío y a plena carga.

Solución:

1.º A plena carga, el reóstato está eliminado, y la corriente toma el valor:

$$I_{p.\,c.} = \frac{P}{V_b} = \frac{31\,500}{450} = 70\ A$$

La variación de intensidad que corresponde a cada paso del reóstato será:

$$\Delta I = \frac{I_{máx.} - I_{mín.}}{\text{n.º de pasos}} = \frac{70 - 0}{7} = 10\ A$$

Con los valores de la tabla, se representa la característica de regulación (fig. 14.7), tomando I por I_i, para evitar realizar operaciones, ya que el error cometido es mínimo.

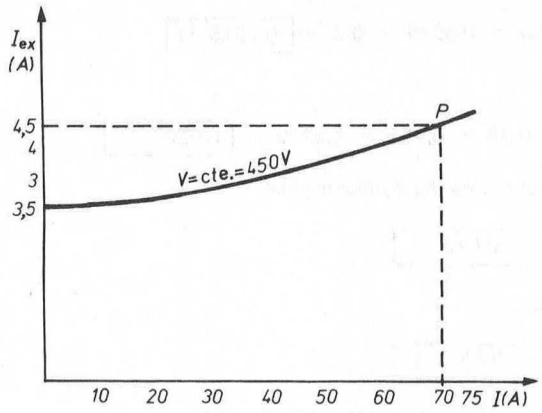


Fig. 14.7 Cálculo de un regulador de tensión a través de la característica de regulación.

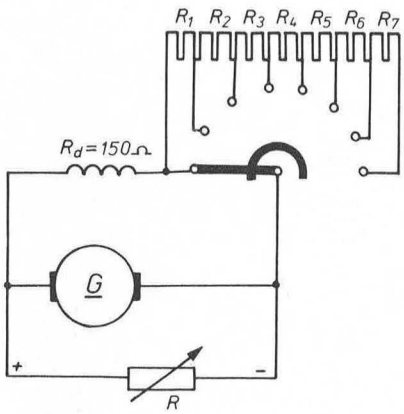


Fig. 14.8 Regulador de tensión de siete pasos en un generador derivación.

En la curva característica se obtienen los valores de corriente de excitación que corresponden a las intensidades de carga, según la variación progresiva de 10 A:

I (A): 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
$I_{ex.}$ (A): 3, 3,1, 3,2, 3,4, 3,55, 3,8, 4,1, 4,5

A plena carga (P) está eliminado el reóstato, lo que permitirá calcular la resistencia del devanado R_d (fig. 14.8):

$$R_d = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{450}{4,5} = 100\ \Omega$$

Para I = 60 A:

$$R_d + R_1 = \frac{V}{I_{ex.}} = \frac{450}{4,1} = 109,756\ \Omega$$

$$R_1 = 109,756 - 100 = \boxed{9,756\ \Omega}$$

Para I = 50 A:

$$R_d + R_1 + R_2 = \frac{450}{3,8} = 118,421\ \Omega$$

$$R_2 = 118,421 - (R_d + R_1) = 118,421 - 109,756 = \boxed{8,664\ \Omega}$$

Para I = 40 A:

$$R_d + R_1 + R_2 + R_3 = \frac{450}{3,55} = 126,760\ \Omega$$

$$R_3 = 126,760 - 118,421 = \boxed{8,33\ \Omega}$$

Los restantes valores serán: $R_4 = 5,592\ \Omega$; $R_5 = 8,27\ \Omega$; $R_6 = 4,536\ \Omega$; $R_7 = 4,83\ \Omega$.

Comprobación:

En vacío, la resistencia total del circuito de excitación es de:

$$R_d + R = \frac{V}{I_{ex.}} = \frac{450}{3} = 150\ \Omega$$

$$R = 150 - R_d = 150 - 100 = 50\ \Omega$$

siendo R la resistencia total del reóstato:

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_7 = 9,756 + 8,664 + \ldots + 4,83 = 50\ \Omega$$

2.º Las pérdidas en el circuito de excitación serán:

a) En vacío:

$$P_{ex.} = (R_d + R) \cdot I_{ex.}^2 = (100 + 50) \times 3^2 = 1\,350\ W$$

b) En plena carga:

$$P_{ex.} = R_d \cdot I_{ex.}^2 = 100 \times 4{,}5^2 = 2\,025 \text{ W}$$

14.5 Cálculo del regulador de corriente

El objeto del regulador de corriente es mantener la intensidad que suministra un generador al exterior.

Dada la escasa importancia de este tipo de regulación, se indicará solamente un ejercicio de aplicación basado en el método de característica.

14.5.1 *Cálculo de un regulador de corriente por el método de la característica*

De forma similar al cálculo del regulador de tensión realizado a través de la característica de regulación, también puede realizarse el cálculo del regulador de corriente a través de la familia de curvas denominadas *características en carga* (ver apartado 9.1.2):

$$V_b = f\ (I_{ex.}), \qquad I > 0$$

Este método permite obtener, de forma sencilla, el cálculo, además de ofrecer los resultados propios de los métodos experimentales.

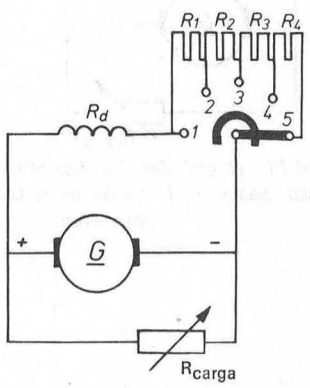


Fig. 14.9 Regulador de corriente de cuatro pasos en un generador derivación.

Ejercicio de aplicación

De un generador derivación (fig. 14.9), que suministra a plena carga 40 A a 195 V, se conocen los valores de su característica en carga:

V_b (V): 90, 123, 156, 178, 189, 198
$I_{ex.}$ (A): 0,75, 1, 1,3, 1,6, 1,8, 2,25

Se trata de calcular el reóstato necesario intercalado en serie con el devanado de excitación, teniendo en cuenta que a plena carga está eliminado, y que se va intercalando progresivamente, en 4 pasos, hasta reducir la corriente de excitación a la mitad. El reóstato está diseñado para cambios iguales en la corriente de excitación.

Solución:

Representando los valores del enunciado, se obtendrá la característica de plena carga (fig. 14.10), en donde *P* señalará el funcionamiento de plena carga (P. C.) y le corresponderá una excitación de 2 A.

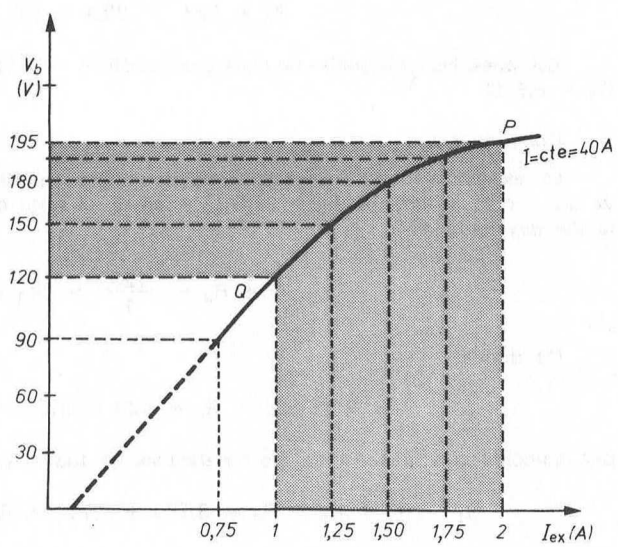


Fig. 14.10 Cálculo de un regulador de corriente a través de la característica de plena carga.

El reóstato estará eliminado para la mitad de la excitación de *P*:

$$I_{ex.\,(mín.)} = \frac{1}{2} \times I_{ex.\,(máx.)} = \frac{1}{2} \times 2 = 1 \text{ A}$$

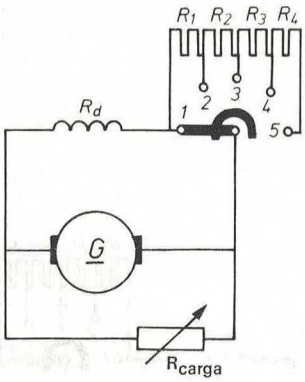


Fig. 14.11 Regulador de corriente de cuatro pasos en posición de reóstato eliminado.

La variación de corriente de excitación será:

$$\Delta I = \frac{I_{ex.\,(máx.)} - I_{ex.\,(mín.)}}{\text{n.º de pasos}} = \frac{2 - 1}{4} = 0{,}25 \text{ A}$$

Según indica la característica, para cada valor de excitación, el generador produce la tensión:

$I_{ex.}$ (A): 2, 1,75, 1,5, 1,25, 1
V_b (V): 195, 186, 171, 153, 123

El cálculo de los pasos del reóstato será:

a) Para $I_{ex.} = 2$ A, el reóstato está eliminado (fig. 14.11), por lo que solamente interviene la resistencia del devanado R_d (contacto n.º 1):

$$R_d = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{195}{2} = 97{,}5\ \Omega$$

b) Para $I_{ex.} = 2 - 0{,}25 = 1{,}75$ A (contacto n.º 2), se puede obtener la resistencia del 1.er paso:

$$R_d + R_1 = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{186}{1{,}75} = 106{,}28\ \Omega$$

$$R_1 = 106{,}28 - R_d = 106{,}28 - 97{,}5 = 8{,}785\ \Omega$$

c) Para $I_{ex.} = 2 - 0{,}5 = 1{,}5$ A (contacto n.º 3), la resistencia del 2.º paso será:

$$R_d + R_1 + R_2 = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{171}{1{,}5} = 114\ \Omega$$

$$R_2 = 114 - (R_d + R_1) = 114 - 106{,}28 = 7{,}714\ \Omega$$

d) Para $I_{ex.} = 2 - 0{,}75 = 1{,}25$ A (contacto n.º 4), la resistencia del 3.er paso será:

$$R_d + R_1 + R_2 + R_3 = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{153}{1{,}25} = 122{,}4\ \Omega$$

$$R_3 = 122{,}4 - 114 = 8{,}4\ \Omega$$

e) Para $I_{ex.} = 2 - 1 = 1$ A (contacto n.º 5), la resistencia del último paso será:

$$R_d + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \frac{V_b}{I_{ex.}} = \frac{123}{1} = 123\ \Omega$$

$$R_4 = 123 - 122{,}4 = 0{,}6\ \Omega$$

Así, pues, las resistencias de cada paso serán: $R_1 = 8{,}785\ \Omega$; $R_2 = 7{,}714\ \Omega$; $R_3 = 8{,}4\ \Omega$; $R_4 = 0{,}6\ \Omega$.

Comprobación:

La resistencia total del reóstato se puede obtener a partir de los puntos *P* y *Q* (fig. 14.10), ya que, en *P*, se obtiene $R_d = 97{,}5\ \Omega$ y, en *Q*, el valor de la resistencia del reóstato más la del devanado es:

$$R + R_d = \frac{123}{1} = 123\ \Omega$$

De donde:

$$R = 123 - R_d = 123 - 97{,}5 = 25{,}5\ \Omega$$

que coincide con la suma de las resistencias de todos los pasos:

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 8{,}785 + 7{,}714 + 8{,}4 + 0{,}6 = 25{,}5\ \Omega$$

14.6 Regulador automático de tensión

La necesidad de mantener constante la tensión de salida de un generador, por las razones expuestas anteriormente, motivaron la automatización de los reguladores de tensión.

14.6.1 *Reguladores clásicos*

En definitiva, el automatismo consistía en intercalar mayor o menor número de resistencias de paso de un reóstato, a través de un giro de la maneta en ambos sentidos. El movimiento de la maneta se conseguía a través de un pequeño motor, por medio de engranajes (tipo *Thury).*

Dada la inercia de las partes móviles y el tiempo de respuesta tan elevado, se idearon otros reguladores más perfeccionados, como el tipo *Tirrill.*

El regulador *Tirrill* intercalaba una resistencia fija en serie con la excitación, y la elimina cuando la tensión es inferior a la nominal; para ello disponía de unas láminas, que se mueven constantemente, abriendo y cerrando el circuito de excitación. Este sistema elimina el efecto de inercia mecánica del anterior pero presenta los inconvenientes de no ofrecer una regulación fina y el producirse un excesivo número de aperturas y cierres de corriente, con el consiguiente desgaste de contactos.

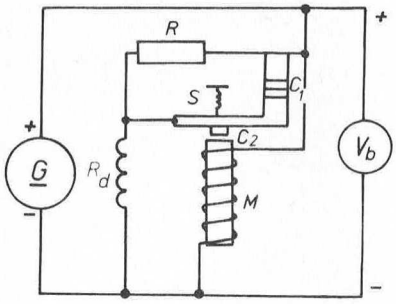


Fig. 14.12 Regulador de tensión de un elemento.

14.6.2 *Regulador de tensión de un elemento*

Otro sistema muy utilizado en la carga de baterías en vehículos es el representado en la figura 14.12, con el siguiente funcionamiento:

En condiciones normales, el generador derivación da una tensión, que marca el voltímetro V_b. Cuando aumenta la tensión a un valor ligeramente superior a la nominal (por ejemplo en vehículos con batería de 12 V, se elige esta tensión entre 14 y 15 V), interesa que disminuya automáticamente la tensión, y esto se logra por acción del electroimán *M* que, al atraer la plaquita, abrirá el contacto C_1, intercalando la resistencia *R* en serie con el devanado de excitación R_d. Es sabido que, al añadir una resistencia al devanado, disminuirá la corriente de excitación y por consiguiente el flujo, que a su vez hará descender la tensión. Una vez ha descendido la tensión, disminuirá la fuerza de atracción de *M*, por lo que actuará el resorte *S*, desplazando de nuevo la plaquita, hasta cerrar C_1. Con C_1 cerrado, la corriente de excitación se cierra a través de la plaquita (que es conductora), por ofrecer menos resistencia que la rama superior. El contacto de la plaquita C_2 estará aislado, para evitar que pueda derivarse corriente por él.

La tensión conseguida con el sistema anterior no es rigurosamente continua, y dependerá de la inercia de los contactos. En la figura 14.13 se han representado los gráficos que indican la variación de tensión según el tipo de apertura de los contactos: *lenta* (fig. 14.13A) y *rápida* (fig. 14.13B).

La variación de tensión en estos reguladores se debe principalmente a la variación en la *velocidad* del generador.

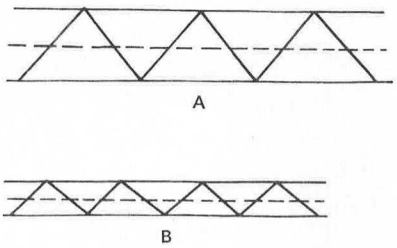


Fig. 14.13 Variación de tensión en la apertura de contactos: A, *apertura lenta;* B, *apertura rápida.*

14.6.3 *Regulador de tensión de tres elementos*

Para mejorar la regulación obtenida con el sistema anterior (fig. 14.12), se idearon los reguladores de *tres elementos* (muy utilizados en la actualidad), que controlan la *tensión* y *corriente* de la salida del generador derivación, independientemente. Además evitan la inversión en el funcionamiento de generador a motor cuando la tensión de la batería es superior a la del generador, por la acción del *disyuntor* (fig. 14.14).

1 dínamo
2 inducido
3 devanado inductor
4 disyuntor
5 regulador de intensidad
6 bobina de absorción
7 resistencia de campo
8 regulador de tensión

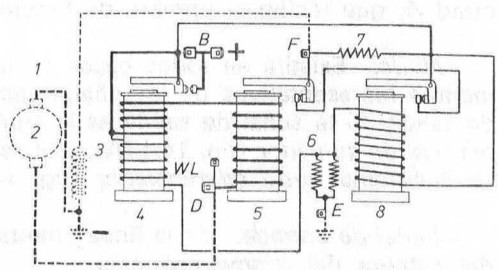


Fig. 14.14 Esquema de un regulador de tres elementos.

En condiciones normales de funcionamiento, el devanado de excitación 3 está conectado en derivación con los terminales positivo y negativo (masa del vehículo); el electroimán 4 atrae a la placa y cierra el contacto (+*B*).

Al producirse una sobretensión, el electroimán 8 abre el contacto, intercalando, en serie con la bobina de campo, la resistencia 7.

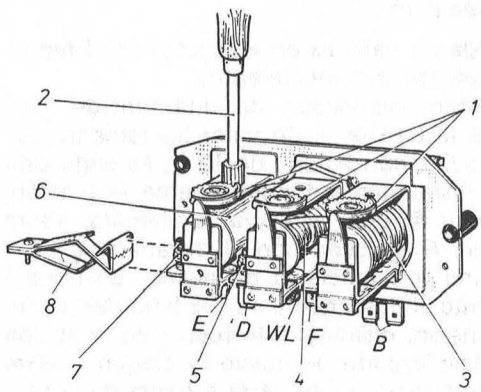
Al producirse un aumento de intensidad superior al previsto, actuará el electroimán 5, intercalando la resistencia 7, en serie con el devanado de campo.

Al producirse un aumento en la tensión de la batería con respecto al generador, *se invierte la corriente* en la bobina de intensidad (trazo grueso) del disyuntor 4, mientras que en la bobina de tensión (trazo fino) del disyuntor no se invierte la corriente por hallarse en derivación. La inversión de corriente en la bobina de intensidad da lugar a un flujo de sentido opuesto al producido por la bobina de tensión, y el electroimán no ejerce atracción sobre la placa, quedando abierto el circuito de salida (coincide con la posición señalada en la figura).

En definitiva, este regulador de tensión e intensidad protege además al generador.

Dada la importancia de la variación de temperatura en los reglajes de los reguladores, se introduce una resistencia de absorción 6, conectada en serie con las bobinas en derivación del regulador de tensión y el disyuntor.

En la figura 14.15 se muestra el regulador que corresponde al esquema anterior con la herramienta de reglaje.

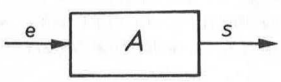


1 excéntricas de reglaje
2 herramienta de reglaje
3 disyuntor
4 regulador de intensidad
5 contactos del regulador de intensidad
6 regulador de tensión
7 contacto del regulador de tensión
8 pinzas

Fig. 14.15 Reglaje de un regulador de tres elementos.

14.7 Sistemas automáticos de regulación. Regulación de tensión por control electrónico

Los métodos de regulación automática más modernos han sustituido a los dispositivos clásicos (relés, contactores, amplidina, rototrol, etc.), por componentes electrónicos (tiristor, triac, etc.) y transductores (fotoeléctrico, de velocidad, de temperatura, etc.).



$s = A \cdot e$

Fig. 14.16 Bloque de transferencia.

14.7.1 *Esquemas de bloques*

El estudio de los servomecanismos se realiza a través de los *esquemas de bloques,* que representan los elementos, recorrido de la señal y sentido, mediante líneas y rectángulos. Los elementos funcionales más importantes del esquema de bloques son: el *bloque de transferencia* y el *nudo.*

Bloque de transferencia. Se caracteriza este bloque por la unión de la variable de salida *S* (fig. 14.16) a la variable de entrada *e* mediante una magnitud *A*, que recibe el nombre de función de transferencia.

Nudo. Existirá en todos casos en los que *se encuentren dos o más segmentos* representativos de la señal y *nazca* un nuevo segmento representativo de salida. Si la señal de salida es la suma de las señales de entrada, se denomina *nudo sumador* (fig. 14.17A), y si es la diferencia de las señales de entrada se denomina *nudo diferenciador* (fig. 14.17B).

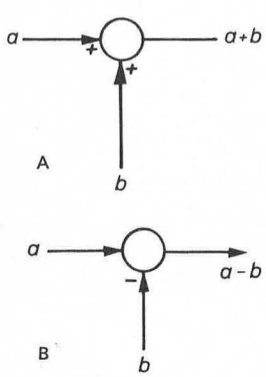


Fig. 14.17 Nudos del esquema de bloques: A, *sumador;* B, *diferenciador.*

Señal de entrada. Es la línea orientada que representa la señal proveniente del exterior del mismo esquema.

Señal de salida. Es el segmento de línea orientado que parte del bloque o del nudo.

Señal de reacción. Segmento de línea orientado que toma origen en la salida del bloque o del nudo e inyecta parte de la señal de salida a la entrada formando con todos los bloques, o parte de ellos, un anillo o lazo de reacción *(feedback).*

Conexión de bloques en serie (o cadena). Tiene lugar cuando la señal de salida de un bloque es a la vez la señal de entrada del siguiente (fig. 14.18).

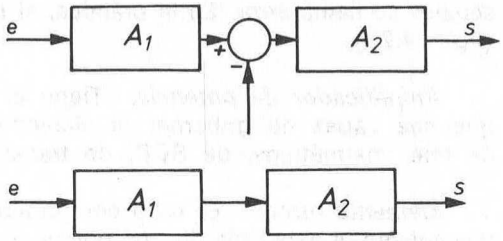


Fig. 14.18 Conexión de bloques en serie o cadena.

Conexión de bloques cerrados en anillo. Tiene lugar cuando la salida del último está unida con la entrada del primero (fig. 14.19).

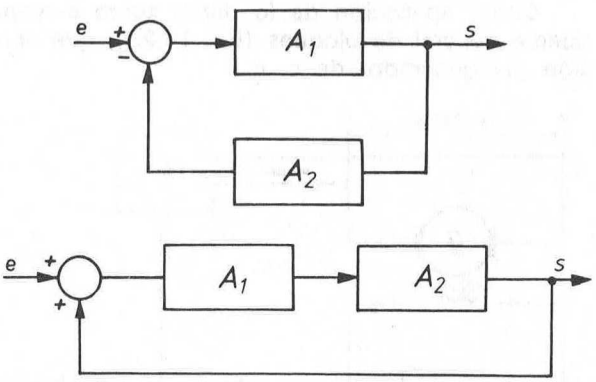


Fig. 14.19 Conexión de bloques cerrados en anillo.

14.7.2 *Componentes de los servomecanismos*

Los elementos que constituyen un servomecanismo se representan en el esquema de la figura 14.20:

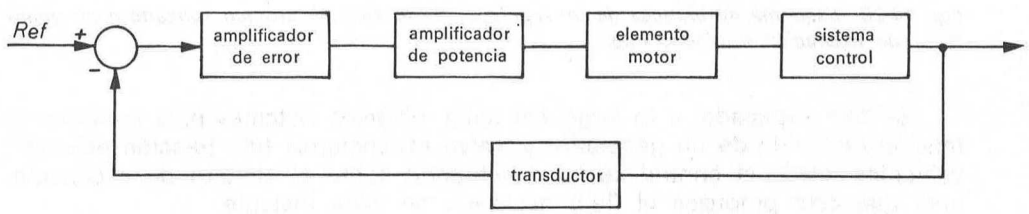


Fig. 14.20 Esquema de bloques sobre elementos constituyentes de un servomecanismo.

Transductor. Es un dispositivo capaz de convertir una magnitud física en una magnitud eléctrica (generalmente una tensión). Ejemplo: dínamo taquimétrica, termopar, termorresistencia, célula fotovoltaica, de presión, de caudal, de nivel, etc.

Amplificador de error. Tiene la misión de transformar la señal de error para que pueda gobernar al amplificador de potencia. En los esquemas de bloques, el amplificador a error se representa por A_1 dentro de un rectángulo; y en los bloques eléctricos, por un triángulo (fig. 14.21). Ejemplos de amplificadores: de componentes normales (resistencias, condensadores, transistores, etc.), de componentes integrados, diferenciales, etc.

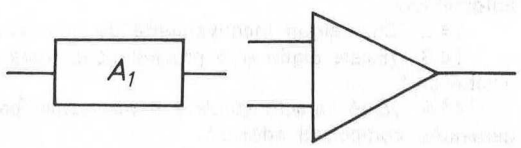


Fig. 14.21 Símbolos de amplificadores.

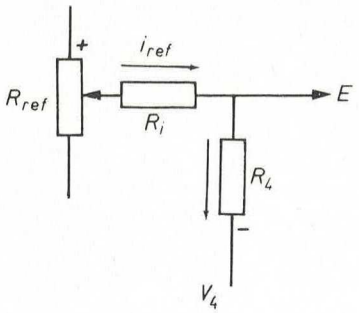


Fig. 14.22 Nudo sumador.

Nudo sumador. Normalmente le precede al amplificador de error y tiene la función de comparar la señal de referencia (entrada) con la señal proporcional a la salida suministrada por el transductor. La referencia entre estas dos señales se llama *error.* En la práctica, el nudo sumador se hace con resistencias (fig. 14.22).

Amplificador de potencia. Tiene el fin de adaptar la señal de error para que sea capaz de gobernar el elemento motor. Ejemplos de amplificadores: de relé, magnéticos, de SCR, de transistores.

Elemento motor. Es todo componente que da potencia mecánica al servomecanismo, a expensas de una potencia eléctrica que se le suministra. Ejemplos de motores: de c. c., de imán permanente, de c. c. de circuito impreso, de c. a. bifásico, paso-paso, etc.

14.7.3 *Regulación de la tensión en un generador de c. c. por control electrónico*

Como aplicación de lo dicho sobre servomecanismos, se muestra el esquema general de bloques (fig. 14.23), que corresponde al control de la tensión del generador de c. c.

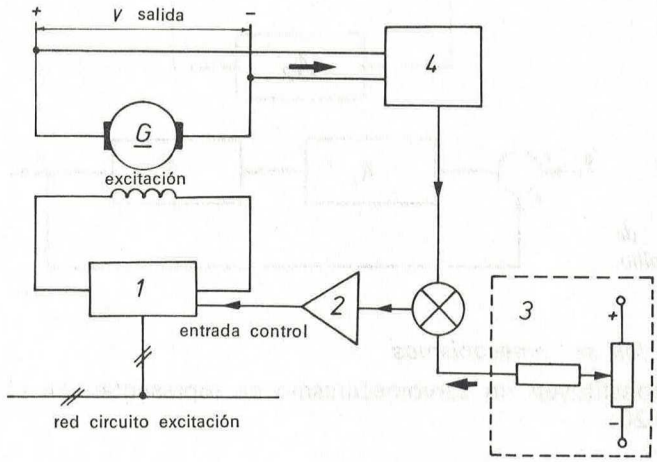


Fig. 14.23 Esquema de bloques de un regulador de tensión electrónico aplicado a un generador de excitación independiente.

Se han explicado, a lo largo del tema, diversos sistemas para controlar la tensión de salida de un generador y, salvo excepciones (ej.: tracción eléctrica, vehículos, etc.), el control se hace actuando sobre el circuito de excitación, para que éste produzca el flujo necesario en cada instante.

El esquema de bloques indica que cualquier variación en la tensión de salida es captada por el muestreador 4, y llevado al comparador 3, adonde llega también una tensión fija de la fuente de señal de referencia 5. El resultado de la comparación pasa al control de la excitación 1, a través del amplificador 2. El control actúa sobre una fuente de tensión obtenida de una red especial para el circuito de excitación.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Proceso de fabricación de reóstatos de regulación.
— Características de reglaje de los reguladores utilizados en vehículos.
— Describir el esquema general de bloques de un regulador electrónico de tensión aplicado a un generador de excitación en derivación.

CUESTIONARIO

14.1 ¿Qué se entiende por máquina automática? ¿Qué tipo de control sigue la máquina automática?

14.2 Citar algún inconveniente de una tensión variable a la salida de un generador.

14.3 ¿Existe algún otro procedimiento para regular la tensión, que no sea modificar la excitación?

14.4 ¿Qué características son necesarias para calcular el regulador de tensión de un generador compound aditivo?

14.5 Explicar el proceso de cálculo de un regulador de corriente en un generador de excitación independiente.

14.6 Describir el funcionamiento de un regulador automático (tipo Thury), aplicado a un generador de excitación derivación, con ayuda de un esquema general de instalación.

14.7 Comparar los reguladores de 1, 2 y 3 elementos, utilizados en vehículos.

14.8 Citar 5 tipos de transductores, indicando su principio de funcionamiento.

14.9 Citar dos aplicaciones de servomecanismos donde intervenga el elemento motor.

14.10 Comparar el regulador automático de tensión con el regulador electrónico.

14.11 Determinar el valor del reóstato a colocar en derivación con el devanado de excitación de un generador serie de resistencia R_s, para reducir el flujo al x %, de su valor nominal. Suponer que se mantiene la proporcionalidad entre la corriente de excitación y el flujo y aplicarlo a algún caso concreto.

Respuesta: $R_r = R_s \cdot \frac{x}{100 - x}$

14.12 Un generador derivación, de $R_d = 50\ \Omega$, suministra en vacío 200 V, para una excitación de 2 A y dispone de un reóstato de 5 pasos en serie con el devanado de campo, que se elimina a P. C. Al ir conectando receptores, la tensión disminuye, por lo que se van intercalando resistencias del reóstato para mantener la tensión constante. Determinar:

1.º La resistencia de los pasos del reóstato, teniendo en cuenta que están diseñados para cambios iguales de corriente de excitación.

2.º Las pérdidas Joule en el circuito de excitación en vacío y a plena carga.

Respuestas: 1.ª: $R_1 = 5{,}5\ \Omega$; $R_2 = 6{,}944\ \Omega$; $R_3 = 8{,}928\ \Omega$; $R_4 = 11{,}904\ \Omega$; $R_5 = 16{,}6\ \Omega$. 2.ª: $P_0 = 400$ W; $P_{p.\,c.} = 800$ W.

14.13 De un generador serie de $R_s = 0{,}1\ \Omega$ se conocen los datos sobre las características de vacío y carga:

I (A): 40, 80, 120, 160, 200
E_0 (V): 47, 92, 138, 176, 200
V_b (V): 32, 65, 96, 116, 130

Determinar:

El reóstato de 5 pasos (para cambios idénticos de corriente de carga), que habrá de intercalarse en paralelo con el devanado de campo, para conseguir una tensión constante de 80 V, para potencias de salida comprendidas entre 8 kW y 16 kW. Cuando suministra 8 kW, el reóstato está desconectado, mientras que al suministrar 16 kW, está intercalada la resistencia del 1.er paso. Considerar que la caída de tensión de vacío a carga, depende solamente de la corriente de carga para cualquier excitación.

Respuesta: $R_1 = 0{,}203\ \Omega$; $R_2 = 0{,}043\ \Omega$; $R_3 = 0{,}0748\ \Omega$; $R_4 = 0{,}117\ \Omega$; $R_5 = 0{,}384\ \Omega$.

14.14 De un generador derivación, de $R_d = 40\ \Omega$, se conoce la característica de regulación para una tensión constante de 120 V:

$I_{ex.}$ (A): 2, 2,15, 2,45, 2,7, 3
I (A): 0, 15, 30, 40, 50

Se trata de calcular el reóstato de 10 pasos (para variaciones idénticas de corriente del inducido), necesario para obtener dicha característica. En vacío el reóstato está intercalado totalmente, y eliminado a plena carga.

Respuesta: $R_1 = 2{,}105\ \Omega$; $R_2 = 2{,}339\ \Omega$; $R_3 = 2{,}614\ \Omega$; $R_4 = 1{,}920\ \Omega$; $R_5 = 3{,}19\ \Omega$; $R_6 = 1{,}159\ \Omega$; $R_7 = 2{,}48\ \Omega$; $R_8 = 1{,}328\ \Omega$; $R_9 = 1{,}393\ \Omega$; $R_{10} = 1{,}463\ \Omega$.

14.15 De un generador cuya excitación independiente se alimenta de una red de 210 V, se conoce la característica de plena carga para I = cte. = 100 A:

V_b (V): 0, 188, 306, 376, 416, 440
$I_{ex.}$ (A): 1, 2,5, 3,5, 4,5, 5,5, 7

Se trata de calcular las resistencias de los 6 pasos de un reóstato (previstos para cambios idénticos de corriente), que ha de colocarse en serie con el devanado de campo. Hacer el estudio cuando la potencia de salida varíe desde 34,8 kW a plena carga, teniendo en cuenta que a plena carga suministra 440 V.

Respuesta: $R_1 = 2{,}307\ \Omega$; $R_2 = 2{,}692\ \Omega$; $R_3 = 3{,}181\ \Omega$; $R_4 = 3{,}818\ \Omega$; $R_5 = 4{,}666\ \Omega$; $R_6 = 5{,}833\ \Omega$.

BIBLIOGRAFIA

PIZZIOLA A., *Electrónica Industrial y Servomecanismos,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1974.

KOSOW I., *Control de Máquinas Eléctricas,* Reverté, S. A., Barcelona 1977.

SISKIND, S., *Sistemas industriales de Regulación Eléctrica,* Labor, S. A., Barcelona 1973.

Manuales técnicos sobre vehículos.

Tema 15

Dispositivos de regulación y control de las características de un motor de corriente continua

OBJETIVOS

— *Justificar la necesidad del reóstato de arranque en el motor de c. c.*
— *Calcular gráficamente las resistencias de cada paso en un reóstato de arranque.*
— *Interpretar el diagrama de la corriente absorbida por un motor en función de la velocidad durante el arranque.*
— *Comparar los procedimientos utilizados en el control de la velocidad de un motor de c. c.*
— *Interpretar los esquemas sobre los procedimientos más utilizados en la inversión de marcha del motor de c. c.*
— *Analizar los procedimientos utilizados en el frenado eléctrico.*
— *Valorar la importancia actual del control electrónico del motor de c. c.*

GUION

— Cálculo de reóstatos de arranque.
— Constitución de los reóstatos de arranque. Tipos de reóstatos.
— Sistemas utilizados para regulación de la velocidad.
— Inversión del sentido de marcha de un motor.
— Frenado eléctrico del motor de c. c.
— Control electrónico del motor de c. c.

PUNTOS CLAVE

— Describir el proceso de arranque de un motor de c. c.
— Valorar la importancia del control de velocidad del motor en las aplicaciones industriales.
— Comparar los diversos procedimientos utilizados en el frenado e inversión del sentido de giro del motor de c. c.

EXPOSICION DEL TEMA

El desarrollo de la técnica en la producción industrial ha necesitado y necesitará cada vez más, en el futuro, motores de velocidad regulable.

El motor que primeramente se tomó en consideración por sus *posibilidades de regulación* fue el motor de c. c., siendo posteriormente sustituido por el de c. a.

En los últimos años, ha resurgido de nuevo el uso del motor de c. c., principalmente desde la aparición del *tiristor* (SCR), que permite un *control electrónico de las características del motor,* que lo convierte en el motor de mayor seguridad y precisión en las aplicaciones industriales.

15.1 Cálculo de reóstatos de arranque

Para disminuir la corriente en el arranque de un motor de c. c., se intercalan resistencias en serie con el inducido (ver Tema 11), denominadas reóstatos de arranque.

Existen otros motivos por lo que es necesario dotar al motor, en su período de arranque, de un *arrancador,* como son:

1.º Evitar fuertes caídas de tensión que se producen en los arranques directos, con el consiguiente perjuicio para los receptores próximos.

2.º Proporcionan al motor, y a la máquina accionada por él, un arranque suave, evitando los grandes esfuerzos mecánicos que aparecen con un fuerte par de arranque.

Para evitar los inconvenientes del arranque directo, las *Normas* de cada país indican la correcta utilización de motores, señalando las corrientes máximas permisibles en función de la potencia del motor. Así, en España, el *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión,* junto a las Instrucciones Técnicas Complementarias, en vigor desde el 31 de octubre de 1973, en la Instrucción 34, dictan la norma de utilización de motores (tabla 15.1).

Tabla 15.1 Corrientes permisibles en el arranque de los motores eléctricos

Motores de corriente continua		*Motores de corriente alterna*	
Potencia nominal del motor	*Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente de arranque y la de plena carga*	*Potencia nominal del motor*	*Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente de arranque y la de plena carga*
De 0,75 kW a 1,5 kW	2,5	De 0,75 kW a 1,5 kW	4,5
De 1,5 kW a 5,0 kW	2,0	De 1,5 kW a 5,0 kW	3,0
De más de 5,0 kW	1,5	De 5,0 kW a 15,0 kW	2,0
		De más de 15,0 kW	1,5

15.1.1 *Cálculo gráfico de las resistencias de un reóstato de arranque*

Basados en las limitaciones del Reglamento, existen procedimientos analíticos y gráficos para la determinación de las resistencias de cada paso de un reóstato.

Aquí se expondrá el método gráfico, por ser un método muy sencillo, dejando para cursos superiores el estudio del método analítico y el análisis del gráfico.

Con la potencia del motor, se determinará la corriente máxima permitida en el arranque con respecto a la nominal (tabla 15.1).

Eligiendo una unidad lineal para la resistencia (ohmios) y otra para la corriente (amperios), se tendrán los siguientes valores (fig. 15.2):

$$I_{máx.} = AB$$

$$I = AC$$

en donde:

$I_{máx.}$ = corriente máxima permitida en el arranque
I = corriente nominal

Se trazan, por *B* y *C*, dos rectas paralelas en cualquier dirección, como son las *BD* y *CE*, en donde:

$$BD = R_A + R_i \quad \text{(motor derivación)}$$

$$BD = R_A + R_i + R_s \quad \text{(motor serie)}$$

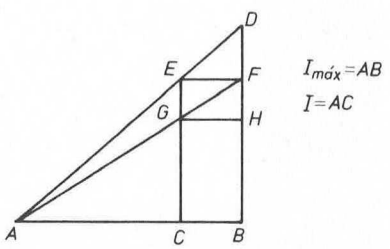


Fig. 15.2 Cálculo gráfico de resistencias de arranque.

en donde:

R_A = resistencia total del reóstato
R_i = resistencia interior inducido
R_s = resistencia del devanado de excitación en serie

Uniendo *A* con *D* y trazando *EF*, paralela a *AB*, quedará determinada la 1.ª resistencia, ya que:

$$R_1 = DF$$

De forma similar, se une *A* con *F* y cortará a la recta *CE* en *G*. Trazando la paralela a *AB* por *G*, quedará determinada la 2.ª resistencia:

$$R_2 = FH$$

Los restantes pasos del reóstato se calculan por el mismo procedimiento.

15.1.2 *Determinación del número de pasos del reóstato*

Analíticamente se utiliza la fórmula que da el número de pasos (*X*):

$$X = \frac{\log\left(\frac{R_i}{R_i + R_A}\right)}{\log\left(\frac{I}{I_{máx.}}\right)}$$ motor derivación

$$X = \frac{\log\left(\frac{R_i + R_s}{R_i + R_s + R_A}\right)}{\log\left(\frac{I}{I_{máx.}}\right)}$$ motor serie

Como normalmente *X* no resultará un número entero, se elegirá el número inmediato superior.

También puede calcularse el número de pasos, partiendo de las resistencias parciales, por diferencia entre las conocidas y la total, ya que, aunque se cometiera algún error en los últimos pasos, no tiene excesiva importancia dado su escaso valor de resistencia.

El valor de la resistencia total del reóstato se puede calcular por la expresión:

$$R_A = \frac{V_{red.}}{I_{máx.}} - R_i$$ motor derivación

$$R_A = \frac{V_{red.}}{I_{máx.}} - R_i - R_s$$ motor serie

Ejercicio de aplicación

Un motor derivación consume 22 kW de una red de 220 V, siendo la resistencia interna de 0,1 Ω. Sin considerar la resistencia de los polos de conmutación, determinar:

1.º La resistencia máxima del reóstato de arranque.
2.º Las resistencias de cada paso del reóstato.
3.º Comprobar el número de escalones mediante la expresión analítica.

Solución:

1.º La corriente absorbida por el motor a plena carga es:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{22\,000}{220} = 100 \text{ A}$$

Según la tabla 15.1, la corriente máxima permitida, para un motor de potencia superior a 5 kW, es 1,5 veces la de plena carga.

$$I_{máx.} = 1{,}5 \cdot I = 1{,}5 \times 100 = 150 \text{ A}$$

La resistencia del reóstato será entonces:

$$R_A = \frac{V_{red.}}{I_{máx.}} - R_i = \frac{220}{150} - 0{,}1 = \boxed{1{,}366\ \Omega}$$

2.º Para hallar las resistencias de cada paso, se toman los segmentos siguientes (figura 15.3):

$$AB = I_{máx.} = 50\ A$$

$$AC = I = 100\ A$$

$$DB = R + R_i = 1{,}366 + 0{,}1 = 1{,}466\ \Omega$$

Se lleva el valor de R_A sobre el segmento *DB* (R_A = DZ = 1,366 Ω), quedando así determinado el número de pasos, pues el último deberá coincidir con el punto *Z*.

Para hallar R_1, se une *D* con *A*, que cortará la paralela a *DB* (que pasa por *C*) en el punto *E*:

$$R_1 = DF = 0{,}49\ \Omega$$

Se une *F* con *A*, y se determina R_2:

$$R_2 = FH = 0{,}325\ \Omega$$

Los restantes pasos se determinan de igual forma, obteniéndose los valores: R_3 = HJ = 0,215 Ω; R_4 = JL = 0,15 Ω; R_5 = LN = 0,09 Ω; R_6 = NP = 0,06 Ω; R_7 = PZ = 0,05 Ω.

Al trazar la paralela a *DB* desde el punto *Q*, se observa que corta en las proximidades del punto *Z*, y corresponderá por ello al último escalón.

En definitiva, hay 7 escalones; y los valores de sus resistencias son: R_1 = 0,49 Ω; R_2 = 0,325 Ω; R_3 = 0,215 Ω; R_4 = 0,15 Ω; R_5 = 0,09 Ω; R_6 = 0,06 Ω; R_7 = 0,05 Ω.

3.º Aplicando la expresión:

$$x = \frac{\log\left(\frac{R_i}{R_i + R_A}\right)}{\log\left(\frac{I}{I_{máx.}}\right)} = \frac{\log\left(\frac{0{,}1}{0{,}1 + 1{,}366}\right)}{\log\left(\frac{100}{150}\right)} = 6{,}6$$

Al tomarse el número entero inmediato superior, éste será: 7.

R_1 = DF = 0,49 Ω
R_2 = FH = 0,325 Ω
R_3 = HJ = 0,215 Ω
R_4 = JL = 0,150 Ω
R_5 = LN = 0,090 Ω
R_6 = NP = 0,060 Ω
R_7 = PZ = 0,050 Ω
R_{total} = 1,38

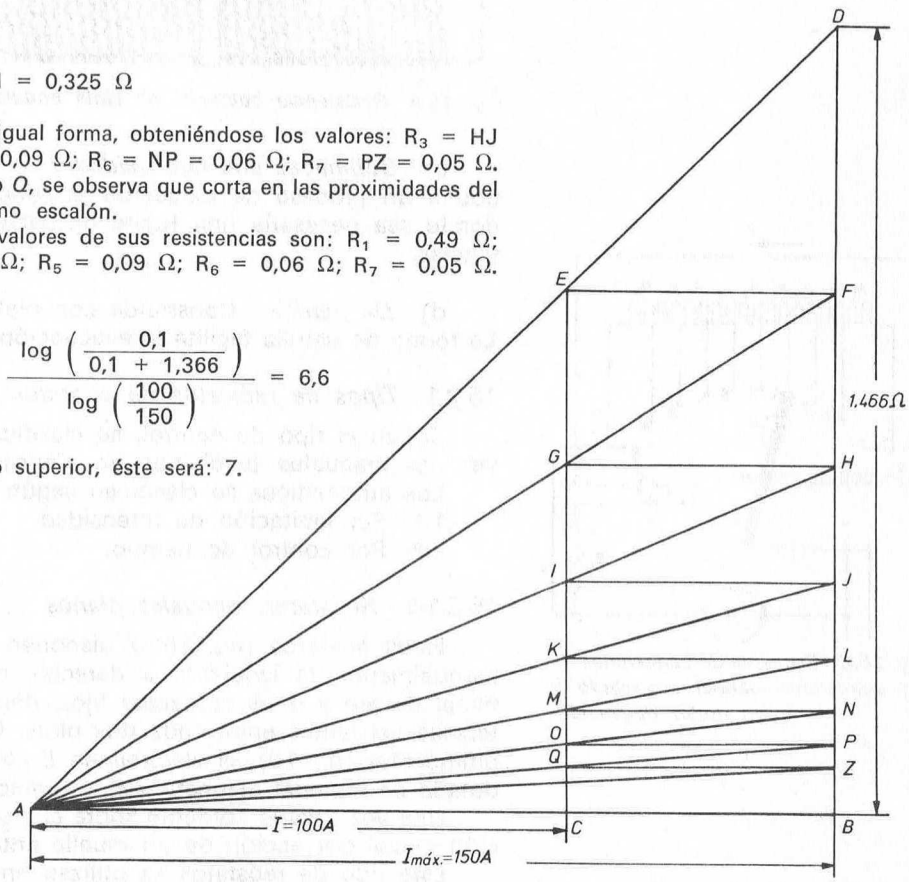


Fig. 15.3 Cálculo de un reóstato de arranque para un generador derivación.

15.2 Constitución de los reóstatos de arranque. Tipos de reóstatos

Los reóstatos de arranque son atrevesados por corrientes elevadas, por lo que se construyen de amplia sección y resistencia pequeña, para evitar a la vez una fuerte caída de tensión.

Para facilitar la disipación de calor, producido en las resistencias por efecto Joule, se dispone de algún sistema de refrigeración, por ejemplo: ventilación natural (procurando la máxima superficie de contacto con el aire), ventilación forzada con aire, con aceite, etc.

Las resistencias utilizadas en los reóstatos son del tipo metálico y se construyen de muy diferentes formas, según su uso y aplicación. A continuación, se citan las resistencias más generalizadas:

a) *De fleje helicoidal vertical.* Consisten en una hélice de fleje de una aleación resistente e inoxidable, muy tenaz y con un coeficiente de temperatura mínimo (fig. 15.4).

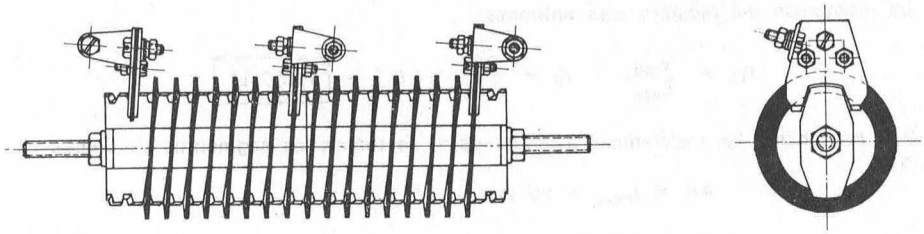


Fig. 15.4 Resistencia de fleje helicoidal vertical.

b) *Bobinadas.* A base de una cinta ondulada vertical y vitrificadas para altas potencias. Presentan gran superficie de contacto con el exterior (fig. 15.5).

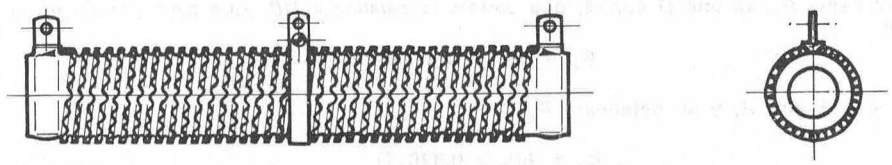


Fig. 15.5 Resistencia bobinada de cinta ondulada vertical.

c) *Bobinadas con hilo oxidado.* A base de un hilo de constantán sometido a un proceso de oxidación profundo. Son adecuadas para instalaciones donde sea necesaria una fuerte disipación de calor y valores bajos de resistencias.

d) *De parrilla.* Construida con pletina (palastro) de fundición de hierro. La forma de parrilla facilita la evacuación de calor.

15.2.1 *Tipos de reóstatos de arranque*

Según el tipo de control, se clasifican en: *manuales* y *automáticos.* A su vez, los manuales se dividen en *planos* y *de tambor.*

Los automáticos se clasifican según dos métodos:

1.º Por limitación de intensidad.

2.º Por control de tiempo.

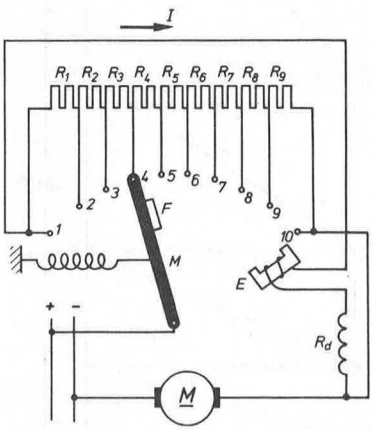


Fig. 15.6 Esquema de conexiones de un arrancador manual conectado a un motor derivación.

15.2.1.1 *Reóstatos manuales planos*

Estos aparatos (fig. 15.6) disponen de una maneta *M*, que se desplaza manualmente de izquierda a derecha, estableciendo conexión entre un terminal de red y unos contactos fijos, denominados *plots,* eliminando las resistencias existentes entre cada dos plots. Una vez se establece contacto con el último plot (n.º 10), el electroimán *E* atraerá la maneta, ya que para ello está dotada de material magnético *F*, y funcionará el motor en servicio normal.

Una vez cesa la corriente sobre el electroimán, la maneta volverá a su posición inicial por acción de un muelle antagonista *L*.

Este tipo de reóstatos se utilizan en motores de pequeña potencia.

15.2.1.2 *Reóstatos manuales de tambor*

El reóstato de tambor, o *combinador* (fig. 15.7), está compuesto por un cilindro en el que va sujeto un juego de placas metálicas, sobre las que establecerán contacto los dedos de contacto, al girar el cilindro.

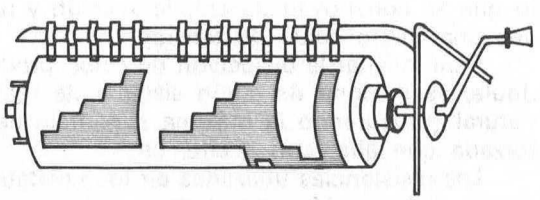


Fig. 15.7 Arrancador de tambor (combinador).

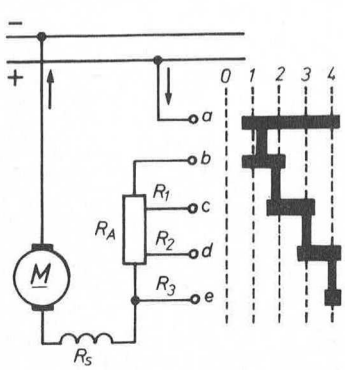


Fig. 15.8 Esquema de conexiones de un arrancador de tambor.

Una aplicación del combinador se indica en el esquema de la figura 15.8, comprobándose que, en la posición 0, permanece desconectado el motor. Al pasar el combinador a la posición 1, quedará conectado el motor serie con el reóstato de arranque intercalado en serie con el inducido (a – 1 – b – R_A).

En la posición 2 la corriente pasa a través del combinador (a – 1 – 2 – c – R_A) y elimina el primer tramo de resistencia R_1. En la posición 3, la corriente sigue la trayectoria (a – 1 – 2 – 3 – d) y elimina R_1 y R_2. En la posición última 4, la corriente pasa a través del arrancador (a – 1 – 2 – 3 – 4 – e), eliminando la resistencia de arranque R_A, por lo que se aplicará al inducido la tensión de red.

El arrancador de tambor es utilizado en motores de potencias elevadas, por presentar mayor robustez, ofrecer mayor número de posiciones, adaptarse fácilmente como inversor, etc.

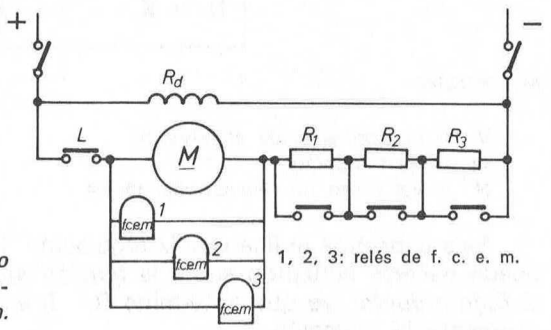
Entre sus aplicaciones figuran: tracción eléctrica, elevación, etc.

15.2.1.3 *Reóstatos de arranque automáticos basados en el control de la intensidad*

Este tipo de aparatos dispone de unos relés que actúan en función de la corriente que circula por el inducido. Los más generalizados son los que utilizan relés de intensidad y los de f. c. e. m.

El arrancador de *relés de intensidad* actúa en función de la corriente que pasa por el inducido. Los relés gobiernan los contactores, que a su vez irán cortocircuitando las resistencias de arranque.

El arrancador que utiliza *relés de f. c. e. m.* en paralelo con el inducido, actúa en función de la velocidad que adquiere el motor. A medida que va aumentando la tensión en bornes del inducido, se activarán los relés y excitarán a los contactores para eliminar resistencias. En el esquema de la figura 15.9 al acelerarse el motor, aumenta la f. c. e. m. y actuarán progresivamente los tres relés, eliminando las resistencias R_1, R_2 y R_3, a través de tres contactores.



1, 2, 3: relés de f. c. e. m.

Fig. 15.9 Arrancador de tipo f. c. e. m. en un motor derivación.

15.2.1.4 *Reóstatos de arranque automáticos de tiempo fijo*

A diferencia de los arrancadores que controlan la corriente del inducido, los arrancadores de tiempo fijo utilizan relés temporizados, que funcionan independientemente de las características del motor.

El arrancador de tiempo fijo es adecuado cuando el motor realiza ciclos de trabajo repetitivos.

Los dispositivos que actúan sobre los contactores cortocircuitando resistencias, son muy variados: temporizadores neumáticos, relés amortiguadores de aceite, temporizador mecánico de relojería, contactores de retardo, etc.

En la figura 15.10A se muestra el esquema de motores serie y en la 15.10B en derivación, con eliminación de las resistencias R_1 y R_2 en el arranque. En la figura 15.11 se indica el esquema funcional común a los dos motores.

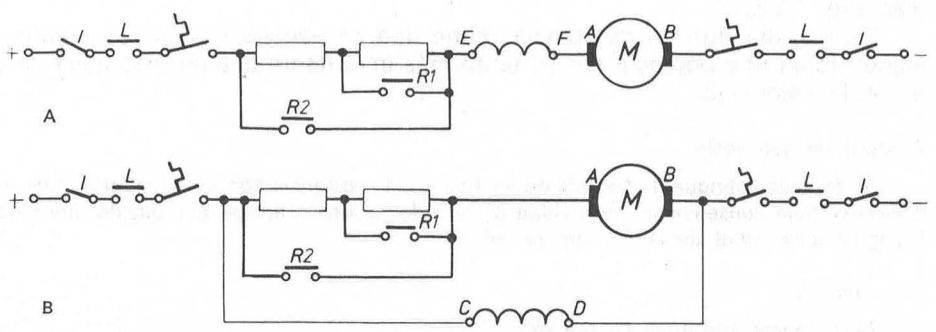


Fig. 15.10 Arrancadores automáticos de tiempo fijo para motores: A, *motor serie;* B, *motor derivación.*

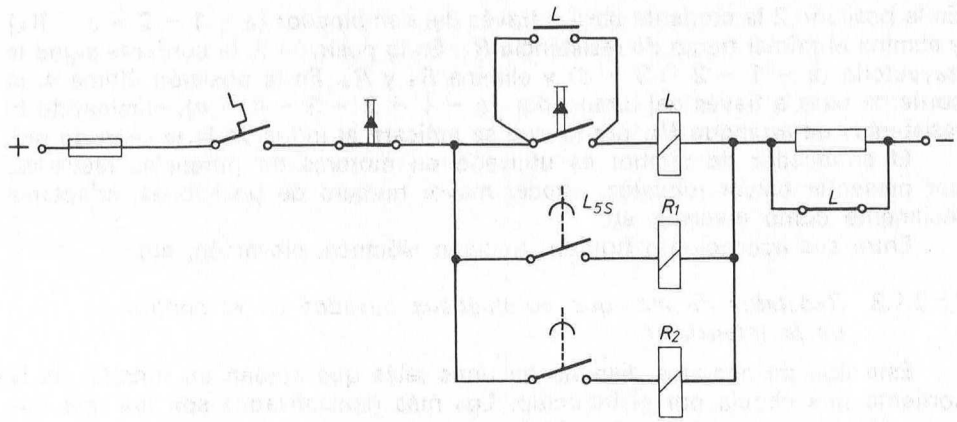


Fig. 15.11 Circuito de mando correspondiente a los motores serie y derivación.

15.3 Sistemas utilizados para la regulación de la velocidad

Recordando la ecuación general de la velocidad de un motor de c. c. (ver Tema 11), era:

$$N = K \cdot \frac{V_b - (R_i \cdot I_i)}{\Phi}$$

en donde:

V_b = tensión aplicada al inducido
Φ = flujo inductor
N = velocidad de rotación del motor

Esta expresión indica que la regulación de la velocidad de un motor de c. c. puede hacerse actuando sobre la *tensión aplicada al inducido* o bien variando el *flujo inductor,* ya que el término $R_i \cdot I_i$ es muy pequeño y no modifica prácticamente la ecuación.

A su vez, la regulación de la tensión aplicada al inducido puede hacerse por:

a) *control reostático* en el circuito inducido;
b) *por acoplamiento entre motores;*
c) *grupo Ward-Leonard;*
d) *por gobierno electrónico.*

La regulación del flujo inductor puede conseguirse por:

a) *control reostático* en el circuito inductor;
b) *por gobierno electrónico.*

El gobierno electrónico, en ambos casos, se explicará a continuación de los restantes sistemas de regulación.

15.3.1 *Control reostático en el inducido*

La regulación de la tensión se consigue disponiendo de una resistencia regulable en serie con el inducido, pudiendo servir para ello el reóstato de arranque (fig. 15.8).

La introducción de resistencias tiene una *desventaja,* ya que se pierde por efecto Joule una potencia $R \cdot I^2$, tanto más importante cuanto más haya de variarse la velocidad.

Ejercicio de aplicación

Se trata de averiguar la pérdida de energía en la resistencia conectada en serie con el inducido si, para conseguir una velocidad *N,* ha sido necesario aplicar al inducido una tensión V_1, igual a la mitad de la tensión de red.

Solución:

La potencia absorbida de red es:

$$P = V_b \cdot I$$

La potencia consumida en la resistencia:

$$P_1 = V_1 \cdot I = \frac{V_b}{2} \cdot I = \frac{1}{2} \cdot P$$

O sea, se pierde el 50 % de la potencia en el reóstato.

15.3.1.1 *Cálculo del reóstato intercalado en el inducido*

Manteniendo la corriente absorbida constante, o sea, a *potencia constante,* el valor que toma la resistencia de cada paso se determina aplicando la siguiente fórmula:

$$\boxed{R_1 = \frac{E'}{N \cdot I} \cdot (N - N_1)}$$

$$\boxed{R_2 = \frac{E'}{N \cdot I} \cdot (N_1 - N_2)}$$

$$\boxed{R_3 = \frac{E'}{N \cdot I} \cdot (N_2 - N_3)}$$

y así sucesivamente; en donde:

N_1, N_2, N_3, . . . = reducciones de velocidad
R_1 = 1.ª resistencia a intercalar
E' = f. c. e. m. nominal
N = velocidad nominal

Ejercicio de aplicación

Utilizando el motor derivación del ejercicio anterior (15.1.1), si la velocidad nominal es de 1 000 r. p. m., averiguar:

1.º Las velocidades, según los pasos de resistencias intercalados. Tómese:

$$2\ U_e = 2\ V$$

2.º El diagrama de la corriente del inducido en función de la velocidad durante el arranque.

Solución:

1.º En este caso, se partirá del funcionamiento en régimen normal, girando a 1 000 r. p. m., y se irán eliminando las resistencias parciales para disminuir la velocidad, por lo que se sigue un procedimiento inverso al arranque y, por tanto, la última resistencia que era R_7, será ahora R_1; R_6 será R_2; y así, sucesivamente.

Según la fórmula de la resistencia en función de la velocidad:

$$R_1 = \frac{E'}{N \cdot I} (N - N_1)$$

$$N - N_1 = R_1 \cdot \frac{N \cdot I}{E'}$$

$$\boxed{N_1 = N - (R_1 \cdot K)}$$

en donde:

$$K = \frac{N \cdot I}{E'}$$

A su vez:

$$R_1 = 0{,}05\ \Omega$$

$$E' = V_b - (R_i \cdot I_i) - 2\ U_e = 220 - (0{,}1 \times 100) - 2 = 208\ V$$

$$K = \frac{N \cdot I}{E'} = \frac{1\,000 \times 100}{208} = 480{,}76$$

Al sustituir en la expresión de N_1:

$$N_1 = 1\,000 - (0{,}05 \times 480{,}76) = 976\ \text{r. p. m.}$$

A su vez, el valor de N_2 si $R_2 = 0{,}06\ \Omega$, será:

$$N_2 = N_1 - (R_2 \cdot K) = 976 - (0{,}06 \times 480{,}76) = 947 \text{ r. p. m.}$$

El valor de N_3 ($R_3 = 0{,}09\ \Omega$), será:

$$N_3 = N_2 - (R_3 \cdot K) = 947 - (0{,}09 \times 480{,}76) = 903{,}8 \text{ r. p. m.}$$

Los restantes valores se determinan de forma similar; tomando las resistencias los valores: $R_4 = 0{,}15\ \Omega$, $R_5 = 0{,}215\ \Omega$, $R_6 = 0{,}325\ \Omega$ y $R_7 = 0{,}49\ \Omega$, se obtienen los siguientes resultados:

$N_4 = 832$ r. p. m.; $N_5 = 728$ r. p. m.; $N_6 = 572$ r. p. m.; $N_7 = 336$ r. p. m.

2.° Según los resultados obtenidos para las velocidades parciales, el diagrama se obtendrá representando, en el eje de abscisas, la velocidad adquirida en cada paso y, en ordenadas, la variación de corriente que tiene lugar al eliminar una resistencia, como se indica en el diagrama de la figura 15.12.

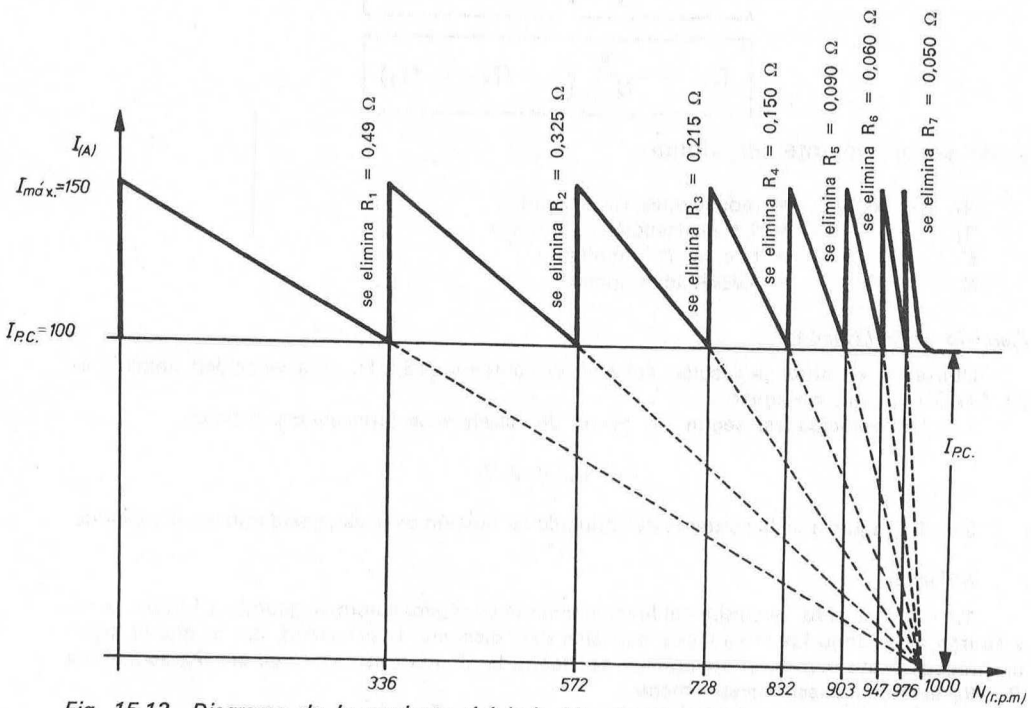


Fig. 15.12 Diagrama de la corriente del inducido durante el arranque.

15.3.2 *Regulación por acoplamiento de motores*

Este sistema es apropiado para los servicios que necesiten de varios motores como ocurre en tracción eléctrica.

Así, una locomotora que dispone de seis motores serie emplea las conexiones siguientes:

a) *Serie.* En la que permanecen los 6 motores acoplados en serie (figura 15.13), por lo que a cada motor se aplicará 1/6 de la tensión de red, y los motores girarán a la velocidad más reducida. Ejemplo: en líneas de 3 000 V, la tensión aplicada a cada motor será de 500 V.

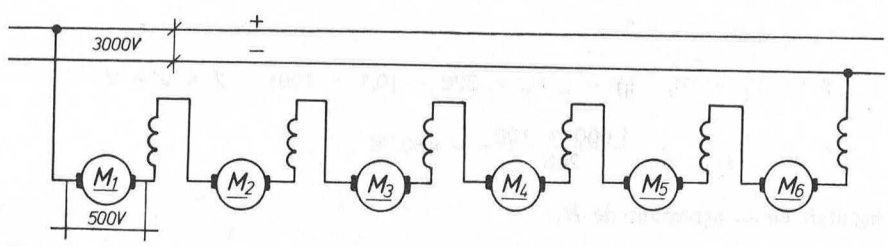


Fig. 15.13 Acoplamiento de seis motores (tipo serie) en serie.

b) *Serie-paralelo.* Formada por dos ramas de 3 motores en serie, y éstas a su vez en paralelo (fig. 15.14). La tensión aplicada a cada motor será de 1/3 de la tensión de red, por lo que el motor girará a mayor velocidad que en el caso anterior. Ejemplo: para tensión de línea de 3 000 V, se aplicará a cada motor 1 000 V.

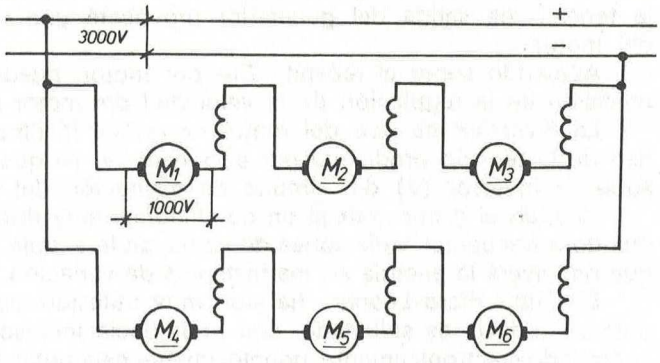


Fig. 15.14 Acoplamiento de seis motores (tipo serie) en serie-paralelo.

c) *Paralelo.* Formada por 3 ramas de 2 motores en serie, y éstas a su vez en paralelo (fig. 15.15). La tensión que se aplica a cada motor es 1/2 de la tensión de red. Ejemplo: 1 500 V. La velocidad en esta conexión será, pues, la más rápida de las tres, y corresponde a la marcha normal.

El acoplamiento denominado *en paralelo,* en realidad, es un acoplamiento mixto, ya que en el verdadero acoplamiento en paralelo la tensión aplicada a cada motor coincide con la de red; en el ejemplo anterior sería, pues, de 3 000 V, si bien esta tensión complicará la construcción del motor.

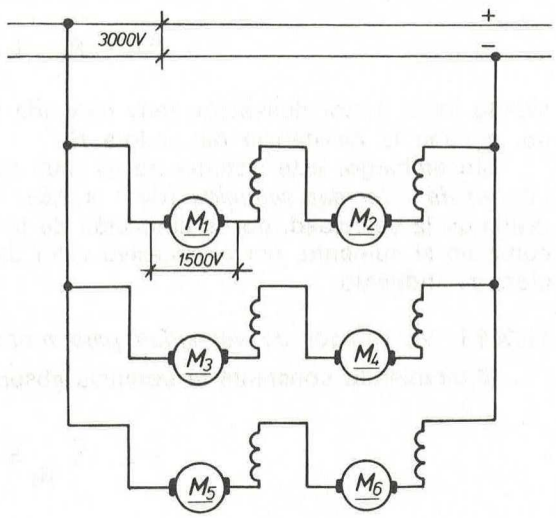


Fig. 15.15 Acoplamiento de seis motores (tipo serie) en paralelo.

15.3.3 *Grupo Ward-Leonard*

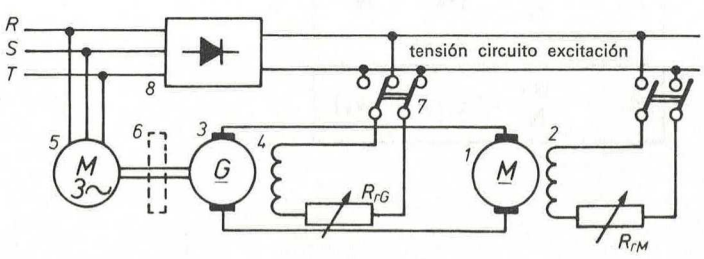
Es un sistema para regular la velocidad, por variación de tensión, muy utilizado principalmente para trabajos duros, que consume potencias elevadas.

El grupo *Ward-Leonard* (fig. 15.16), está compuesto por las siguientes máquinas:

a) Grupo convertidor c. a./c. c., compuesto por un motor trifásico de c. a. y un generador de c. c. de excitación independiente.

b) El motor de c. c. o de trabajo, de excitación independiente.

c) Una excitatriz para alimentar los circuitos de excitación, si bien en la figura se ha sustituido por un rectificador, por ser este último el que ha reemplazado ventajosamente a la excitatriz.



1 motor de c. c. a controlar
2 excitación independiente del motor
3 generador de c. c.
4 excitación independiente del generador
5 motor arrastre de c. a.
6 volante de inercia
7 inversor del circuito de excitación del generador
8 rectificador

Fig. 15.16 Grupo Ward-Leonard.

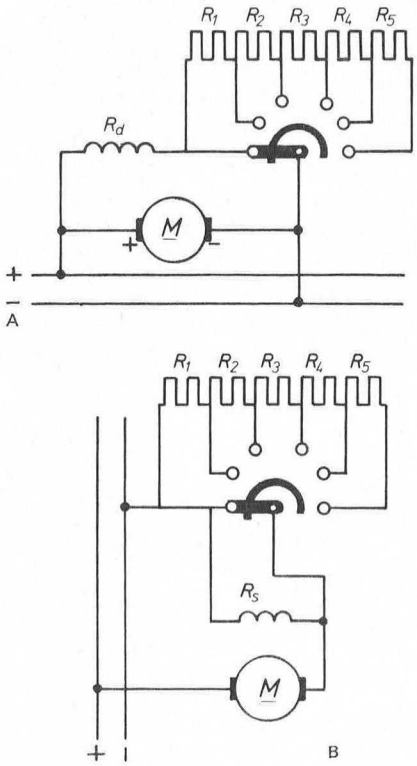


Fig. 15.17 Regulación de campo inductor: A, *motor derivación;* B, *motor serie.*

15.3.3.1 *Funcionamiento*

El motor a controlar (1) es alimentado por el generador (3) que, a su vez, es movido por el motor de arrastre de c. a. (5).

El control de la tensión que se aplica al motor (1), se realiza por el circuito de excitación (4) del generador, variando el reóstato R_{rG}. Una variación de la tensión de salida del generador provocará una variación de la velocidad del motor.

Actuando sobre el reóstato R_{rM} del motor, puede conseguirse una mayor precisión en la regulación de la velocidad del motor de c. c.

La *inversión de giro* del motor se realiza fácilmente invirtiendo la polaridad de la tensión producida por el generador, ya que sólo es necesario actuar sobre el inversor (7) del circuito de excitación del generador.

Cuando el grupo trabaja en condiciones muy duras de servicio, y está sometido a frecuentes variaciones de carga, se le acopla un volante de inercia (6), que devolverá la energía en los instantes de variación y evitará las oscilaciones.

El grupo Ward-Leonard ha sido muy utilizado especialmente para trabajos duros y todavía es solicitado, con preferencia incluso, sobre el motor de c. c. controlado electrónicamente, principalmente para potencias superiores a 1 000 CV.

15.3.4 *Regulación del flujo inductor*

Según la expresión de la velocidad, ésta puede variar en razón inversa al flujo, de forma que otro procedimiento de regular la velocidad de un motor es *variando la corriente de excitación.*

La variación de corriente de excitación se logra intercalando un reóstato en serie con el devanado de campo en el motor derivación, y en paralelo en el motor serie (fig. 15.17).

Este sistema de regulación presenta las ventajas de sencillez de realización y de reducido consumo, ya que las pérdidas por efecto Joule son:

$$P_J = R_r \cdot I_{ex.}^2$$

siendo en el motor derivación muy reducida la corriente $I_{ex.}$ y, en el motor serie, mínima la resistencia desviadora R_r.

Sin embargo, este sistema no es muy utilizado, por ofrecer una *gama de control de velocidad reducida* (de 1 a 2,5). Este inconveniente surge, tanto al disminuir la velocidad, por la limitación de la saturación del circuito magnético, como en el aumento, por el excesivo valor de corriente y la consiguiente reacción de inducido.

15.3.4.1 *Acelerador de velocidad para motores derivación*

Manteniendo constante la potencia absorbida, también lo será la corriente:

$$I = \frac{V - E'}{R_i}$$

por lo que el valor de la f. c. e. m. habrá de permanecer constante, y el aumento de velocidad se conseguirá por disminución del flujo inductor, de forma que el producto se mantenga constante:

$$E' = K \cdot N \cdot \Phi = \text{cte.}$$

$$\boxed{N \cdot \Phi = \text{cte.}}$$

La variación de flujo se obtendrá intercalando resistencias en serie con el devanado de excitación, cuyos valores vendrán dados por las expresiones:

$$\boxed{R_1 = \frac{R_d}{N} \cdot (N_1 - N)}$$

$$\boxed{R_2 = \frac{R_d}{N} \cdot (N_2 - N_1)}$$

en donde:

R_d = resistencia del campo
R_1 = 1.ª resistencia a intercalar
R_2 = 2.ª resistencia a intercalar
N = velocidad nominal
N_1 = 1.ª velocidad inmediata superior
N_2 = 2.ª velocidad inmediata superior

Ejercicio de aplicación

Calcular un reóstato acelerador para un motor derivación, cuya velocidad nominal es de 1 000 r. p. m., para que aumente un 5, 8, 10, 12 y 15 % de la nominal. La resistencia del devanado de campo es de 100 Ω.

Solución:

Las resistencias de los diferentes pasos serán (fig. 15.17A), para las velocidades:
N_1 = 1 050 r. p. m.:

$$R_1 = \frac{R_d}{N} \cdot (N_1 - N) = \frac{100}{1\,000} (1\,050 - 1\,000) = 5\ \Omega$$

N_2 = 1 080 r. p. m.:

$$R_2 = \frac{R_d}{N} \cdot (N_2 - N_1) = \frac{100}{1\,000} (1\,080 - 1\,050) = 3\ \Omega$$

N_3 = 1 100 r. p. m.:

$$R_3 = \frac{100}{1\,000} \times (1\,100 - 1\,080) = 2\ \Omega$$

N_4 = 1 120 r. p. m.:

$$R_4 = \frac{100}{1\,000} \times (1\,120 - 1\,100) = 2\ \Omega$$

N_5 = 1 150 r. p. m.:

$$R_5 = \frac{100}{1\,000} \times (1\,150 - 1\,120) = 3\ \Omega$$

Comprobación:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = \frac{R_d}{N} \cdot (N_5 - N_1) = \frac{100}{1\,000} (1\,150 - 1\,000) = 15\ \Omega$$

15.3.5 *Comparación de sistemas de regulación*

La regulación de velocidad conseguida al actuar sobre el flujo inductor se denomina *a potencia constante,* ya que la potencia cedida por el motor viene dada por la expresión:

$$P_{máx.} = M \cdot N = K \cdot \Phi \cdot I \cdot N$$

y tanto la tensión como la intensidad se mantienen constantes, para no aumentar por encima del valor fijado por el constructor. De esta forma, un aumento de velocidad estará compensado por una disminución de flujo y viceversa.

La regulación de velocidad conseguida al actuar sobre la tensión del inducido se denomina *a par constante,* ya que la expresión del par es:

$$M = K \cdot \Phi \cdot I$$

y permanecen constantes la corriente absorbida I y el flujo Φ. La variable será la potencia cedida, y su variación será según una recta, por ser:

$$P = I \cdot V = \boxed{K \cdot V}$$

en donde: I = cte.

El motor de *excitación independiente* es el más adecuado para cualquier tipo de regulación, por la independencia entre el control por el inductor y el control por el inducido, pudiendo incluso disponer de los dos sistemas de regulación. Por ejemplo, desde el arranque hasta una determinada velocidad, el control se hace sobre el inducido (a par constante); y por control de excitación, a partir de ésta (a potencia constante), como se indica en la figura 15.18.

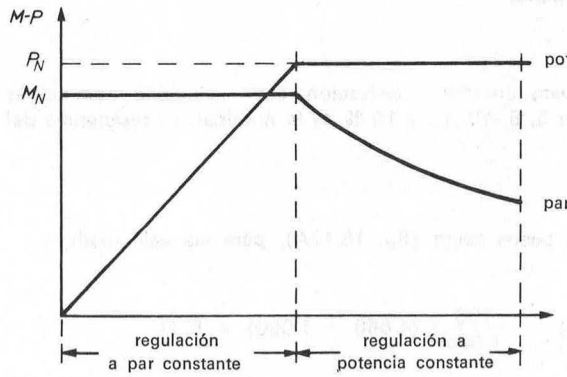


Fig. 15.18 Regulación de velocidad mixta.

El motor *derivación* no es muy adecuado para la regulación de la velocidad, si bien se utiliza la regulación a par constante en un margen reducido (de 1 a 4). También en alguna ocasión se utiliza la regulación por control del inducido, siendo el funcionamiento entonces similar al del motor de excitación independiente.

El motor *serie* permite las regulaciones sobre el campo y sobre la tensión del inducido, aunque de por sí el motor se ajusta automáticamente a las necesidades del momento en cuanto a par y velocidad, manteniendo la potencia prácticamente constante.

Finalmente, del motor *compound* cabe añadir que su control de velocidad será el resultante de actuar sobre los circuitos derivación y serie.

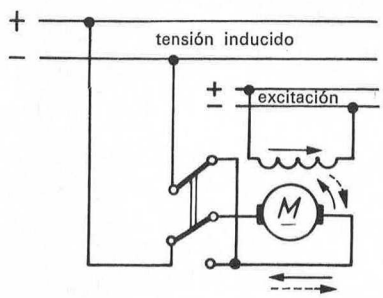


Fig. 15.19 Inversión en el sentido de giro por cambio de sentido en la corriente del inducido.

15.4 Inversión del sentido de marcha de un motor

A veces es necesario que los motores puedan girar indistintamente, bien en un sentido, o en el contrario, es decir, que puedan efectuar el cambio del sentido de su marcha: tal ocurre en los motores de tracción de las locomotoras, en grúas, etc.

Existen dos formas de invertir el sentido de giro:

a) Cambiando el sentido de la *corriente en el inducido* (fig. 15.19).

b) Cambiando el sentido de la *corriente en el circuito de excitación* (figura 15.20).

Si se cambia, *a la vez,* el sentido de la corriente en el inducido y en el circuito de excitación, *no se producirá inversión de giro* del motor (regla de la mano izquierda).

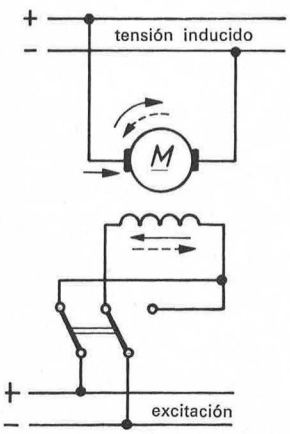


Fig. 15.20 Inversión del sentido de giro por cambio de sentido en la corriente de excitación.

15.4.1 *Inversión del sentido de giro en el motor de excitación independiente*

Para invertir el sentido de giro, es suficiente cambiar o el sentido de la corriente de excitación (fig. 15.20) o el sentido de la corriente del inducido (figura 15.19), siendo ésta una de las ventajas que caracterizan este tipo de motor.

La inversión puede hacerse de *forma manual* o *automática.*

15.4.1.1 *Inversión manual*

Para realizar la inversión, es necesario cortar la alimentación, comprobar que el motor está parado y suministrar alimentación con la polaridad invertida.

Para evitar que la inversión se produzca antes de que el motor esté parado, es conveniente dotar al circuito de sistemas de bloqueo (ejemplo: relé o retardador), que no permitan el arranque del motor con velocidad invertida, hasta que no esté completamente parado.

Este sistema presenta el inconveniente de su lentitud, si bien se puede mejorar el tiempo, frenando el motor.

15.4.1.2 *Inversión automática*

Consiste en suministrar la información que necesite el sistema de control, que realizará las operaciones de reducción de velocidad, parar el motor, arrancar en sentido inverso, alcanzar la velocidad que requiera el motor y, por tanto, la máquina accionada.

15.4.2 *Inversión de sentido de giro en el motor derivación*

La inversión de giro en este motor es más difícil, ya que se han de cambiar solamente las conexiones del inducido, y a ser posible, a motor parado (fig. 15.21).

Si la inversión se produce en el circuito de excitación, podría ocurrir que el motor se quedase en algún momento con el circuito inductor abierto, con el consiguiente peligro de un embalamiento, por ser nulo el flujo.

La inversión en el circuito de excitación también arrastra el inconveniente de la apertura de un circuito muy inductivo, por serlo el devanado de campo.

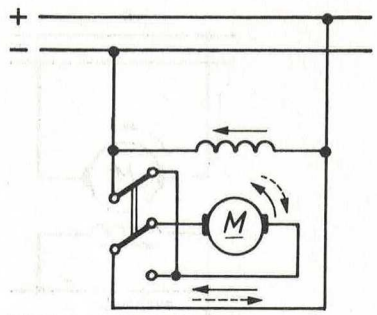


Fig. 15.21 Inversión de sentido de giro en un motor derivación.

15.4.3 *Inversión del sentido de giro en el motor serie*

El sentido de giro se invierte normalmente cambiando el sentido de la corriente en el devanado de excitación, si bien es una operación bastante compleja porque se trata de conmutar la corriente absorbida por el motor.

Para evitar una inversión brusca, que pudiera perjudicar al motor, se debe proceder, en primer lugar, a cortar la corriente, y una vez parado el motor, con el reóstato de arranque intercalado, se maniobra el conmutador inversor y se actúa de nuevo sobre dicho reóstato para hacer arrancar al motor en sentido contrario.

En la figura 15.22 se indica el esquema correspondiente a la inversión de giro de un motor serie actuando sobre el inducido.

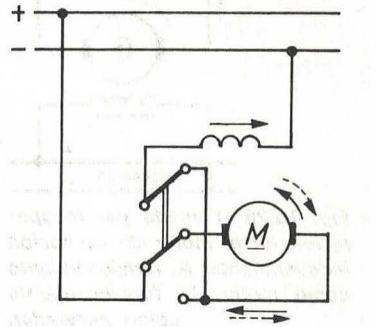


Fig. 15.22 Inversión del sentido de giro en un motor serie.

15.4.4 *Inversión del sentido de giro en el motor compound*

En el motor compound se agrupan los devanados serie y derivación, por lo que, en caso de inversión, habrá de hacerse en ambos devanados, o bien actuar sobre el inducido, que será el método más sencillo (fig. 15.23).

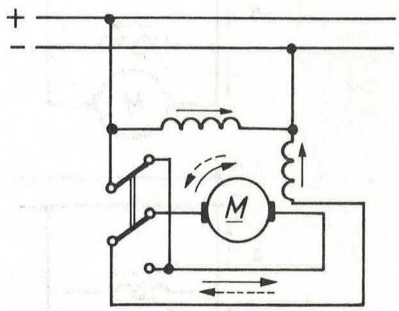


Fig. 15.23 Inversión del sentido de giro en un motor compound.

15.5 Frenado eléctrico del motor de c. c.

Son numerosas las instalaciones donde el frenado juega un papel muy importante. Así, en el caso de gran frecuencia de arranques y paros, éste último debe ser rápido, para evitar pérdida de tiempo.

En otras ocasiones, será necesario conseguir el paro del motor rápidamente, por causa de una emergencia, como es el caso de tracción eléctrica, máquinas de elevación, etc.

En general, los sistemas de frenado se agrupan en tres tipos:

a) Frenado dinámico o reostático.
b) Frenado con recuperación de energía.
c) Frenado por inversión de corriente.

15.5.1 *Frenado dinámico*

Para frenar un motor, el sistema más simple consiste en transformar toda la energía cinética que posee la máquina en energía eléctrica y disiparla en forma de calor sobre una resistencia; para ello, se le desconectará de la red de alimentación a la vez que se conectará sobre la resistencia.

En el instante de iniciar el frenado, los contactores interrumpen el circuito del inducido (fig. 15.24), y conectan en paralelo con el mismo inducido una resistencia de bajo valor. En estas condiciones, y siempre que el flujo siga existiendo, el motor se comporta como un generador, cuyo rotor gira debido a la energía cinética de la máquina (ver Tema 11).

Con este sistema pueden obtenerse frenados bastante eficaces y, para valores bajos de resistencia, frenados peligrosos.

Este tipo de frenado presenta algún inconveniente, como es el no poder disipar toda la energía almacenada en algunos casos y, principalmente, el perder la eficacia una vez pasados los primeros instantes, por ser necesario disminuir progresivamente el valor de la resistencia.

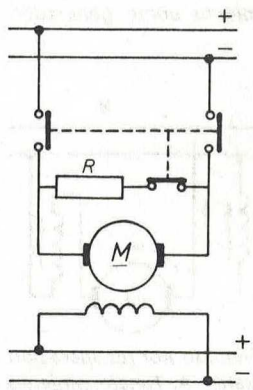


Fig. 15.24 Frenado dinámico de un motor.

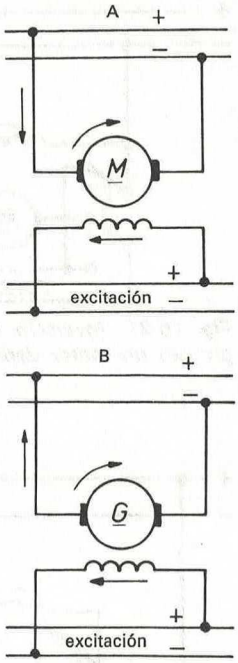


Fig. 15.26 Frenado por recuperación en el motor de excitación independiente: A, *funcionamiento como motor;* B, *funcionamiento como generador.*

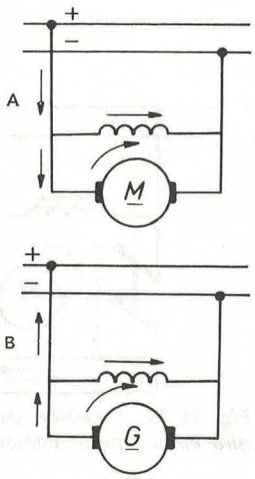


Fig. 15.27 Frenado por recuperación en el motor derivación: A, *funcionamiento como motor;* B, *funcionamiento como generador.*

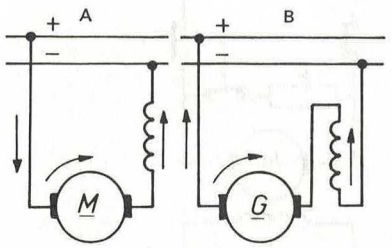


Fig. 15.28 Frenado por recuperación en el motor serie: A, *funcionamiento como motor;* B, *funcionamiento como generador.*

15.5.1.1 *Aplicación del frenado dinámico a los diversos tipos de motores*

En el motor de *excitación independiente* el frenado dinámico, además de posible, es muy sencillo de realizar (fig. 15.24).

En el motor de *excitación en derivación* no puede conseguirse el frenado dinámico ya que, al interrumpir la tensión, desaparece la excitación (se recuerda que existe una resistencia exterior mínima para el funcionamiento estable de un generador derivación. (Ver Tema 9). Sin embargo, podrá conseguirse el frenado dinámico si se desconecta de la red solamente el circuito del inducido y se mantiene conectado el circuito de excitación, siendo entonces su comportamiento similar al motor de excitación independiente.

Para conseguir el frenado dinámico en el *motor serie,* además de desconectarlo de la red de alimentación, es necesario invertir el sentido de la corriente de excitación (excepto si se produce inversión de giro) y, finalmente, conectar las resistencias de frenado (fig. 15.25).

En el *motor compound* puede conseguirse el frenado dinámico cuidando de no invertir la corriente en el circuito de excitación.

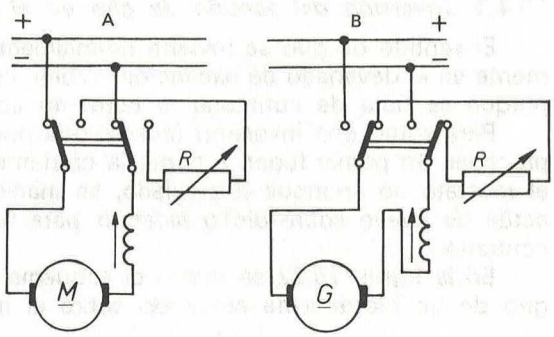


Fig. 15.25 Frenado dinámico del motor serie: A, *funcionamiento como motor;* B, *funcionamiento como generador con inversión de campo.*

15.5.2 *Frenado por recuperación*

Tiene lugar cuando la f. c. e. m. (E') se hace mayor que la tensión de alimentación (V), con la consiguiente inversión de corriente del inducido:

$$I_i = \frac{V - E'}{R_i} = -\left(\frac{E' - V}{R_i}\right)$$

por ser $E' > V$.

Cuando sucede que $E' > V$, el motor pasa a funcionar automáticamente como generador y *devuelve energía a la red.* En definitiva, cualquier motor de c. c. al que se le suministre energía mecánica, si sigue girando en el mismo sentido que cuando funcionaba como motor produce, entre sus bornes, una tensión que es de sentido contrario a la que antes se aplicaba (fig. 15.26).

Un ejemplo donde se da el frenado por recuperación es en tracción eléctrica: al descender el tren por una pendiente, almacena una energía cinética, que depende de su velocidad y del peso del conjunto formado por la máquina y carga remolcada, que tiende a aumentar su velocidad. Un procedimiento para evitar la aceleración del motor, es absorber los motores de tracción parte de la energía del tren y transformarla en eléctrica, al devolverla a la línea, donde habrá conectadas otras locomotoras.

15.5.2.1 *Aplicación del frenado por recuperación a los diversos tipos de motores*

En el motor de *excitación independiente* el frenado por recuperación se realiza automáticamente y, una vez que ha disminuido la velocidad a un valor determinado, seguirá funcionando como motor.

En el *motor derivación* el comportamiento es similar al de excitación independiente (fig. 15.27), ya que la inversión de corriente afectará al inducido pero no al circuito de excitación.

En el *motor serie* la recuperación es más compleja, ya que ha de invertirse la corriente en el circuito de excitación, para que siga girando en el mismo sentido que tenía como motor (fig. 15.28). Además de otro inconveniente mayor, que es la dificultad para que la f. c. e. m. sea superior a la tensión en bornes:

$$E' = K \cdot \Phi \cdot N$$

A medida que aumenta la velocidad del motor, disminuye el par motor y la corriente del inducido y, por tanto, también el flujo inductor, con la consiguiente dificultad para que aumente la f. c. e. m.

El sistema que se utiliza en estos casos (tracción eléctrica), es hacer funcionar al motor serie con excitación independiente, proporcionada por una excitatriz, en la marcha en recuperación.

En el *motor compound,* para evitar los problemas que surgen en la excitación serie, se actúa solamente sobre el devanado derivación y se desconecta el devanado serie.

15.5.3 *Frenado por inversión de corriente*

Cuando sea preciso realizar una parada del motor muy brusca, se invierte la tensión aplicada al inducido (V) y la corriente será ahora:

$$I = \frac{V - E'}{R_i} = \frac{-V - E'}{R_i} = -\frac{(V + E')}{R_i}$$

en donde:

E' = f. c. e. m., que no cambia de sentido

Este valor tan elevado obtenido para la corriente dará lugar a un par de frenado muy brusco.

Dado el efecto perjudicial para el motor, del frenado por inversión, solamente se utilizará en alguna emergencia, como puede ocurrir en tracción eléctrica, grúas, montacargas, etc.

Normalmente, el frenado por inversión o contracorriente solamente se realiza en el motor serie.

Ejercicio de aplicación

Un motor serie utilizado en tracción absorbe 100 kW a 440 V, siendo sus resistencias interior y de campo de 0,45 y 0,05 Ω, respectivamente, Determinar la corriente que absorberá de la red, al invertirse la tensión aplicada al inducido en un frenado a contracorriente.

Solución:

La corriente absorbida normalmente es:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{100\,000}{440} = 227 \text{ A}$$

La f. c. e. m. es:

$$E' = V - (R_i + R_s) \cdot I = 440 - (0{,}45 + 0{,}05) \times 227 = 326{,}5 \text{ V}$$

La corriente que aparece en la inversión será:

$$I = -\frac{(V + E')}{R_i + R_s} = -\frac{440 + 326{,}5}{0{,}45 + 0{,}05} = -1\,533 \text{ A}$$

Este excesivo valor de corriente sería peligroso para el motor, por lo que habrá de evitarse en lo posible.

15.6 **Control electrónico del motor de c. c.**

Al examinar los diferentes tipos de motor de c. c., se advierte que sus características no corresponden a las de un motor ideal.

Los controles electrónicos tienen como fin el *mejorar estas características* acercándolas lo más posible a las ideales.

Las principales regulaciones por sistema electrónico que pueden efectuarse en un motor de c. c., son:

a) Regulación de la velocidad.
b) Regulación del par suministrado.
c) Limitación de la corriente máxima en el arranque.
d) Inversión del sentido de giro.
e) Frenado.

A los sistemas que producen todas o parte de las regulaciones citadas para un motor de c. c., se les da el nombre, en Electrónica Industrial, de *accionamiento.*

De los diferentes tipos de motores de c. c., el de *excitación independiente* es el que mejor se adapta para ser controlado por sistemas electrónicos, y por ello es el más utilizado.

Para completar el estudio del control del motor de c. c., se explicará el control electrónico de un motor de c. c. mediante esquema de bloques (ver apartado 14.7).

15.6.1 *Esquema de bloques correspondiente al accionamiento del motor de c. c.*

El esquema de bloques de la figura 15.29 muestra todos los elementos que pueden aparecer en un accionamiento para un motor de c. c. de excitación independiente. Los bloques representan, respectivamente:

1 Transformador principal de alimentación.
2 Motor de c. c. con dínamo taquimétrica acoplada por el eje.
3 Convertidor de c. a. en c. c. para el circuito del inducido.
4 Convertidor de c. a. en c. c. para el circuito de excitación.
5 Circuito de disparo de los SCR (tiristores).
6 Tensión de referencia.
7 Amplificador de error.
8 Limitador de corriente.

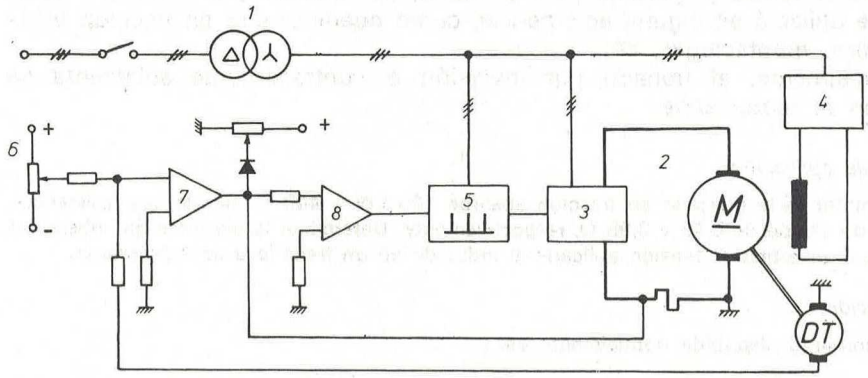


Fig. 15.29 Esquema a bloques de un variador electrónico de velocidad para motores de c. c.

15.6.2 *Funcionamiento*

Al cerrar el interruptor general, se conecta el primario del transformador a la red, por lo que el secundario suministrará la tensión exigida por el motor, tanto por el lado del inducido (3 y 5) como por el inductor (4).

La tensión aplicada al inductor ha sido previamente rectificada por medio del convertidor (4).

Una vez alimentados el inductor y el inducido del motor, se pondrá en marcha y, para evitar que la corriente de arranque alcance valores peligrosos, actuará el limitador de corriente (8).

Establecida la marcha normal del motor, será la dínamo taquimétrica la que controlará en cada momento la velocidad del motor, por estar acoplada directamente a él. En realidad la dínamo taquimétrica genera una tensión directamente proporcional a la velocidad del motor (N):

$$E = K \cdot \Phi \cdot N$$

en donde Φ = cte., por ser producido por imanes permanentes, por lo que:

$$\boxed{E = K_1 \cdot N}$$

La tensión generada por la dínamo es comparada con la tensión de referencia (6) (tensión patrón) y amplificada en el amplificador de error (7), pasando a controlar el circuito de disparo de los tiristores (5), que es quizá la parte más delicada del sistema.

El circuito de disparo (5) controla en cada instante la tensión que ha de aplicarse al inducido, a través del convertidor (3).

En resumen, este control se realiza a *par constante,* permaneciendo constante el flujo inductor, por lo que el convertidor (4) puede ser un puente normal de rectificación, bien monofásica o trifásica.

Si interesa realizar el control, además de a par constante, también a potencia constante, será necesario disponer de un puente semicontrolado en el convertidor (4), como indica la figura 15.30.

El estudio completo del accionamiento corresponde a la especialidad de Electrónica Industrial.

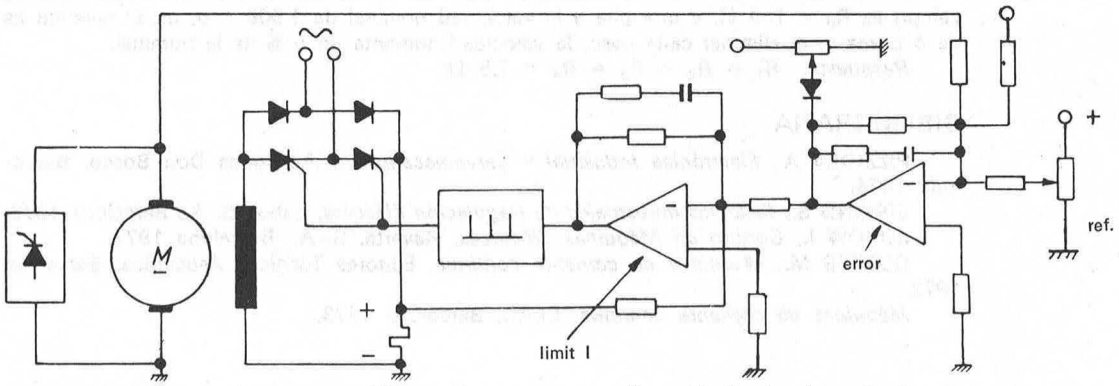


Fig. 15.30 Esquema de un convertidor c. a./c. c. correspondiente al circuito de excitación de un motor de c. c.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Ventajas e inconvenientes de los arrancadores manuales.
— Aplicaciones de los grupos Ward-Leonard.
— Características de la dínamo taquimétrica.
— Ventajas del control electrónico de motores de c. c., frente al control eléctrico.

CUESTIONARIO

15.1 Explicar, en un mismo diagrama, las gráficas: intensidad en función de la velocidad y velocidad en función del tiempo, correspondientes ambas al período de arranque de un motor derivación.

15.2 Utilización de los reóstatos metálicos y líquidos.

15.3 ¿Qué inconvenientes presenta el arranque de un motor derivación con excesivo valor de resistencia en el circuito de excitación? ¿Cuál es el tipo de arrancador manual más idóneo?

15.4 Representar el esquema de un arrancador-regulador de velocidad manual, con 8 escalones en cada uno, correspondiente a un motor derivación.

15.5 Explicar la regulación de velocidad mediante un grupo elevador-reductor.

15.6 Explicar la regulación de la velocidad en el grupo Ward-Leonard.

15.7 Citar 5 aplicaciones industriales del motor de c. c. donde sea necesaria la inversión del sentido de marcha.

15.8 Explicar el tipo de frenado utilizado en los servicios: tracción eléctrica y grúas elevadoras.

15.9 Representar y explicar el frenado dinámico de dos motores serie funcionando como generadores en derivación.

15.10 Explicar el funcionamiento del grupo Ward-Leonard con dínamo taquimétrica y control electrónico.

15.11 Un motor serie absorbe 120 A al aplicarle una tensión de 270 V. Las resistencias interior y de campo son: $R_i = 0{,}1\ \Omega$, $R_s = 0{,}03\ \Omega$. Determinar:

1.° La resistencia de arranque según las normas dictadas por el Reglamento Electrotécnico.

2.° El número de pasos del reóstato.

3.° La resistencia de cada paso del reóstato.

Respuestas: 1.ª: $R_A = 1{,}37\ \Omega$; 2.ª: $x = 6$; 3.ª: $R_1 = 0{,}499\ \Omega$, $R_2 = 0{,}336\ \Omega$, $R_3 = 0{,}22\ \Omega$ $R_4 = 0{,}155\ \Omega$, $R_5 = 0{,}1\ \Omega$, $R_6 = 0{,}06\ \Omega$.

15.12 Un motor derivación absorbe 2 kW a 200 V, siendo su resistencia interior del inducido: $R_i = 0{,}5\ \Omega$. Determinar:

1.° La resistencia mínima permitida para el reóstato de arranque.

2.° El número de pasos del reóstato.

3.° La resistencia de cada paso del reóstato.

Respuestas: 1.ª: $R_A = 9{,}5\ \Omega$; 2.ª: $x = 4$; 3.ª: $R_1 = 5\ \Omega$, $R_2 = 2{,}5\ \Omega$, $R_3 = 1{,}25\ \Omega$, $R_4 = 0{,}625\ \Omega$.

15.13 En el motor del ejercicio anterior, la velocidad nominal es de 1 500 r. p. m. Con el resto de los datos del enunciado, determinar:

1.° Las velocidades que corresponden a cada paso del reóstato.

2.° El diagrama de la corriente del inducido en función de la velocidad durante el arranque.

Respuesta: 1 442, 1 346, 1 153 y 769 r. p. m.

15.14 Un motor serie gira a 600 r. p. m., y cuando absorbe de la red 50 A, su f. c. e. m. es de 100 V. Determinar las resistencias a intercalar en serie con el inducido para reducir su velocidad un 20, 30, 40 y 50 % de 600 r. p. m. La corriente absorbida de la red se mantiene constante a cualquier velocidad.

Respuesta: $R_1 = 0{,}4\ \Omega$, $R_2 = 0{,}2\ \Omega$, $R_3 = 0{,}2\ \Omega$, $R_4 = 0{,}2\ \Omega$.

15.15 Calcular un reóstato acelerador para un motor derivación, cuya resistencia de campo es $R_d = 150\ \Omega$, y que gira a la velocidad nominal de 1 500 r. p. m. El reóstato es de 4 pasos y, al eliminar cada paso, la velocidad aumenta un 5 % de la nominal.

Respuesta: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 7{,}5\ \Omega$.

BIBLIOGRAFIA

PIZZIOLA A., *Electrónica Industrial y Servomecanismos,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1974.

SISKIND S., *Sistemas industriales de Regulación Eléctrica,* Labor, S. A., Barcelona 1973.

KOSOW I., *Control de Máquinas Eléctricas,* Reverté, S. A., Barcelona 1977.

CORTES M., *Máquinas de corriente continua,* Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1972.

Máquinas de corriente continua. CEAC, Barcelona 1973.

Tema 16

Pérdidas y rendimiento de las máquinas de corriente continua a partir de los ensayos. Ensayos generales

OBJETIVOS

— *Clasificar las pérdidas producidas en el funcionamiento de una máquina de c. c.*
— *Señalar los ensayos a realizar para determinar las pérdidas constantes (independientes de la intensidad).*
— *Citar los métodos normalizados para determinar el rendimiento de una máquina.*
— *Medir la temperatura alcanzada por una máquina en servicio nominal.*
— *Verificar el grado de aislamiento de una máquina de c. c.*
— *Comprobar si la máquina responde a su placa de características.*

GUION

— Generalidades.
— Pérdidas: su clasificación y determinación.
— Rendimiento de las máquinas de c. c.
— Calentamiento. Ensayo de calentamiento.
— Ensayos de aislamiento.
— Características y ensayos diversos.

PUNTOS CLAVE

— Enumerar las pérdidas producidas en un generador o motor de c. c.
— Distinguir los métodos utilizados para la determinación del rendimiento.
— Comprobar, mediante ensayos, las características generales de funcionamiento de una máquina de c. c.

EXPOSICION DEL TEMA

16.1 Generalidades

La máquina de c. c. transforma potencia mecánica en potencia eléctrica en el generador, o bien, el caso inverso en el motor; aun en el caso de máquinas muy bien construidas y con excelentes materiales, habrá una pérdida de potencia, que producirá efectos perjudiciales para el funcionamiento.

La definición de *pérdidas de una máquina,* según *Norma UNE,* es: potencia disipada durante el funcionamiento de una máquina y que aparece generalmente en forma de calor.

En el tema dedicado al aspecto constructivo de las máquinas de c. c. (Tema 7), se detallaban los diversos materiales utilizados en la fabricación de los elementos constituyentes de la máquina; podían resumirse en:

a) Productos siderúrgicos (hierro, acero, fundición).
b) Materiales conductores eléctricos (cobre, aluminio).
c) Materiales aislantes (plásticos, fibras, telas, mica, etc.).

Cada apartado de materiales dará lugar a sus correspondientes pérdidas, si bien las pérdidas en los materiales aislantes (pérdidas dieléctricas) no se tienen en cuenta, dado su escaso valor.

En todo lo relativo a definición, clasificación y determinación de pérdidas, se seguirá prácticamente, literalmente, lo establecido por las *Normas UNE* 20 116-74 y UNE 21 302 h4, sobre determinación de las pérdidas y rendimiento a partir de los ensayos.

16.2 **Pérdidas: su clasificación y determinación**

Las pérdidas que deben considerarse en una máquina de c. c., son:

a) Pérdidas en el circuito de excitación.
b) Pérdidas constantes (independientes de la intensidad).
c) Pérdidas en carga (dependientes de la intensidad).
d) Pérdidas adicionales en carga.

16.2.1 *Pérdidas en el circuito de excitación*

Son las pérdidas por *efecto Joule* ($R_{ex.} \cdot I_{ex.}^2$) en los circuitos de excitación en derivación o separados y en los reóstatos de excitación. La resistencia del devanado de excitación ha de reducirse a la *temperatura de referencia,* que será de 75 °C para los aislamientos de clases *A*, *E* y *B*, y de 115 °C para los de clases *F* y *H*. La intensidad de excitación es la que corresponde a la velocidad nominal y al régimen nominal.

Las pérdidas en el *reóstato principal* se calculan por la fórmula $R \cdot I^2$, en la que *R* es la resistencia de la parte del reóstato intercalada en el circuito para el régimen considerado, e *I* el valor de la intensidad de excitación nominal.

Si la máquina principal acciona también una excitatriz para alimentar los circuitos de la excitación, también se tendrán en cuenta las *pérdidas de la excitatriz,* a excepción de las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación.

Un ejemplo de utilización de excitatriz es el grupo *Ward-Leonard;* la utiliza para alimentar los circuitos de excitación del generador y motor, ambos de excitación independiente.

16.2.2 *Pérdidas constantes (pérdidas independientes de la intensidad)*

Se dividen en:

a) Pérdidas en el hierro y pérdidas suplementarias en vacío en el resto de las partes metálicas.
b) Pérdidas debidas al rozamiento en los cojinetes y escobillas, excluyendo las pérdidas de un sistema de engrase separado.
c) Pérdidas totales por ventilación en la máquina, incluyendo la potencia absorbida por los ventiladores que forman parte integrante de la misma.

16.2.2.1 *Pérdidas en el hierro*

En condiciones especificadas, que comúnmente se refieren a la marcha en *vacío,* son las pérdidas por *histéresis* y por *corrientes parásitas* en el circuito magnético de la máquina. Las así llamadas pérdidas en el hierro, tal como son medidas habitualmente, incluyen igualmente pérdidas por corrientes parásitas en otras partes metálicas, así como pequeñas pérdidas dieléctricas en el aislamiento.

16.2.2.2 *Pérdidas por histéresis*

Es la potencia consumida a causa de la histéresis en un cuerpo ferromagnético sometido a variaciones del flujo de inducción.

Las pérdidas por histéresis son proporcionales al ciclo de histéresis, que se determinaba mediante la curva de magnetismo (ver apartado 8.5.2).

16.2.2.3 *Pérdidas por corrientes parásitas*

Son las pérdidas debidas a las corrientes parásitas, producidas en las chapas magnéticas que forman el rotor.

Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado del espesor de la chapa, por lo que se elige un valor mínimo de espesor, fijado en 0,5 mm (ver apartado 7.6.1).

Una de las fórmulas que dan la suma de pérdidas en el hierro, por histéresis y por corrientes parásitas, es:

$$P_{hierro} = K \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2$$

en donde:

K = coeficiente de pérdidas totales en el hierro
B = inducción (Gs)
P_{hierro} = pérdidas (W/kg de chapa)

16.2.2.4 *Pérdidas suplementarias*

Son el exceso del total de pérdidas efectivas sobre la suma de las que pueden ser medidas por separado.

16.2.2.5 *Pérdidas mecánicas*

Son las pérdidas por ventilación y pérdidas por frotamiento en los cojinetes y en las escobillas.

16.2.3 *Determinación de las pérdidas constantes*

Las pérdidas constantes se determinan mediante los ensayos siguientes:
a) Ensayo en vacío.
b) Ensayo en circuito abierto.
c) Ensayo de aceleración.

16.2.3.1 *Ensayo en vacío*

Es el ensayo en que una máquina funciona como motor, sin proporcionar potencia mecánica útil en el eje.

Las pérdidas independientes de la intensidad se determinan haciendo girar al motor a la velocidad normal y conectada a la tensión nominal.

La potencia eléctrica total absorbida, menos las pérdidas por efecto Joule ($R \cdot I^2$) en el inducido y en los arrollamientos de excitación, da la *suma de las pérdidas independientes* de la intensidad.

16.2.3.2 *Ensayo en circuito abierto*

Es el ensayo en que una máquina funciona como *generador* con sus bornes en circuito abierto.

Las pérdidas independientes de la intensidad pueden determinarse haciendo funcionar el generador con excitación independiente, y haciéndole girar a su velocidad nominal por medio de un motor tarado.

La potencia que absorbe el generador en su eje coincide con la suma de pérdidas constantes, y se mide por la potencia que absorbe el motor tarado de la red del que se conoce el rendimiento a cualquier carga.

Restando del total de pérdidas independientes de la carga las de excitación, se obtiene la suma de pérdidas por *rozamiento y ventilación.*

16.2.3.3 *Ensayo de aceleración*

Consiste en medir el tiempo empleado por la máquina para su aceleración, en diferentes condiciones, entre dos velocidades predeterminadas; por ejemplo, de 110 % a 90 %, o de 105 % a 95 %, de la velocidad nominal. Este tiempo varía en *sentido inverso* al *valor medio de las pérdidas* durante el mismo tiempo.

Este método permite medir las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el hierro a diferentes excitaciones.

El ensayo de aceleración es adecuado en las máquinas de gran inercia, por dar el margen de tiempo necesario para realizar las mediciones con precisión.

16.2.4 *Pérdidas en carga (pérdidas normales dependientes de la intensidad)*

Se dividen en:

a) Pérdidas por efecto Joule ($R \cdot I^2$) en el inducido y en los arrollamientos recorridos por la intensidad del inducido (por ejemplo: arrollamientos de con-

mutación, de compensación, de excitación, y todos los arrollamientos conectados en serie con el inducido).

b) Pérdidas eléctricas en las escobillas.

16.2.4.1 *Pérdidas por efecto Joule* ($R \cdot I^2$) *en el circuito del inducido*

Estas pérdidas se calculan partiendo de la intensidad y de los valores de resistencias medidas y referidas, por cálculo, a la *temperatura de referencia* (apartado 16.2.1); sin embargo, cuando la medida de resistencias es impracticable, debido a los valores tan pequeños que se manejan, se admite su determinación por cálculo.

Estas pérdidas comprenden igualmente las de los arrollamientos de compensación, las de los polos de conmutación y las resistencias de shuntaje. En el caso de una resistencia de shuntaje en paralelo con un arrollamiento serie, las pérdidas por efecto Joule ($R \cdot I^2$) se determinan partiendo de la intensidad total y de la resistencia resultante.

16.2.4.2 *Pérdidas eléctricas en las escobillas*

La suma de estas pérdidas es igual al producto de la intensidad total por una caída de tensión determinada.

La caída de tensión admitida para todas las escobillas de una misma polaridad es de 1 V para las escobillas de carbón o grafito, y de 0,3 V para escobillas de carbón metalizado; es decir, que:

$2\ U_e = 2$ V, para escobillas de carbón o grafito.

$2\ U_e = 0{,}6$ V, para escobillas de carbón metalizado.

16.2.5 *Pérdidas adicionales en carga*

Salvo indicación en contrario, se admite que estas pérdidas varían con el cuadrado de la intensidad y que su valor total para intensidad nominal máxima es:

a) Para máquinas no compensadas:

1 % de la potencia nominal absorbida para los motores.

1 % de la potencia nominal útil para los generadores.

b) Para máquinas compensadas:

0,5 % de la potencia nominal absorbida para los motores.

0,5 % de la potencia nominal útil para los generadores.

Para las máquinas de velocidad constante, la potencia nominal suministrada o absorbida es la potencia que se obtendría con la intensidad nominal máxima y la tensión nominal máxima.

Las pérdidas adicionales para otras velocidades se obtendrán a partir de un factor de corrección que dicta la Norma en una tabla.

Las pérdidas adicionales pueden *obtenerse por eliminación,* al restar, a las pérdidas totales en carga, todas las restantes pérdidas conocidas.

16.3 Rendimiento de las máquinas de c. c.

Se define el *rendimiento* como la relación entre la potencia útil y la potencia absorbida, expresadas en las mismas unidades; se indica generalmente en tanto por ciento.

Los sistemas utilizados en la medición del rendimiento son dos:

1.º *Medida directa.* Consiste en medir directamente la potencia suministrada por la máquina y la potencia que ella absorbe:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \times 100$$

en donde:

P_a = potencia absorbida
P_u = potencia suministrada
η = rendimiento en tanto por ciento

El método directo se aplica generalmente a máquinas pequeñas.

2.º *Medida indirecta.* Consiste en medir las pérdidas de la máquina. Añadiendo estas pérdidas a la potencia suministrada por la máquina, se obtiene la potencia absorbida.

La medida indirecta del rendimiento puede ser efectuada por los métodos siguientes:

a) Determinación de las pérdidas separadas para su posterior adición.

b) Determinación de las pérdidas totales.

El método indirecto se aplica preferentemente a las máquinas de gran potencia y, en general, a todas por ofrecer mayor precisión, ya que se miden pérdidas y éstas son una pequeña fracción de la potencia total.

16.3.1 *Determinación del rendimiento*

El rendimiento se calculará partiendo de las pérdidas totales, consideradas como la suma de las pérdidas señaladas en el apartado 16.2.

Los métodos utilizados en la medida de las pérdidas totales, son:

1.º Ensayo al freno.
2.º Ensayo con máquina auxiliar tarada.
3.º Ensayo en oposición.
4.º Ensayo en oposición con marcha en paralelo sobre la red.

16.3.1.1 *Ensayo al freno*

Es el ensayo en el que la potencia mecánica suministrada por una máquina, funcionando como motor, se determina por medida del par en el eje mediante un *freno* o *dinamómetro* (fig. 16.1), al mismo tiempo que se mide la *velocidad de rotación;* el ensayo se puede efectuar igualmente en una máquina que funcione como generador, por medio de un dinamómetro para determinar la potencia mecánica absorbida.

El ensayo se realizará en las condiciones nominales de velocidad, tensión, intensidad y temperatura, obteniéndose el rendimiento como cociente entre la potencia útil y la absorbida.

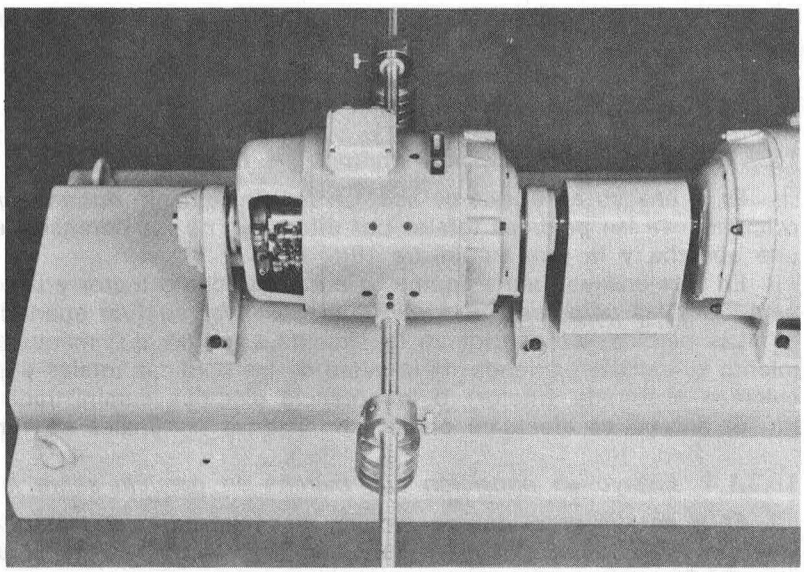


Fig. 16.1 Dínamo freno.

16.3.1.2 *Ensayo con máquina auxiliar tarada*

Es el ensayo en el que la potencia mecánica absorbida o suministrada por una máquina eléctrica se calcula a partir de la potencia eléctrica absorbida o suministrada por una *máquina auxiliar tarada* (1), acoplada mecánicamente (fig. 16.2) a la máquina que se ensaya (2).

La máquina en la que se trata de medir las pérdidas se separa de la red, y se acciona a su velocidad nominal por un motor tarado, al que se han determinado previamente las pérdidas con gran precisión, permitiendo conocer la potencia mecánica que suministra por el eje, por medición de la potencia eléctrica que absorbe, y el rendimiento (fig. 16.3).

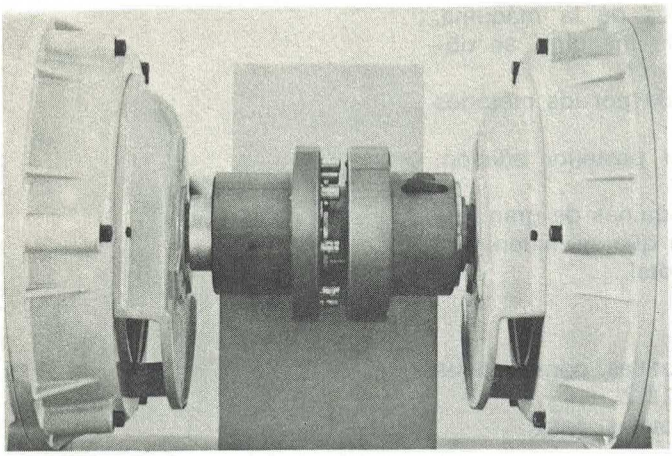


Fig. 16.2 Acoplamiento mecánico de dos máquinas.

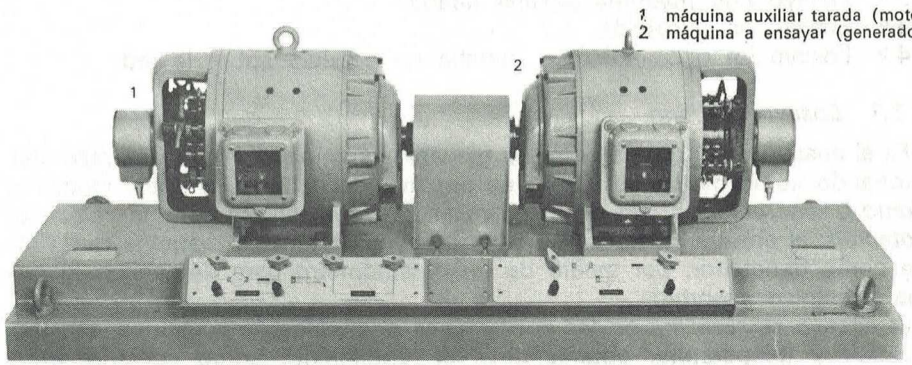


Fig. 16.3 Ensayo con máquina auxiliar tarada.

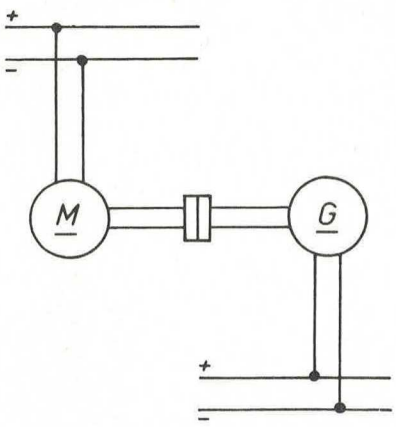


Fig. 16.4 Esquema de acoplamiento de dos máquinas para el ensayo en oposición.

La potencia mecánica transmitida por el motor son las *pérdidas de la máquina ensayada.*

El rendimiento se obtiene por cociente entre la potencia útil y la absorbida, una vez la máquina funciona según las condiciones nominales.

16.3.1.3 *Ensayo en oposición (método de recuperación)*

Es el ensayo en el que se acoplan mecánicamente *dos máquinas idénticas* calculándose las pérdidas totales por diferencia de las potencias eléctricas que una absorbe y la otra suministra (fig. 16.4).

En este ensayo, una máquina se comporta como motor y la otra como generador, y las *pérdidas son suministradas por la red* (ver apartado 4.9).

Las pérdidas se consideran igualmente entre las dos máquinas y el rendimiento se calcula partiendo de la mitad de las pérdidas totales y de la potencia eléctrica absorbida (motor) o la potencia eléctrica suministrada (generador).

El ensayo se efectuará en las condiciones nominales de funcionamiento.

16.3.1.4 *Ensayo en oposición con marcha en paralelo sobre la red*

Es el ensayo en el que se acoplan mecánicamente *dos máquinas idénticas* y se conectan ambas a la red, la cual suministrará las *pérdidas totales de ambas* (fig. 16.5).

Las pérdidas se consideran como igualmente repartidas y el rendimiento se calcula por el sistema del ensayo en oposición (apartado 16.3.1.3).

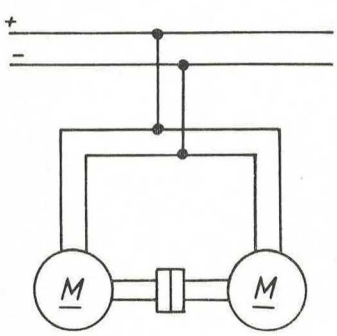


Fig. 16.5 Esquema de acoplamiento de dos máquinas para el ensayo en oposición con marca en paralelo sobre la red.

16.4 Calentamiento. Ensayo de calentamiento

El funcionamiento de la máquina en régimen nominal lleva consigo un consumo de potencia, por causa de las pérdidas, que dará lugar a un *aumento de la temperatura* de los elementos que constituyen la máquina, sobre la temperatura ambiente.

Si el aumento de temperatura supera los límites establecidos (apartado 7.2.4.2), se producirán averías importantes en los aislamientos, dejando la máquina fuera de servicio.

Para evitar que esto suceda, se dota a las máquinas de sistemas de refrigeración, como se indicó anteriormente (apartado 7.7.2).

La Norma UNE 20 113-73 hace una clasificación de los servicios a prestar por cada tipo de máquina, considerando su calentamiento, de los que se indicará a continuación un resumen.

Se define *servicio* la estipulación de los regímenes, incluyendo los períodos de funcionamiento en vacío y en reposo a los que está sometida la máquina, así como su duración y secuencia en tiempo.

Se define el *equilibrio térmico* como el estado alcanzado cuando los calentamientos observados de las diversas partes de la máquina no varían más de 2 °C durante el período de una hora.

Se define *factor de marcha* la relación entre el tiempo de funcionamiento en carga, comprendido el tiempo de arranque y el frenado eléctrico, y la duración de un ciclo, expresada en tanto por ciento.

16.4.1 *Tipos de servicio*

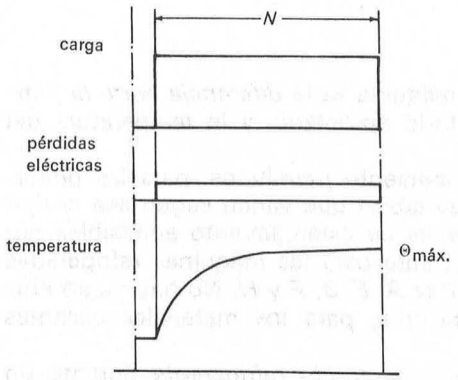
A continuación de su título se indicará su designación observada.

16.4.1.1 *Servicio continuo S1*

Es el funcionamiento, en régimen constante, con una duración suficiente para que se establezca el equilibrio térmico (fig. 16.6).

16.4.1.2 *Servicio temporal S2*

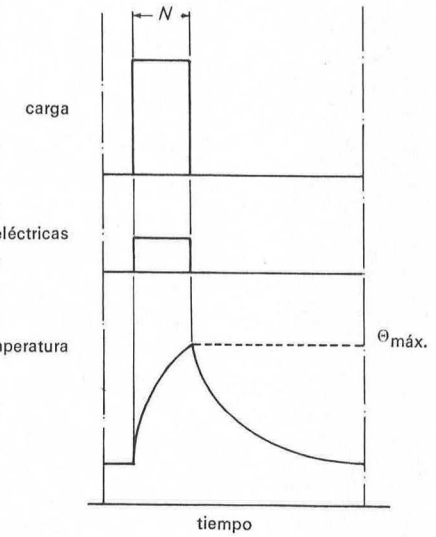
Es el funcionamiento, en régimen constante, durante un período de tiempo determinado, menor que el requerido para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un reposo de una duración suficiente para que la temperatura descienda hasta igualarse a la del medio refrigerante en ± 2 °C (fig. 16.7). Ejemplo: S2 – 60 minutos (duración del servicio).



N = funcionamiento en régimen nominal

$\Theta_{máx.}$ = temperatura máxima alcanzada

Fig. 16.6 Servicio continuo S1.



N = funcionamiento en régimen nominal

$\Theta_{máx}$ = temperatura máxima alcanzada a largo del ciclo

Fig. 16.7 Servicio temporal S2.

16.4.1.3 *Servicio intermitente periódico S3*

Es el servicio formado por una sucesión de ciclos idénticos, comprendiendo cada uno un período de tiempo de funcionamiento a un régimen constante y otro de reposo (fig. 16.8), de tal forma que en cada uno de ellos la intensidad de arranque no influya de forma apreciable en el calentamiento. Ejemplo: S3 – 25 % (factor de marcha).

16.4.1.4 *Servicio ininterrumpido periódico con carga intermitente S6*

Es el servicio formado por una sucesión de ciclos idénticos, comprendiendo cada uno un período de tiempo de funcionamiento a régimen constante y otro de funcionamiento en vacío. No existen períodos de reposo (fig. 16.9). Ejemplo: S6 – 40 % (factor de marcha).

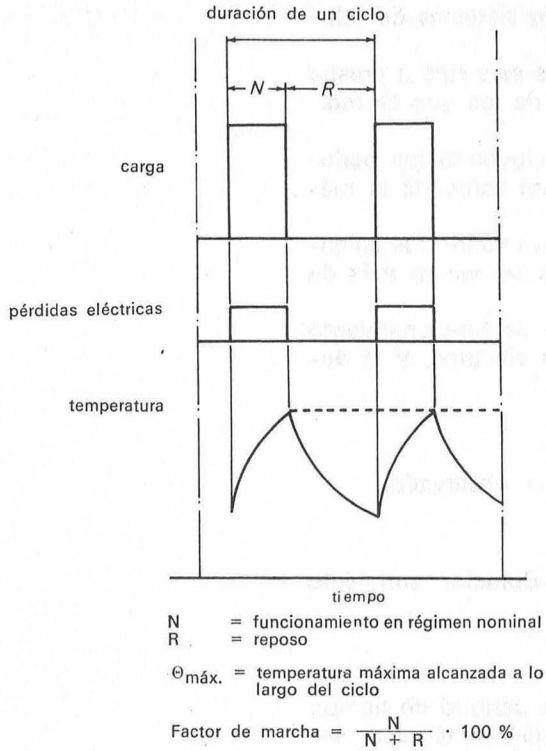


Fig. 16.8 Servicio intermitente periódico S3.

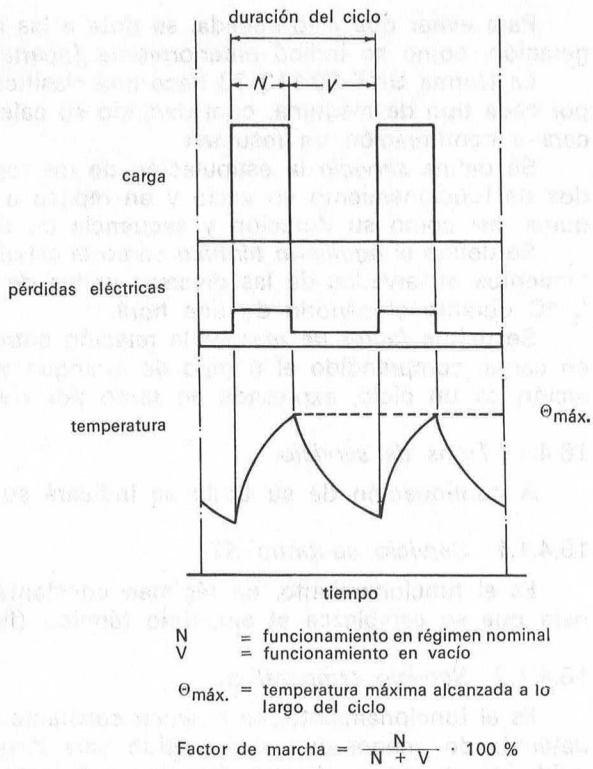


Fig. 16.9 Servicio ininterrumpido periódico con carga intermitente S6.

16.4.2 *Ensayo de calentamiento*

El calentamiento de una parte de una máquina es la *diferencia entre la temperatura de esta parte,* medida por el método apropiado, y la temperatura del *fluido refrigerante.*

Los límites de temperatura y de calentamiento permitidos, para las principales partes de la máquina, figuran en unas tablas que varían según sea el tipo de refrigeración. La tabla 16.10 da los límites de calentamiento admisibles por encima de la temperatura del fluido refrigerante para las máquinas refrigeradas por aire y aisladas con materiales de las clases *A*, *E*, *B*, *F* y *H*. No hay fijado ningún límite de calentamiento, hasta el presente, para los materiales aislantes de la clase *C*.

El valor a adoptar para la *temperatura del fluido refrigerante* durante un ensayo, es la media de las lecturas hechas en los termómetros a intervalos de tiempo iguales, durante la última cuarta parte de la duración del ensayo.

En *máquinas abiertas,* refrigeradas por el *aire,* la temperatura del aire envolvente se mide por medio de termómetros repartidos alrededor y a media altura de la máquina, a una distancia de 1 a 2 m, al abrigo de toda radiación de calor y de corrientes de aire.

En *máquinas cerradas,* con refrigeradores separados y con canalización de aire, la temperatura del fluido refrigerante se mide a la entrada de la máquina.

16.4.3 *Métodos de medición de temperaturas*

Hay admitidos tres métodos para la determinación de la temperatura de los devanados y otras partes:

a) Método por termómetro.
b) Método por variación de resistencia.
c) Método por indicadores internos de temperatura.

16.4.3.1 *Método por termómetros*

Este método consiste en medir la temperatura por medio de termómetros aplicados sobre las superficies accesibles de la máquina acabada.

Este método es adecuado en los casos de bobinas de conmutación y devanados de compensación de débil resistencia, devanados de una sola capa, etc.

Tabla 16.10 Límites de calentamiento de máquinas refrigeradas por aire

Nº	Parte de la máquina	Clase de aislamiento														
		A			E			B			F			H		
		Método			Método			Método			Método			Método		
		Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C
1	Devanados de corriente alterna de máquinas de potencia igual o superior a 5000 kW ó kVA o en los que la longitud axial del núcleo es igual o superior a 1 m Observación. El método por indicadores internos de temperatura puede ser aplicado a máquinas de potencia inferior a 5000 kW ó kVA o en los que la longitud axial del núcleo sea inferior a 1 m, pero sus límites de calentamiento estarán comprendidos dentro de los valores aquí indicados. No obstante, cuando en un caso especial un cliente exige además de la determinación de la temperatura por el procedimiento de la resistencia, una medición por indicadores internos de temperatura en el punto más caliente, para esta medición son permisibles las sobretemperaturas indicadas en el *apartado 5.2.3.1* (+5° C para las clases A y E y +10° C para las clases B, F y H)	–	60	(1) 60	–	70	(1) 70	–	80	(1) 80	–	100	(1) 100	–	125	(1) 125
2 a)	Devanados de corriente alterna de máquinas de potencia inferior a 5000 kW ó kVA o en los que la longitud axial del núcleo es inferior a 1 m.															
b)	Devanados de excitación de corriente continua de máquinas de corriente alterna y de corriente continua que no sean los de los puntos 3 y 4	(1) 50	60	–	(1) 65	75	–	(1) 70	80	–	(1) 85	100	–	(1) 105	125	–
c)	Devanados de inducidos unidos a colectores															
3	Devanados de excitación de corriente continua de turboalternadores	–	–	–	–	–	–	–	90	–	–	110	–	–	–	–
4 a)	Devanados de excitación de pequeña resistencia de más de una capa y devanados de compensación	60	60	–	75	75	–	80	80	–	100	100	–	125	125	–
b)	Devanados de una capa con superficies desnudas o barnizadas (2)	65	65	–	80	80	–	90	90	–	110	110	–	135	135	–
5	Devanados aislados en corto circuito	60	–	–	75	–	–	80	–	–	100	–	–	125	–	–
6	Devanados no aislados en corto circuito	Los calentamientos de estas partes no deberán en ningún caso alcanzar un valor tal, que exista peligro de deteriorar las materias aislantes o no aislantes próximas.														

Tabla 16.10 Límites de calentamiento de máquinas refrigeradas por aire (Continuación)

Nº	Parte de la máquina	Clase de aislamiento															
		A			E			B			F			H		
		Método			Método			Método			Método			Método		
		Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C	Termómetro °C	Resistencia °C	Indicador interno de temperatura °C
7	Núcleos magnéticos y otras partes que no están en contacto con los devanados	Los calentamientos de estas partes no deberán en ningún caso alcanzar un valor tal, que exista peligro de deteriorar las materias aislantes o no aislantes próximas.														
8	Núcleos magnéticos y otras partes en contacto con los devanados	60	–	–	75	–	–	80	–	–	100	–	–	125	–	–
9	Colectores y anillos protegidos o no (3)	60	–	–	70	–	–	80	–	–	(4) 90	–	–	(4) 100	–	–

(1) Deberá hacerse una corrección en el caso de devanados de corriente alterna de alta tensión (véase el *apartado 5.3.2*).

(2) Comprenderá igualmente los devanados de excitación de varias capas a condición de que las capas inferiores estén cada una en contacto con el fluido refrigerante que circula.

(3) Los calentamientos del punto 9 serán admisibles a condición de que se haga uso de un aislamiento apropiado para el devanado, salvo que el colector o los anillos colectores estén próximos a los devanados, caso en el que los calentamientos no deben sobrepasar lo especificado para la clase de aislamiento del devanado. Los valores de calentamiento indicados, deberán comprobarse con termómetros del bulbo.

(4) Podrá ser necesario tomar precauciones especiales respecto a la calidad de las escobillas en el caso que se apliquen los límites de 90° C y 100° C.

16.4.3.2 *Método por variación de resistencia*

Este método consiste en determinar el calentamiento de los devanados a partir del aumento de su resistencia.

En la práctica, se utiliza para el cobre la fórmula:

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + t_1) + t_1 - t_a$$

en donde:

R_2 = resistencia del devanado al final del ensayo (Ω)
R_1 = resistencia del devanado a la temperatura, en frío (Ω)
t_2 = temperatura del devanado al final del ensayo (°C)
t_1 = tempetatura del devanado, frío, en el momento de medición de la resistencia inicial (°C)
t_a = temperatura del fluido de refrigeración al final del ensayo (°C)

Este método es el preferido en la medición de los devanados de excitación.

16.4.3.3 *Método por indicadores internos de temperatura*

Los indicadores internos son los termómetros de resistencia y pares termoeléctricos que se introducen en la máquina durante la construcción, en puntos que son inaccesibles durante el funcionamiento de la máquina.

Los indicadores se colocan repartidos alrededor del estator de la máquina. También se utilizan en la medición de devanados.

16.4.4 *Duración de los ensayos de calentamiento*

La duración del ensayo dependerá del tipo de servicio:

a) *Servicio continuo S1.* Debe durar el tiempo suficiente hasta que se alcance el equilibrio térmico. Si es posible, deben tomarse las temperaturas en marcha y después del paro.

b) *Servicio temporal S2.* La duración del ensayo es la especificada para el servicio. Al final del ensayo no deben sobrepasarse los límites de calentamiento especificados en la tabla 16.10.

c) *Servicios S3 y S6.* El ensayo se interrumpe cuando se ha alcanzado el equilibrio térmico. A la mitad del período de mayor valor de carga en el último ciclo de funcionamiento, el calentamiento debe sobrepasar los límites especificados en la tabla 16.10.

16.5 Ensayos de aislamiento

El aislamiento es uno de los factores decisivos (junto a la ventilación y protección), en la capacidad, vida y averías de una máquina eléctrica (apartado 7.7.3).

Para comprobar el estado de aislamiento de una máquina, normalmente se la somete a las siguientes pruebas:

a) Medición de la resistencia de aislamiento.
b) Ensayos dieléctricos (rigidez dieléctrica).

16.5.1 *Medición de la resistencia de aislamiento*

La resistencia de aislamiento se obtiene como cociente entre la tensión y *la corriente de fuga,* debida a la imperfección de los aislantes.

El valor de la resistencia es variable, ya que depende de factores como humedad, temperatura, etc.

Un aislante defectuoso puede producir un cortocircuito, y éste una seria avería en la máquina; para evitar estos problemas, se han dictado las normas correspondientes a que habrán de someterse las máquinas nuevas y las que hayan estado durante un período largo de tiempo fuera de servicio.

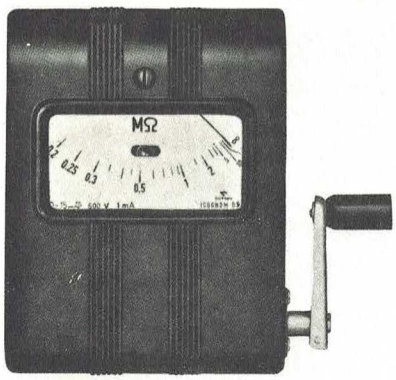


Fig. 16.11 Medidor de aislamientos (Kainos).

16.5.1.1 *Realización del ensayo*

Como norma general, estas mediciones se realizan entre masa (carcasa) y los circuitos eléctricos, aplicando una tensión de 500 a 1 000 V en c. c., normalmente proporcionada por un óhmetro *(megger)* (fig. 16.11).

16.5.1.2 *Límites establecidos*

Las normas dadas por el C. E. I. (Comité Electrotécnico Internacional) recomiendan que el valor mínimo, en servicio, sea:

$$R_{aisl.} \geqslant \frac{V}{P + 1\,000}$$

en donde:

V = tensión más elevada del devanado (V)
P = potencia de la máquina (kW)
$R_{aisl.}$ = resistencia de aislamiento (MΩ) con un mínimo de 1 MΩ

16.5.2 *Ensayos dieléctricos*

Se define la rigidez dieléctrica como la d. d. p. capaz de perforar un aislante determinado.

El aparato más utilizado en el ensayo dieléctrico es el medidor de la rigidez dieléctrica de sólidos (fig. 16.12), cuyas salidas de A. T. van a parar a dos pistolas aislantes que se aplican en los aislantes a ensayar.

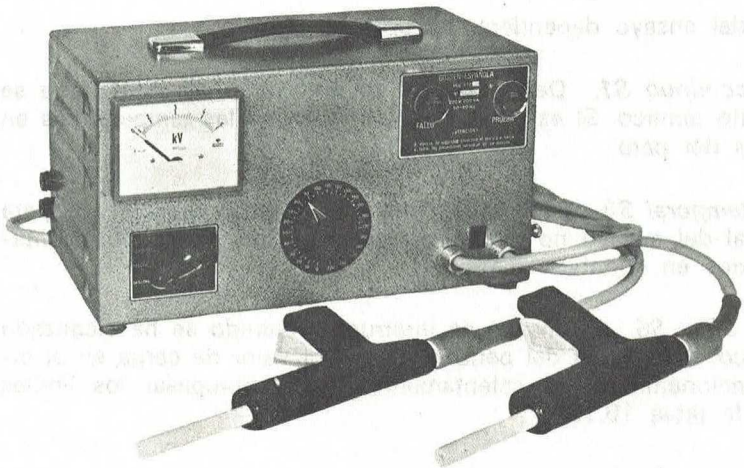


Fig. 16.12 Medidor de la rigidez dieléctrica de sólidos (Kainos).

16.5.2.1 *Realización del ensayo*

La tensión de ensayo debe aplicarse entre el *devanado a ensayar* por una parte y la *carcasa* por otra, a la que van conectados el núcleo magnético y los devanados no sometidos a ensayo.

La tensión de ensayo debe ser de *frecuencia industrial* (50 Hz) y de forma prácticamente senoidal.

El ensayo debe empezarse con una tensión no superior a la mitad de la plena tensión de ensayo, aumentándose en forma continua, y siendo como mínimo diez segundos el tiempo para pasar desde la mitad a la plena tensión.

16.5.2.2 *Límites establecidos*

La plena tensión de ensayo debe mantenerse durante *un minuto,* de acuerdo con los valores indicados en la tabla 16.13.

Las máquinas totalmente rebobinadas se ensayan a la plena tensión especificada para las máquinas nuevas.

Tabla 16.13 Ensayos dieléctricos

N.º	Máquina o parte	Tensión eficaz de ensayo
1	Devanados aislados de máquinas rotativas de potencia inferior a 1 kW o kVA y de tensión nominal inferior a 100 V exceptuando los incluidos en los números 4 al 8 de esta tabla	500 V + 2 veces la tensión nominal
2	Devanados aislados de máquinas rotativas de potencia inferior a 10000 kW o kVA exceptuando los incluidos en los números 4 al 8 de esta tabla (2)	1000 V + 2 veces la tensión nominal con un mínimo de 1500 V (1)
3	Devanados aislados de máquinas rotativas de potencia igual o superior a 10000 kW o kVA exceptuando los incluidos en los números 4 al 8 de esta tabla (2) Tensión nominal U (1) – U hasta 2000 V inclusive – U entre 2000 V y 6000 V inclusive – U entre 6000 V y 17000 V inclusive – U por encima de 17000 V	 1000 V + 2 U 2,5 U 3000 V + 2 U Debe ser objeto de un acuerdo particular entre fabricante y comprador.
4	Devanados de excitación separada de máquinas de corriente continua.	1000 V + 2 veces la tensión nominal máxima de excitación con un mínimo de 15000 V.
5	Devanados de excitación de generadores síncronos de motores síncronos y de compensadores síncronos.	
a)	Devanados de excitación de generadores síncronos.	10 veces la tensión nominal de excitación con un mínimo de 1500 V y un máximo de 3500
b)	Cuando la máquina está destinada a arrancar con el devanado inductor puesto en corto circuito o cerrado sobre una resistencia de valor inferior a 10 veces la resistencia del devanado.	10 veces la tensión nominal de excitación con un mínimo de 1500 V y un máximo de 3500.
c)	Cuando la máquina está destinada a arrancar ya sea con el devanado inductor cerrado sobre una resistencia de valor igual o superior a 10 veces la resistencia del devanado inductor, ya sea con los devanados de excitación en circuito abierto con o sin divisor de campo.	1000 V + 2 veces el valor máximo de la tensión eficaz que se puede producir, dentro de las condiciones de arranque especificadas, entre los bornes del devanado de excitación o bien, en el caso de un devanado de excitación seccionado, entre los bornes de cualquier sección, con un mínimo de 1500 V (3).
6	Devanados secundarios, habitualmente rotores, de motores asíncronos o de motores asíncronos sincronizados no permanentemente puestos en corto circuito, destinados a arrancar con reostatos.	
a)	Para motores no reversibles o para motores reversibles a partir del reposo solamente.	1000 V + 2 veces la tensión en circuito abierto en reposo, medido entre las escobillas o los bornes secundarios con la tensión nominal aplicada a los devanados primarios.
b)	Para motores que pueden ser invertidos o frenados invirtiendo la alimentación primaria mientras el motor está en funcionamiento.	1000 V + 4 veces la tensión secundaria en circuito abierto en reposo como se define en el punto a)
7	Excitatrices, con excepción de los casos siguientes: – Excitatrices de motores síncronos, comprendidos los motores síncronos de inducción, en los casos en que se ponen a tierra o se desconectan de los devanados de excitación durante el arranque. – Devanados de excitación separada de las excitatrices (véase el número 4 de esta tabla)	Igual a la tensión de prueba de los devanados a los que van conectados. 1000 V + 2 veces la tensión nominal de la excitatriz con un mínimo de 1500 V.

Tabla 16.13 Ensayos dieléctricos (continuación)

N.º	Máquina o parte	Tensión eficaz de ensayo
8	Grupos de máquinas y aparatos	Debe evitarse en lo posible la repetición de los ensayos de los números 1 al 7 de esta tabla, pero si se efectua el ensayo sobre un grupo de aparatos nuevos instalados y conectados conjuntamente, habiendo sido sometido previamente cada uno al ensayo dieléctrico por separado, la tensión de ensayo no debe sobrepasar del 80 por 100 de la más baja de las tensiones de ensayo aplicadas a uno de los aparatos (4)

(1) En el caso de devanados bifásicos con un borne común, la tensión nominal a considerar para el cálculo de la tensión de ensayo debe tomarse 1,4 veces la tensión de cada fase separada.

(2) El ensayo dieléctrico de las máquinas con aislamiento escalonado debe ser objeto de un acuerdo particular entre fabricante y comprador.

(3) La tensión que aparece en los bornes de los devanados de excitación o de sus secciones en las condiciones de arranque especificadas puede medirse a una tensión reducida apropiada; la tensión así medida se aumenta en la relación de la tensión de arranque especificada a la tensión de alimentación durante el ensayo.

(4) En el caso de devanados de una o varias máquinas que se conectan eléctricamente entre sí, la tensión a considerar es la tensión máxima que se produce respecto a tierra.

16.6 Características y ensayos diversos

Además de las características señaladas hasta ahora, se indicará brevemente otro tipo de características comunes a las máquinas de corriente continua, dadas por la Norma UNE 20113-73.

16.6.1 *Sobreintensidad momentánea de los generadores*

Un generador que satisface la presente norma debe ser capaz de soportar, durante 15 segundos, una intensidad que sobrepase en un 50 % la intensidad nominal, manteniéndose la tensión lo más próxima posible a la tensión nominal, teniendo en cuenta la potencia máxima de la máquina de accionamiento. El valor exacto de la tensión no es importante.

16.6.2 *Exceso momentáneo de par del motor de c. c.*

Deben ser capaces de soportar, durante 15 segundos, cualquiera que sea su clase y su tipo de construcción, un exceso de par del 60 % del par nominal, sin que se produzca el paro del motor ni un cambio brusco de la velocidad. El par también puede expresarse en términos de *sobreintensidad.*

16.6.3 *Sobrevelocidad*

Todas las máquinas de c. c. deben estar diseñadas para soportar *1,2 veces la velocidad nominal máxima,* con las excepciones siguientes:

a) Máquinas que puedan, bajo ciertas circunstancias, *ser arrastradas por la carga,* que habrán de probarse a la *velocidad de embalamiento del grupo,* con un mínimo de 1,2 veces la velocidad nominal máxima.

b) Motor serie de c. c., que habrá de probarse a 1,2 veces la velocidad máxima que se puede alcanzar en servicio.

La duración de todo ensayo de sobrevelocidad es de *2 minutos.*

16.6.4 *Ensayo de conmutación*

Una máquina de c. c. debe poder funcionar sin perjuicio permanente de la superficie del colector o de las escobillas y sin chispas peligrosas, estando colocadas las escobillas en la misma posición, desde la marcha en vacío a la marcha de *sobreintensidad* (apartado 16.6.2).

El ensayo de conmutación debe efectuarse inmediatamente después del ensayo de calentamiento.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Recopilar información de Normas sobre Ensayos de las Máquinas de c. c. de diferentes países, y compararlas entre sí.

— Analizar el fundamento físico de las pérdidas en el hierro, y los sistemas utilizados para reducirlas al máximo.

— Explicar el significado de la expresión, comúnmente utilizada en Máquinas Eléctricas, que dice: la potencia útil que puede suministrar una máquina viene limitada, prácticamente, por la temperatura que alcancen sus elementos constituyentes.

CUESTIONARIO

16.1 ¿Qué relación existe entre las pérdidas en el hierro de una máquina de c. c. y su tensión en bornes?

16.2 ¿Por qué, en el cálculo de las pérdidas Joule en los devanados, se indica reducir la resistencia a la temperatura de referencia? ¿Cuál sería la definición de temperatura de referencia?

16.3 ¿Cuál será la clasificación científica de las pérdidas, atendiendo al sistema en que se han producido?

16.4 Describir el ensayo para la obtención de las pérdidas constantes, con la ayuda de un esquema eléctrico.

16.5 ¿Qué resultados se obtendrán al realizar el ensayo de desaceleración en un motor de c. c. de un grupo Ward-Leonard? Razonar la respuesta.

16.6 ¿En qué relación varían las pérdidas Joule del circuito del inducido cuando la carga se reduce a la mitad? ¿Y si aumenta una cuarta parte?

16.7 ¿Cómo pueden determinarse las pérdidas adicionales de una máquina?

16.8 ¿Cuál es el fundamento de las pérdidas adicionales?

16.9 ¿Qué inconvenientes presentará la aplicación del método directo para la obtención del rendimiento de un motor de gran potencia? Ejemplo: 2 000 CV. ¿Cuál es la forma general de la curva del rendimiento de una máquina de c. c.?

16.10 Explicar el esquema correspondiente a un ensayo en oposición, por el método de recuperación, aplicado a dos máquinas idénticas, y analizar si es rigurosamente exacto el sistema de determinación de pérdidas.

16.11 Explicar el calentamiento alcanzado por motores de servicios S1, S2 y S3, partiendo de su curva de calentamiento.

16.12 ¿Cuál es el tiempo de duración del ensayo de calentamiento en las máquinas de servicio S1, de potencias muy elevadas? ¿Existe algún procedimiento gráfico para determinar la temperatura máxima indirectamente?

16.13 ¿Qué problemas pueden surgir al realizar el ensayo dieléctrico a una máquina varias veces? ¿Podría hacerse, por ejemplo, en un generador de c. c. con grupos de alumnos constantemente en el Laboratorio?

16.14 ¿Qué diferencias existen entre el ensayo de resistencia de aislamiento y el de rigidez dieléctrica?

16.15 ¿Cómo podría determinarse la zona neutra del inducido de un generador en una prueba de conmutación?

BIBLIOGRAFIA

UNE, *Instituto Nacional de Racionalización y Normalización,* Madrid.

TIBERIO F., *Pruebas sobre máquinas eléctricas,* Vicens-Vives, Barcelona 1965.

Teoría, cálculo y construcción de máquinas eléctricas de corriente continua, Editorial Labor, Barcelona 1966.

BANDINI A., *Ensayos de Máquinas,* Rede, Barcelona 1967.

Catálogos técnicos (De Lorenzo).

Tema 17

Ensayos propios de generadores de c. c.

OBJETIVOS

— *Comprobar el circuito magnético de una máquina de c. c.*
— *Verificar el circuito de excitación desde vacío a plena carga.*
— *Determinar la variación de tensión desde vacío a plena carga.*
— *Comprobar la reacción de inducido de un generador de c. c.*
— *Determinar el rendimiento de un generador por procedimientos directo e indirecto.*

GUION

— Determinación de la característica de vacío.
— Determinación de la característica en carga.
— Determinación de la característica en cortocircuito.
— Determinación de la característica de regulación.
— Determinación de las características exterior e interior.
— Determinación del rendimiento de un generador.

PUNTOS CLAVE

— Realizar los ensayos correspondientes al funcionamiento del generador en circuito abierto.
— Realizar los ensayos correspondientes al funcionamiento del generador en carga.
— Comparar los 2 métodos utilizados para la determinación del rendimiento de un generador.

EXPOSICION DEL TEMA

Se denominan *curvas características* (ver apartado 8.3), las curvas que representan relaciones entre las magnitudes que intervienen en el funcionamiento de las máquinas. Estas magnitudes son:

a) Tensión en bornes (V_b).
b) Corriente de excitación ($I_{ex.}$).
c) Corriente de inducido (I_i).
d) Velocidad (N).

La obtención de las características se realiza en el laboratorio de máquinas (sala de pruebas), a través de los ensayos.

El laboratorio de máquinas ha de estar dotado de los medios necesarios, como son: fuentes de alimentación, cargas eléctricas variables, cargas mecánicas, instrumentos de medida para la determinación de magnitudes eléctricas, mecánicas, térmicas, etc.

Para realizar los ensayos de máquinas de c. c., además, será necesario disponer, al menos, de dos *grupos polimórficos* (especiales para la enseñanza) formados por un motor de arrastre (máquina motriz) y una máquina de c. c. cada uno, y a ser posible iguales, con objeto de poder realizar acoplamientos (fig. 16.2).

Este tema se dedicará a la determinación de los *ensayos propios de los generadores,* y el siguiente, a los *ensayos de motores.*

La determinación de cada característica se realizará detalladamente para el generador de excitación independiente, por ser el que cumple con todas las condiciones establecidas para cada característica (apartado 8.3.2), citándose seguidamente las variaciones que presentan los generadores autoexcitados.

17.1 Determinación de la característica de vacío

La característica de vacío (apartado 8.5) se representa por:

$$\boxed{E_0 = f\ (I_{ex.})} \quad \text{para} \quad \begin{cases} I_i = 0 \\ N = \text{cte.} \end{cases}$$

y se obtiene por medio del *ensayo en circuito abierto.*

Al funcionar la máquina en vacío, no hay caída de tensión, y la f. e. m. coincide con la tensión en bornes, pudiéndose medir E_0 con un voltímetro conectado en bornes del inducido (V_0).

En la figura 17.1 se indica el esquema de montaje correspondiente a un generador de *excitación independiente,* por lo que el circuito de excitación se alimentará a su tensión nominal de una fuente exterior; por ejemplo, una batería, corriente alterna rectificada, etc.

Para variar la corriente de excitación ($I_{ex.}$) es necesario intercalar un *reóstato* (R_r) en serie con el devanado inductor.

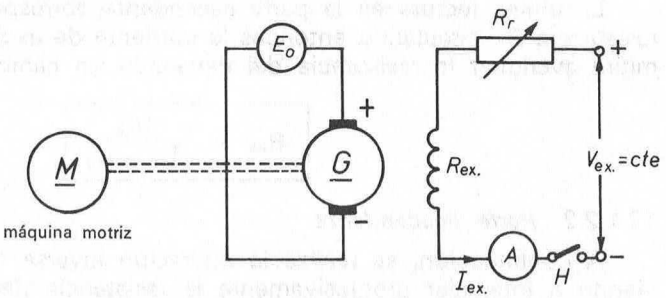


Fig. 17.1 Esquema de montaje correspondiente al ensayo en circuito abierto de un generador de excitación independiente.

17.1.1 *Modo de trabajo*

Una vez en marcha la máquina de accionamiento (motor de c. a., motor de c. c., etc.), se acoplará mecánicamente al eje del generador (fig. 16.2), hasta hacer girar al inducido a la velocidad que se haya fijado (normalmente la nominal).

Tabla 17.2 Mediciones correspondientes al ensayo en circuito abierto de un generador

Punto de la curva	*Magnitudes medidas*			E_0 *(real)*	*Observaciones*
	$I_{ex.}$ *(A)*	E_0 *(V)*	N_{medida} *(r. p. m.)*	E_0 *(V)*	
1	0				Curva ascendente
2					
3					
X					
X					Curva descendente
2					
1	0				

Antes de conectar el circuito de excitación, se toma la lectura del voltímetro E_o, que indicará el valor de la tensión producida por el magnetismo remanente (suele ser de 1 a 5 V).

A continuación, se conecta el circuito de excitación, con el reóstato R_r, al máximo de resistencia, por lo que circulará la $I_{ex.}$ mínima, que acusará el amperímetro A:

$$I_{ex.} = \frac{V_{ex.}}{R_{ex.} + R_r}$$

en donde:

$V_{ex.}$ = tensión del circuito de excitación (V)
$R_{ex.}$ = resistencia del devanado inductor (Ω)
R_r = resistencia del reóstato (Ω)
$I_{ex.}$ = corriente de excitación (A)

17.1.2 *Toma de valores*

Ha de distinguirse entre las partes *ascendente* y *descendente.*

17.1.2.1 *Parte ascendente*

Para tomar los puntos de la curva, se va disminuyendo el valor de la resistencia R_r, viniendo indicados los valores de tensión e intensidad por las lecturas del voltímetro y amperímetro, respectivamente.

La última lectura en la parte ascendente corresponde al valor nulo de la resistencia R_r, circulando entonces la corriente de excitación máxima, que permitirá averiguar la resistencia del devanado de campo ($R_{ex.}$):

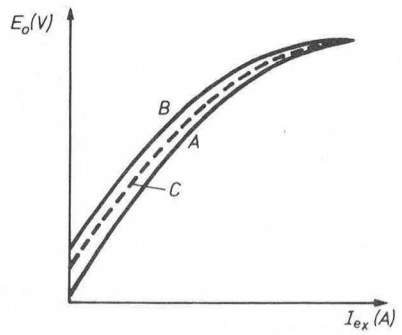
$$R_{ex.} = \frac{V_{ex.}}{I_{ex.\ (máx.)}}$$

17.1.2.2 *Parte descendente*

A continuación, se realiza la operación inversa (curva descendente) volviendo a intercalar progresivamente la resistencia del reóstato hasta alcanzar su valor máximo.

El último punto corresponde al circuito de excitación desconectado y, por ello:

$$I_{ex.} = 0$$



A curva ascendente
B curva descendente
C características de vacío (intermedio)

Fig. 17.3 Representación de las curvas de vacío.

17.1.3 *Representación de la característica del generador de excitación independiente*

Los resultados obtenidos se pueden anotar en un *estadillo de mediciones,* como el representado en la tabla 17.2.

Una vez que los valores medidos se hayan reducido (por cálculo) a las condiciones exigidas por el ensayo, se representan en un sistema de ejes. El eje de abscisas representa la corriente de excitación ($I_{ex.}$) y el de ordenadas la tensión (V_o).

La curva real (C) se toma como intermedia entre la ascendente (A) y la descendente (B), según indica la figura 17.3.

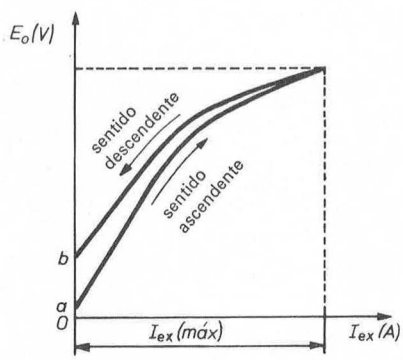


Fig. 17.4 Sentidos en la variación de corriente de excitación.

17.1.4 *Observaciones necesarias durante el ensayo*

a) Para obtener suficientes puntos de la curva es necesario tener amplio margen en la variación de la excitación (eje de abscisas). Para ello habrá que medirse previamente la resistencia del devanado inductor $R_{ex.}$ (ejemplo: con un puente de Wheatstone), y poder así conectarle el reóstato (R_r) adecuado.

b) La variación de la corriente de excitación $I_{ex.}$ ha de realizarse en un solo sentido: al principio aumentando (fig. 17.4) y posteriormente disminuyendo.

Si, por equivocación, se hiciesen desplazamientos de $I_{ex.}$ en ambos sentidos, se obtendría un punto fuera de la curva (fenómeno de histéresis) siendo necesario comenzar de nuevo el ensayo.

c) Cuando la dínamo gira a la velocidad fijada, pero es nula la corriente de excitación $I_{ex.}$, tanto en la curva ascendente como en la descendente, se

obtienen valores de f. e. m., en el voltímetro (E_{0a} y E_{0b}), que corresponden al magnetismo remanente (fig. 17.4).

d) Si durante el ensayo ha de cambiarse de amperímetro en el circuito de excitación, no debe interrumpirse el circuito, para lo cual habrá de *puentearse* el aparato.

e) Caso de variar la velocidad durante el ensayo, antes de tomar los valores de E_0 e $I_{ex.}$, se actuará sobre la máquina motriz hasta conseguir la velocidad fijada para el ensayo.

Si el ajuste de velocidad no puede conseguirse, será válido el ensayo (siempre que la variación de velocidad no exceda del 10 %), si se reducen los valores de la f. e. m. a la velocidad nominal, mediante la expresión:

$$E_{real} = E_{media} \cdot \frac{N_{normal}}{N_{media}}$$

en donde:

E = f. e. m. (V)
N = velocidad (r. p. m.)

17.1.5 *Característica de vacío de los generadores autoexcitados*

En general, se aplicará todo lo dicho anteriormente, con las particularidades siguientes:

17.1.5.1 *Generador de excitación en derivación*

— Los bornes del circuito inductor están en paralelo con los bornes del inducido (fig. 17.5).

— El sentido de rotación debe ser el conveniente, y vendrá indicado por una flecha. Si, al poner el generador en funcionamiento, se observa que no se excita, la causa podría ser la pérdida del magnetismo remanente, y se solucionaría haciéndole girar en sentido contrario.

— El funcionamiento sólo será aproximado a las condiciones de la característica, ya que circulará la $I_{ex.}$ por el inducido.

— La resistencia del circuito inductor ha de ser inferior a la crítica (apartado 9.1.1.3) por lo que el valor del reóstato (R_r) habrá de tener un valor apropiado. Si el valor de (R_r) es superior al permisible, la máquina no suministrará tensión.

— Las variaciones de tensión y corriente tienen lugar simultáneamente, con el inconveniente para la toma de valores, principalmente en la 1.ª zona rectilínea.

— La forma de la curva es similar a la del generador de excitación independiente.

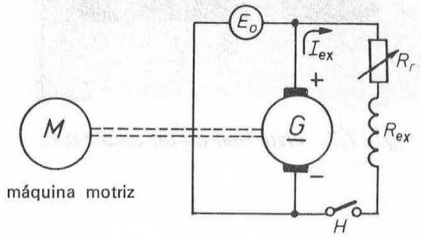


Fig. 17.5 Esquema de montaje correspondiente al ensayo de vacío de un generador derivación.

17.1.5.2 *Generador de excitación compuesta*

El ensayo se obtiene en el circuito de excitación derivación, por lo que servirá de aplicación lo dicho para el generador derivación.

17.1.5.3 *Generador de excitación serie*

El ensayo de vacío podrá obtenerse separando la excitación y conectándola a una red independiente.

Por el circuito de excitación ha de pasar la corriente de excitación normal y, por tanto, bastante elevada, por lo que habrá de suministrársela una *fuente de intensidad.*

La forma de la curva obtenida es similar a las obtenidas en los restantes generadores.

17.2 Determinación de la característica en carga

La característica en carga (apartado 8.6) se representa por:

$$V_b = f\ (I_{ex.}) \quad \text{para} \quad \begin{cases} I_i = \text{cte.} \\ N = \text{cte.} \end{cases}$$

y se obtiene por medio de un *ensayo en carga.*

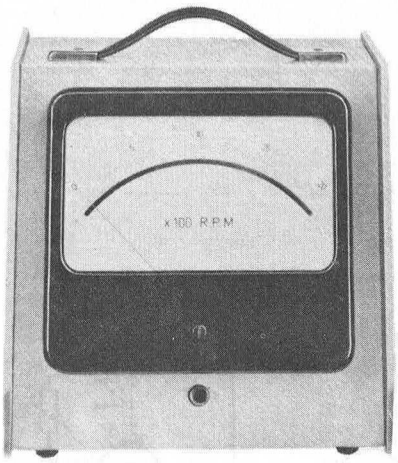


Fig. 17.7 Vista real de un tacómetro.

En la figura 17.6 se indica el esquema de montaje de un generador de excitación independiente, diferenciándose del esquema para el ensayo de vacío en el circuito de carga, que ahora estará formado por una resistencia variable R.

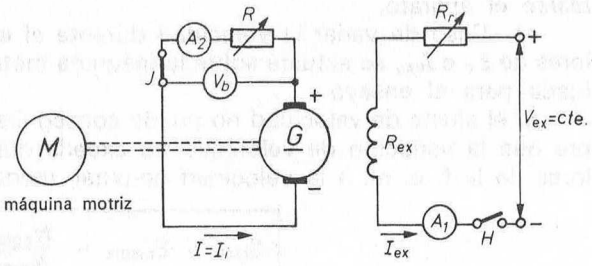


Fig. 17.6 Esquema de montaje correspondiente al ensayo en carga de un generador de excitación independiente.

17.2.1 *Modo de trabajo*

Una vez en marcha el grupo, se ajustará la velocidad al valor fijado (normalmente la nominal), y se *mantendrá constante* a lo largo del ensayo. Para ello, se utilizará un tacómetro, por ejemplo el de la figura 17.7.

Se conecta el circuito de excitación con la máxima resistencia del reóstato R_r y se cierra el circuito de carga (J), también con el valor máximo de resistencia R.

El amperímetro A_2 señalará el paso de una corriente, y habrá de comprobarse que la corriente de carga coincida con el valor fijado para el ensayo (normalmente la $I_{p.\,c.}$).

Para conseguir que circule la corriente de carga fijada, habrá de actuarse sobre el reóstato de excitación R_r.

17.2.2 *Toma de valores*

Una vez fijada la corriente de carga a su valor, se toman las lecturas del voltímetro (V_b) y amperímetro (A_1), y se anotan en el casillero correspondiente (tabla 17.8).

A continuación, se irá disminuyendo la resistencia R_r, con lo que aumentará la corriente $I_{ex.}$ y, en consecuencia, la intensidad de carga I_i. Para que ésta se mantenga constante, será necesario actuar simultáneamente sobre la resistencia de carga R.

Así se irán formando nuevos pares de valores de $I_{ex.}$ y V_b, que permitirán trazar la curva.

Tabla 17.8 Mediciones correspondientes a la característica en carga de un generador

Punto de la curva	*Magnitudes medidas*				*V_b (real)*	*Observaciones*
	$I_{ex.}$ (A)	*V_b (V)*	*N (r. p. m.)*	*I_i (A)*	*V_b (V)*	
1						Curva ascendente
2						
3						
X						
X						Curva descendente
2						
1						

17.2.3 *Representación de la característica del generador de excitación independiente*

Una vez que los valores respondan a las condiciones exigidas a la característica, se representan en un sistema de ejes, como indica la figura 17.9.

La forma de la curva obtenida es parecida a la característica de vacío, sólo que con valores inferiores de ordenadas para las mismas abscisas, debido a la caída de tensión producida en carga.

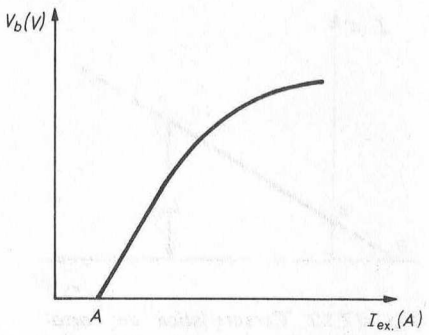


Fig. 17.9 Curva característica en carga del generador de excitación independidnte.

17.2.4 *Observaciones*

— Coinciden con las observaciones *a*, *b* y *d*, del ensayo de vacío (apartado 17.1.4).

— En la obtención del *punto de cortocircuito* (*A*) la resistencia de carga *R* estará al mínimo (nula), por lo que el voltímetro señalará tensión nula y el amperímetro A_2 seguirá indicando el valor fijado para la corriente de carga. Si no puede obtenerse el punto de cortocircuito, por superar la corriente de carga el valor fijado, será necesario intercalar una resistencia R_r de mayor valor, o disminuir la tensión de excitación ($V_{ex.}$).

17.2.5 *Característica en carga de los generadores autoexcitados*

En general será de aplicación lo dicho anteriormente, si bien se observarán las siguientes variaciones.

17.2.5.1 *Generador de excitación en derivación*

— El esquema de montaje es el representado en la figura 17.10.

— El sentido de rotación deberá ser el correcto, para conseguir el cebado de la máquina.

— No podrá obtenerse el punto de cortocircuito *A* (fig. 17.9), ya que entonces será nula la tensión de excitación.

— La forma de la curva será similar a la del generador de excitación independiente.

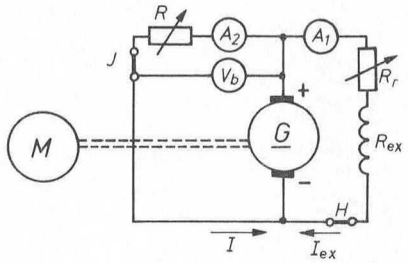


Fig. 17.10 Esquema de montaje correspondiente al ensayo en carga de un generador de excitación en derivación.

17.2.5.2 *Generador de excitación compuesta*

— El esquema de montaje es similar al del generador derivación (fig. 17.9), ya que el devanado serie produce un flujo constante por estar atravesado por la corriente exterior, que permanece constante durante el ensayo.

— La forma de la curva varía con respecto al generador derivación, ya que el devanado serie también produce un campo magnético, aunque constante, resultando la curva de la figura 17.11.

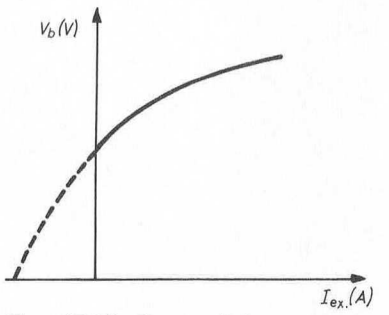


Fig. 17.11 Característica en carga de un generador de excitación compuesta.

17.2.5.3 *Generador de excitación serie*

— El esquema de montaje es el representado en la figura 17.12.

— Al actuar sobre el reóstato R_r, en paralelo con el devanado de campo, se desviará la corriente, y podrá conseguirse la condición de que la corriente que pasa por el inducido (I_i) permanezca constante.

— La forma de la curva es similar a la obtenida para el generador derivación.

17.3 **Determinación de la característica en cortocircuito**

La característica en cortocircuito (apartado 8.7.2) se representa por:

$$\boxed{I_{ex.} = f\ (I_i)} \quad \text{para} \quad \begin{cases} V_b = 0 \\ N = \text{cte.} \end{cases}$$

y se obtiene por medio del *ensayo en cortocircuito.*

Este ensayo solamente puede obtenerse en el generador de excitación independiente, ya que una de las condiciones es *ser nula la tensión* en bornes.

El esquema de montaje es el de la figura 17.6, con la condición de que esté cortocircuitado el reóstato de carga *R*.

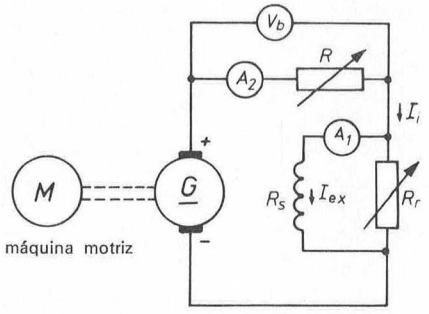


Fig. 17.12 Esquema de montaje correspondiente al ensayo en carga del generador de excitación en serie.

17.3.1 *Modo de trabajo*

Es similar al seguido para la obtención del punto de cortocircuito *A*, de la característica de carga (apartado 17.2.4).

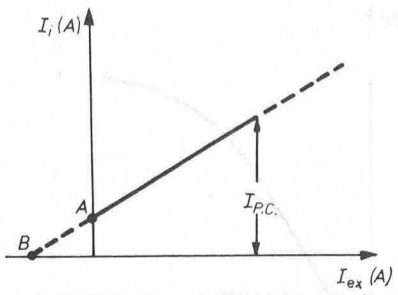


Fig. 17.13 Característica de cortocircuito de un generador de excitación independiente.

Variando la resistencia del circuito de excitación R_r, lo hará el valor de la corriente I_i.

17.3.2 *Toma de valores y representación de la característica del generador de excitación independiente*

Para cada valor de excitación se toman los valores de $I_{ex.}$ e I_i y se representan en un sistema de ejes.

En el eje de abscisas se representa la corriente $I_{ex.}$ y en el de ordenadas la corriente I_i (fig. 17.13). Al ser la característica una línea recta, puede prolongarse desde el punto A al B, como indica la línea de trazos.

17.3.3 *Observaciones*

— Este ensayo ha de hacerse con la *máxima atención y cuidado posibles,* para evitar accidentes o averías. Se recuerda la importancia de lograr un valor mínimo de corriente $I_{ex.}$, bien con una resistencia R_r elevada, o por disminución de la tensión de excitación $V_{ex.}$.

— El valor de la corriente de inducido máximo será el de plena carga.

17.4 Determinación de la característica de regulación

La característica de regulación (apartado 8.7.1) se representa por:

$$\boxed{I_{ex.} = f\ (I_i)} \quad \text{para} \quad \begin{cases} V_b = \text{cte.} \\ N = \text{cte.} \end{cases}$$

y se obtiene por medio de un *ensayo en carga.*

El esquema de montaje coincide con el de la figura 17.6.

17.4.1 *Modo de trabajo*

Una vez el grupo en funcionamiento, se llevará a la velocidad fijada para el ensayo (nominal), y se *mantendrá constante* a lo largo del ensayo.

Con el interruptor J abierto, se actúa sobre el reóstato R_r, hasta que el voltímetro V_b marque la tensión fijada para el ensayo (suele elegirse el valor nominal).

17.4.2 *Toma de valores y representación de la característica del generador de excitación independiente*

El primer punto corresponderá al valor obtenido para corriente de carga nula y vendrá indicado por la lectura del amperímetro A_1.

Cerrando el interruptor de la carga J, disminuirá la tensión V_b, por lo que habrá de actuar simultáneamente sobre R_r y la carga R, hasta conseguir de nuevo que el valor de V_b sea el fijado. Tomando los valores de los amperímetros A_1 y A_2, se obtendrán los puntos de la curva y se anotarán en el estadillo de mediciones (tabla 17.14).

Los restantes puntos se obtendrán variando la carga y la corriente de excitación.

La representación gráfica de los valores medidos da lugar a la curva de la figura 17.15.

17.4.3 *Observaciones*

— Coinciden con las *a, b* y *d* del ensayo de vacío (apartado 17.1.4).

— El valor de la corriente del inducido no ha de pasar del valor de plena carga.

— Una vez dibujada la curva característica, permitirá calcular la resistencia exacta del reóstato de excitación R_r.

17.4.4 *Característica de regulación de los generadores autoexcitados*

En general será de aplicación lo dicho para el generador de excitación independiente, con las siguientes variantes:

17.4.4.1 *Generador de excitación en derivación*

— El esquema de montaje coincide con el representado en la figura 17.10.

— La característica se obtiene de forma similar al generador de excitación independiente.

Tabla 17.14 Mediciones correspondientes a la característica de regulación

Punto de la curva	*Magnitudes medidas*				$I_{ex.}$ *(real)*	*Observaciones*
	$I_{ex.}$ *(A)*	I_i *(A)*	*N (r. p. m.)*	V_b *(V)*	$I_{ex.}$ *(A)*	
1						Curva ascendente
2						
3						
X						
X						Curva descendente
2						
1						

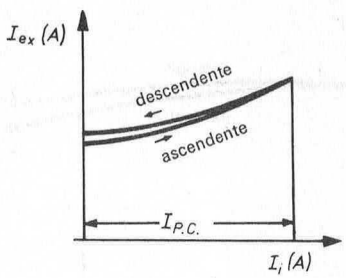


Fig. 17.15 Característica de regulación de un generador de excitación independiente.

17.4.4.2 *Generador de excitación compuesta*

— El esquema de montaje es similar al utilizado en la característica de carga.
— La característica se obtiene de forma idéntica que en el generador derivación.

17.4.4.3 *Generador de excitación en serie*

— El esquema de montaje es el de la figura 17.12.
— Esta característica, además de que resultará bastante compleja, no tiene prácticamente interés en este generador.

17.5 Determinación de las características exterior e interior

La característica exterior (apartado 8.8) se representa por:

$$\boxed{V_b = f\ (I)} \quad \text{para} \quad \begin{cases} I_{ex.} = \text{cte.} \\ N = \text{cte.} \end{cases}$$

y se obtiene por medio de un *ensayo en carga.*

La característica interior (apartado 8.8) se representa por:

$$\boxed{E = f\ (I_i)} \quad \text{para} \quad \begin{cases} I_{ex.} = \text{cte.} \\ N = \text{cte.} \end{cases}$$

y se obtiene por cálculo a partir de la característica exterior.

De todas las características tratadas, es sin duda la exterior la que *ofrece un mayor interés,* ya que indica, para cada tipo de generador, la tensión que suministra en función de la carga.

El esquema de montaje para el generador de excitación independiente se ha representado en la figura 17.6.

17.5.1 *Modo de trabajo*

Una vez en marcha la máquina motriz, se acoplará mecánicamente al eje del generador, hasta hacer girar a su inducido a la velocidad fijada para el ensayo (suele ser la nominal), que deberá permanecer constante a lo largo de la prueba.

A continuación, se cierra el interruptor del circuito de excitación *H* y, por medio del reóstato R_r, se ajusta la corriente $I_{ex.}$ al valor fijado para el ensayo, y permanecerá constante a lo largo del ensayo.

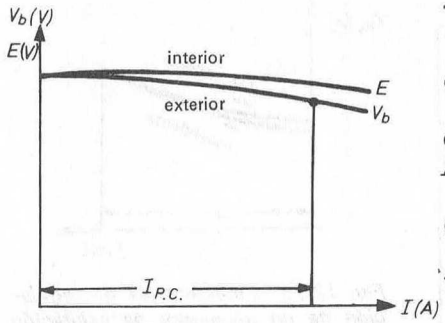


Fig. 17.17 Características exterior e interior de un generador de excitación independiente.

17.5.2 *Toma de valores*

El primer punto corresponde al funcionamiento en vacío, y vendrá indicado por el voltímetro V_b.

A continuación, se cierra el interruptor de la carga con la posición máxima de resistencia en R, y se toman los valores de tensión V_b e intensidad de carga I, para anotarse en el estadillo de mediciones (tabla 17.16).

Los restantes puntos se obtendrán actuando sobre la resistencia de carga R, aumentando la corriente I.

La representación gráfica de los valores medidos da lugar a la curva de la figura 17.17.

Tabla 17.16 Mediciones correspondientes a las características exterior e interior

Punto de la curva	*Magnitudes medidas*					*Observaciones*
	V_b (V)	I (A)	$I_{ex.}$ (A)	N (r. p. m.)	E (V)	
1						
2						
3						
X						

17.5.3 *Observaciones*

— La velocidad ha de permanecer constante a lo largo del ensayo y si en alguna medición hubiera variado, se actuará sobre la máquina motriz para corregirla.

— El reóstato exterior se elegirá de acuerdo con la tensión e intensidad nominales del generador. Si un solo reóstato no reúne las condiciones indicadas, puede recurrirse a la conexión en paralelo, o mixto de varios de ellos, otras cargas, etc.

— En este ensayo no debe pasarse de un 20 % de la intensidad nominal.

— Para hallar la característica interior, es necesario medir la resistencia interior del inducido R_i. Esta medición se hace con el rotor parado; por el método industrial, puentes, etc. (apartado 4.2.4).

— La característica interior se obtiene sumando, a la exterior, el término: $(R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$, puesto que se cumple (apartado 8.8.2):

$$E = V_b + (R_i \cdot I_i) + 2\ U_e$$

y corresponde a la curva situada por encima de la característica exterior de la figura 17.17.

17.5.4 *Característica exterior de los generadores autoexcitados*

En general, se seguirá el método citado para el generador de excitación independiente, con las variaciones siguientes:

17.5.4.1 *Generador de excitación en derivación*

— Para el trazado de esta característica se utilizará el esquema representado en la figura 17.10.

— El sentido de rotación será el adecuado para conseguir el cebado de la máquina.

— El 1.^{er} punto se obtendrá actuando sobre R_r, hasta que el amperímetro A_1 señale la corriente de excitación fijada, y con el interruptor de la carga J abierto.

— La posición del reóstato R_r *no se variará en toda la prueba,* a pesar de que la intensidad de excitación varíe a lo largo del ensayo y, por tanto, no cumpla la condición exigida, en general, a la característica exterior.

— Si el valor de la corriente de carga supera ampliamente el valor nominal, se producirá un rápido descenso de tensión, llegando incluso a anularse, según indica la curva característica señalada a trazos (fig. 17.18).

— La forma de la característica es similar, al principio, a la del generador independiente, si bien, después, disminuye rápidamente por hacerlo la tensión de excitación ya que está en paralelo con el inducido.

— La característica interior se obtiene de igual forma que para el generador derivación, aunque se comete un pequeño error, por no coincidir el valor de las corrientes exterior (I) e interior (I_i).

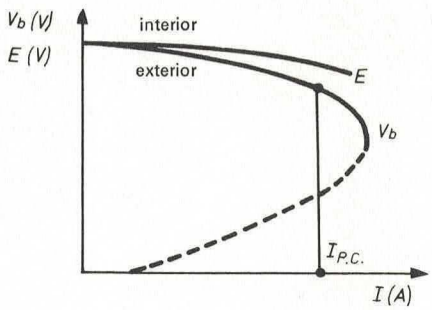


Fig. 17.18 Características exterior e interior de un generador derivación.

17.5.4.2 *Generador de excitación compuesta*

— El esquema de montaje es el representado en la figura 17.19.

— El ensayo es similar al del generador derivación.

— La forma de las curvas dependerá del tipo de conexión entre los campos derivación y serie estando representadas en la figura 17.20.

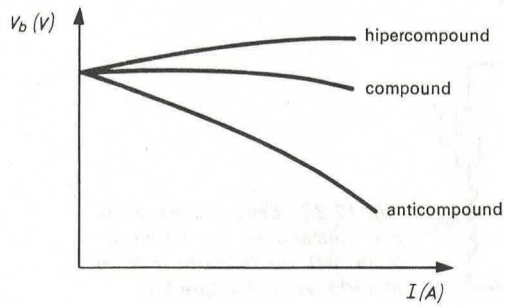


Fig. 17.20 Características exteriores de generadores compound.

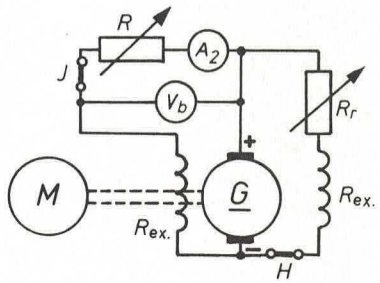


Fig. 17.19 Esquema de montaje correspondiente al ensayo en carga de un generador de excitación compuesta.

17.5.4.3 *Generador de excitación serie*

— El esquema de montaje coincide con el representado en la figura 17.12.

— Una vez fijado el valor de la corriente de excitación, no se actúa sobre el reóstato de excitación R_r.

— Es aconsejable comenzar el ensayo para el valor nominal de tensión e intensidad y, posteriormente, disminuir la corriente de carga, al actuar sobre el reóstato R.

— Si se cortocircuita la carga R, la intensidad tomará valores elevados según indica la característica (fig. 17.21) zona de trazos. Para establecer comparación entre las características de vacío, exterior e interior, se han superpuesto en el mismo diagrama.

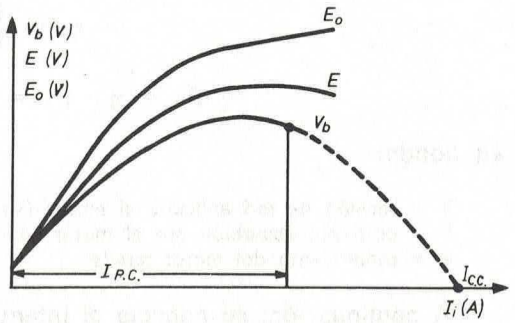


Fig. 17.21 Características de vacío, exterior e interior de un generador serie.

17.6 **Determinación del rendimiento de un generador**

En el Tema 16 se indicaron los diferentes métodos utilizados para la determinación del rendimiento, según Normas UNE. En general, se dividen en:

a) Medida directa.

b) Medida indirecta.

En ambos casos el rendimiento se ha de averiguar en función de la carga, siendo lo más indicado obtener al menos los puntos que corresponden a 1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4 de su potencia nominal.

17.6.1 *Medida directa del rendimiento*

Este procedimiento presenta dificultades de realización, especialmente en las *máquinas de gran potencia,* ya que ha de disponerse de máquinas motrices de potencia superior a la máquina en ensayo, así como de cargas capaces de absorber dichas potencias.

Un procedimiento muy generalizado para la medida del rendimiento por el procedimiento directo es el *método del motor tarado.*

17.6.1.1 *Método del motor tarado*

Este método utiliza como máquina motriz un motor tarado, del que se conoce el rendimiento a cualquier carga, que se acopla mecánicamente al generador a ensayar (fig. 17.22). Se ha elegido un generador de excitación en derivación, si bien puede extenderse a cualquier otro tipo.

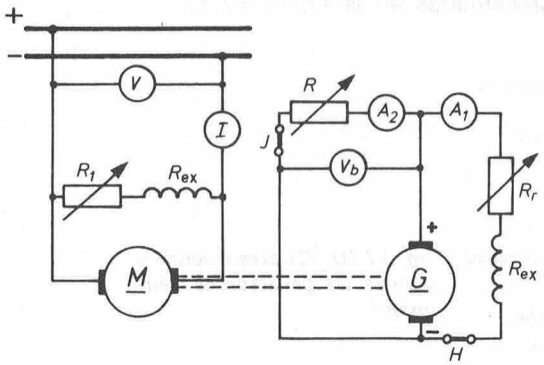


Fig. 17.22 Esquema de montaje utilizado en la medida directa del rendimiento por el método de motor tarado.

Una vez el grupo en funcionamiento, se lleva a la velocidad nominal del generador, manteniéndose constante a lo largo del ensayo; para ello se actúa sobre R_1 del motor.

Se ajusta el circuito de excitación del generador al valor nominal de corriente de excitación, mediante el reóstato R_r, aunque normalmente este punto corresponde al reóstato eliminado. Con el circuito exterior abierto (J), se realiza la primera medida.

La primera medida corresponde a las *pérdidas constantes* (independientes de la intensidad del generador), y coinciden con la potencia útil del motor tarado.

En cada medición la potencia útil del motor se obtiene a partir de la potencia eléctrica que absorbe de la red, y de su rendimiento (conocido para cualquier carga):

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_u = \eta \cdot P_a = \boxed{\eta \cdot V \cdot I}$$

en donde:

V = tensión de red aplicada al motor (V)
I = corriente absorbida por el motor (A)
η = rendimiento del motor tarado

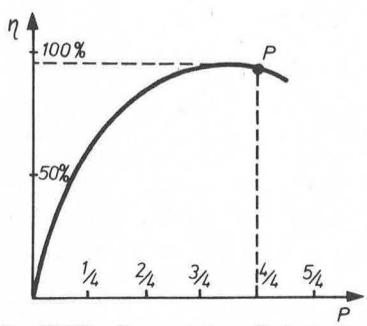


Fig. 17.23 Curva del rendimiento industrial de un generador de excitación en derivación.

A continuación, se conecta el interruptor del circuito de carga del generador J, y se ajusta ésta hasta que alcance aproximadamente 1/4 de la potencia nominal, y será la potencia útil del generador. La potencia absorbida por el generador será la útil del motor tarado, y se determinará por el sistema anterior.

Los restantes puntos se obtienen de forma similar, llegando hasta plena carga o incluso por encima de plena carga (5/4).

La curva del rendimiento en función de la carga suele ser de la forma representada en la figura 17.23.

17.6.2 *Medida indirecta del rendimiento*

La Norma UNE 20116-74 da una relación de *ensayos preferentes,* y en las máquinas de c. c. fija la determinación del rendimiento por el método de *pérdidas constantes* (independientes de la carga), como *preferente.*

La determinación de pérdidas constantes se hizo en el Tema 16.
El rendimiento vendrá dado por la expresión:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_p}$$

$$P_p = P_o + P_J + P_{es.} + P_{ad.}$$

en donde:

P_u = potencia útil suministrada por el generador
P_p = potencia perdida total
P_o = potencia perdida en circuito abierto = cte.
P_J = potencia perdida por efecto Joule en el inducido
$P_{es.}$ = potencia perdida en las escobillas en carga.
$P_{ad.}$ = potencia considerada como pérdidas adicionales en carga.

17.6.2.1 *Determinación del rendimiento*

Mediante un ensayo en circuito abierto se obtienen las *pérdidas constantes independientes* de la carga (P_o), de las que habrá que restar las pérdidas Joule en el inducido y en el circuito de excitación. Estas pérdidas se *mantendrán constantes* para cualquier valor de carga.

Las restantes pérdidas (P_J, $P_{es.}$, $P_{ad.}$) se determinan por cálculos, para las diferentes fracciones de carga. En algún caso se determinan mediante tablas fijadas por Normas o fabricantes.

El valor de la potencia útil se determina por cálculo ($P_u = V \cdot I$), coincidiendo con las fracciones de carga fijadas anteriormente.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Métodos utilizados en la medición de la resistencia del inducido de un generador de c. c.

— Explicar la forma de determinar el coeficiente de regulación de los diferentes tipos de generadores, a partir de las curvas características, obtenidas según los ensayos desarrollados a lo largo del tema.

— Realizar un estadillo de mediciones para el cálculo del rendimiento de un generador de c. c. por el método de pérdidas separadas, tomando diferentes valores de carga.

CUESTIONARIO

17.1 Explicar la diferencia entre ensayos de prototipo, ensayos de tipo y ensayos de rutina.

17.2 ¿Qué es un ensayo de muestreo?

17.3 ¿Qué es un ensayo de recepción?

17.4 ¿Cuál es la finalidad de los ensayos en general?

17.5 ¿Qué condiciones han de reunir las fuentes de energía utilizadas en los ensayos de generadores de c. c.?

17.6 ¿Qué utilización tienen los baños de carga y reóstatos de líquido, en la realización de los ensayos?

17.7 ¿Qué condiciones han de reunir los instrumentos eléctricos de medida utilizados en los ensayos de generadores c. c.?

17.8 ¿Cuáles son las comprobaciones mecánicas aconsejables de realizar por su relación con el ensayo de conmutación de un generador de c. c.?

17.9 ¿Qué ventajas presenta el generador de excitación independiente frente a los generadores autoexcitados, en la realización de los ensayos?

17.10 Una dínamo de excitación independiente consume 400 W en el devanado inductor, por efecto Joule, a 200 V. Averiguar la resistencia del reóstato que habrá de intercalarse en serie con el circuito inductor para conseguir puntos de la curva de vacío, a partir del 10 % de la corriente de excitación nominal.

Respuesta: $R_r = 900\ \Omega$.

17.11 Al realizar un ensayo de vacío a una dínamo de excitación independiente se han obtenido los siguientes datos:

Magnitudes	*Sentido ascendente*									*Sentido descendente*							
$I_{ex.}$ (A)	0	0,25	0,50	0,75	1	1,25	1,50	1,75	2	1,75	1,50	1,25	1	0,75	0,50	0,25	0
E_o (V)	5	46	85	118	139	150,5	157,5	161	164	160	158	152	141	122	88	49,5	7,5
N (r.p.m.)	1 500	1 490	1 490	1 480	1 490	1 490	1 490	1 490	1 490	1 480	1 480	1 480	1 480	1 480	1 490	1 490	1 490

Sabiendo que la velocidad fijada para el ensayo es de 1 500 r. p. m., representar la curva característica de vacío y comprobar si responde al tipo normal de curva de magnetismo de una máquina de c. c.

17.12 Representar la característica de vacío de un generador derivación, a partir de los datos obtenidos en el ensayo en circuito abierto:

Magnitudes	*Sentido ascendente*									*Sentido descendente*							
$I_{ex.}$ (A)	0,006	0,05	0,25	0,46	0,74	1,2	1,6	2,25	3,3	3,2	1,6	0,91	0,58	0,31	0,14	0,012	0,008
E_0 (A)	2,4	5,6	22	40	60	80	90	100	106	106	90	70	50	30	15	3	2,8
N (r.p.m.)	1 500	1 500	1 495	1 500	1 500	1 500	1 495	1 500	1 505	1 500	1 500	1 500	1 500	1 495	1 500	1 495	1 500

17.13 Representar la característica de plena carga de un generador de excitación independiente, a partir de los datos obtenidos en el ensayo en carga.

$I_{ex.}$ (A)	0,022	0,25	0,27	0,3	0,35	0,45	0,55	0,652	0,855	1,35	1,5
V_b (V)	0	23	25	27,5	32	40	48	56	72	96	100
I_i (A)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
N (r.p.m.)	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450

17.14 Representar la característica de regulación de un generador de excitación derivación, a partir de los datos obtenidos en el ensayo en carga:

Magnitudes	*Ascendente*						*Descendente*			
$I_{ex.}$ (A)	1,65	1,72	1,93	2,15	2,4	2,75	2,3	2	1,8	1,68
I (A)	0	3	10	16,1	21	26,5	19	11,5	4,5	0
V_b (V)	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
N (r. p. m.)	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440

Una vez representada la curva, calcular el reóstato necesario en el circuito de excitación para obtener la característica de regulación, sabiendo que para $I_{ex.}$ = 2,75 A el reóstato está eliminado.

17.15 Representar la característica exterior de un generador de excitación independiente y calcular el coeficiente de regulación (tensión nominal = 100 V), a partir de los datos obtenidos en el ensayo de carga.

I(A)	0	6,3	12,4	18	20	22	24	26,2
V_b (V)	130	125	122	118	116,5	115	113	110
$I_{ex.}$ (A)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
N (r. p. m.)	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450

BIBLIOGRAFIA

UNE, *Instituto Nacional de Racionalización y Normalización,* Madrid.

TIBERIO F., *Pruebas de máquinas eléctricas,* Vicens-Vives, Barcelona 1965.

BANDINI A., *Ensayos de máquinas,* Rede, Barcelona 1967.

Información técnica de casas comerciales (De Lorenzo, Distesa, etc.).

Tema 18

Ensayos propios de los motores de c. c.

OBJETIVOS

— *Verificar el estado de saturación del circuito magnético de un motor de c. c.*

— *Comparar los tipos de frenos utilizados para la medida de la potencia mecánica.*

— *Comprobar la variación de velocidad en un motor, desde vacío a plena carga.*

— *Determinar el par que suministra un motor a cualquier régimen de carga.*

— *Determinar el rendimiento de un motor por procedimientos directo e indirecto.*

GUION

— Generalidades.
— Medida de la potencia mecánica.
— Determinación de la característica de velocidad.
— Determinación de la característica de par motor.
— Determinación de la característica mecánica.
— Determinación del rendimiento de un motor.

PUNTOS CLAVE

— Determinar la potencia mecánica cedida por un motor o absorbida por un generador.
— Realizar ensayos al freno para determinar el conjunto de características electromecánicas de un motor.
— Comparar los métodos utilizados para la determinación del rendimiento de un motor.

EXPOSICION DEL TEMA

18.1 Generalidades

Al igual que sucedía en los generadores, el estudio del motor de c. c. se realiza a través de sus características electromecánicas (ver apartado 11.5), que relacionan entre sí las magnitudes: *velocidad de rotación* (N); *par motor* (M), y *corriente del inducido* (I_i).

En este tema se tratarán los *ensayos* que han de realizarse para determinar las características electromecánicas.

Las magnitudes que intervenían en el funcionamiento del generador se determinaban por medio de aparatos de medida eléctricos, excepto la velocidad, que podía ser un aparato mecánico o eléctrico (tacómetro).

En el funcionamiento del motor, intervienen el *par* y la *potencia mecánica,* que se determinarán por otro tipo de aparatos como son frenos, dínamo-freno, etc., que se tratarán a continuación.

Conviene recordar, además, como característica importante, la *curva de vacío* del motor, ya que sirve para analizar el estado de su circuito magnético y saturación. Esta curva se obtiene de forma similar al ensayo en circuito abierto del generador.

18.2 **Medida de la potencia mecánica**

La determinación de la potencia mecánica que cede un motor de c. c., a la máquina accionada, se realiza por medio de frenos, como el utilizado antiguamente, freno Prony, del que se perfeccionaron otros sistemas, como los frenos electromagnéticos, dínamos-freno, etc., que se utilizan en la actualidad.

18.2.1 *Freno mecánico*

El freno Prony está formado por dos zapatas de madera A_1 y A_2 (fig. 18.1) que abrazan la polea B, solidaria al árbol del motor en ensayo.

La presión que ejercen las zapatas contra la polea se puede graduar, actuando sobre los tornillos con tuerca de mariposa.

Una de las zapatas se prolonga por los lados (brazos), sirviendo uno de ellos para colgar en su extremo un platillo con pesas, y el otro para indicar la posición de equilibrio a la vez que limitará el giro del conjunto por acción de los topes.

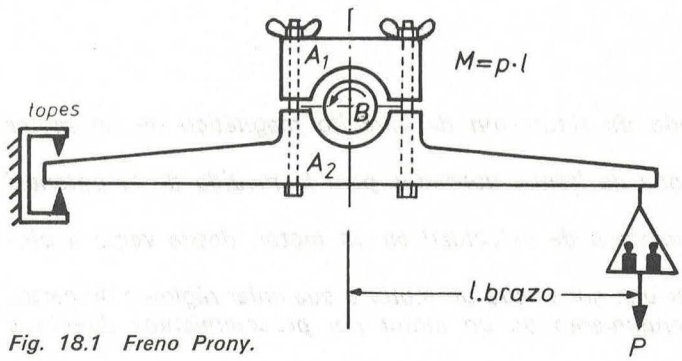


Fig. 18.1 Freno Prony.

18.2.1.1 *Fundamento del frenado*

En posición de reposo, el freno mantiene su posición horizontal.

Al apretar las zapatas, y empezar a girar la polea en el sentido indicado por la flecha, la polea tiende a arrastrar al freno en su mismo sentido de giro, y para impedirlo se colocarán pesas en el platillo, hasta ocupar el freno la *posición horizontal* (equilibrio).

En estas condiciones el *par desarrollado en la polea* estará equilibrado por el *par producido por acción de las pesas.*

Así, pues, el par aplicado al freno y, por tanto, el par desarrollado por la polea, será:

$$\boxed{M = p \cdot l}$$

en donde:

p = pesas totales (kgf)
l = longitud del brazo (m)
M = par desarrollado por la polea (kgf · m)

Como la polea gira a N (r. p. m.), su velocidad angular será:

$$\omega = 2\,\pi \cdot \frac{N}{60} \quad (\text{rad/s})$$

La potencia de frenado es el producto del par por la velocidad angular:

$$P = M \cdot \omega = (p \cdot l) \cdot 2\,\pi\,\frac{N}{60}\left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}\right)$$

siendo: 1 kgf · m/s = 9,81 W.

Expresando la potencia en vatios será:

$$P = (p \cdot l) \cdot 2\,\pi\,\frac{N}{60} \times 9{,}81 = 1{,}027 \cdot p \cdot l \cdot N$$

o sea:

$$P = 1{,}027 \times p \cdot l \cdot N$$

en donde:

p = pesas del platillo (kgf)
l = longitud del brazo (m)
N = velocidad de rotación (r. p. m.)
P = potencia de frenado (W)

Aumentando la presión de las zapatas, aumentará la acción de frenado y, por tanto, el esfuerzo del motor, siendo éste el sistema utilizado para cargar el motor.

18.2.1.2 *Inconvenientes del freno Prony*

La potencia de frenado se transforma totalmente en calor, por rozamiento de las zapatas con la polea, y la madera se calienta demasiado, pudiendo incluso llegar a arder. Para evitarlo, se refrigera el dispositivo con agua.

También resulta complejo el sistema de regulación de la presión de las zapatas que, a su vez, acarreará dificultades en el equilibrado del freno.

Las dificultades anteriores han limitado el campo de aplicación del freno Prony, siendo utilizado antiguamente en potencias inferiores a 100 kW.

18.2.2 *Frenos electromagnéticos*

Está formado por un electroimán (*E*) situado en frente de un disco macizo de cobre o aluminio (fig. 18.2).

El electroimán puede bascular alrededor del disco que, a su vez, está fijado a un extremo del eje del motor a prueba.

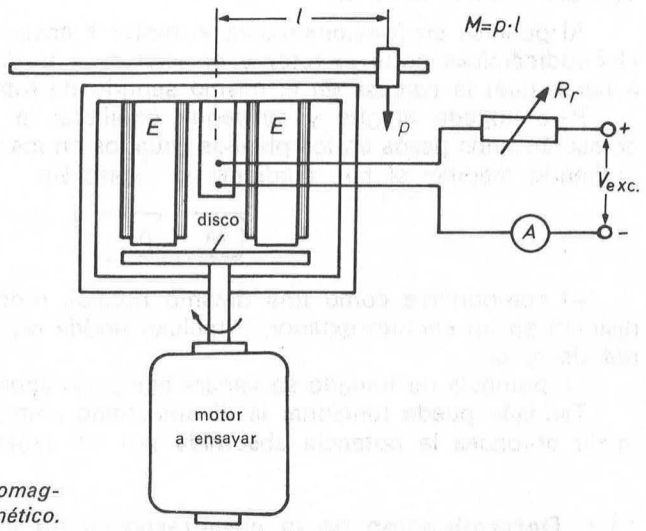


Fig. 18.2 Freno electromagnético.

Al girar el disco bajo la acción del campo magnético producido por el electroimán (alimentado por c. c.), da lugar a la creación de *corrientes parásitas* en el disco, que motivarán la rotación del electroimán. Para evitar el giro del electroimán, se aplicarán unas pesas (*p*) a un brazo de palanca solidario al electroimán.

Establecido el equilibrio, la potencia de frenado se determinará aplicando la fórmula anterior:

$$P = 1{,}027 \times p \cdot l \cdot N$$

La variación en la acción de frenado se consigue regulando la corriente de excitación que circula por las bobinas del electroimán, como indica el esquema de la figura 18.2, al actuar sobre R_r.

El freno electromagnético es muy utilizado en equipos de ensayos especiales para la enseñanza, ya que es muy práctico para potencias inferiores a unos 10 kW y, por tanto, coincide con las potencias de las máquinas a ensayar.

Este tipo de freno no es adecuado para los ensayos de larga duración, ya que el disco puede llegar a ponerse al rojo.

18.2.3 *Dínamo-freno*

Para superar los inconvenientes surgidos en los diferentes tipos de frenos citados, y en otros tipos (frenos de cinta, hidráulicos, etc.), se construyó la *dínamo-freno,* siendo su utilización, en la actualidad, universal.

Las características generales de la dínamo-freno son las mismas que la de una dínamo corriente, con la única diferencia de que la carcasa (estator) puede oscilar libremente por estar apoyada sobre unos cojinetes (fig. 18.3). Por otra parte, en la carcasa del inductor lleva acoplados dos brazos sobre los que se aplicarán unas pesas.

El rotor de la dínamo-freno se debe acoplar al eje del motor a ensayar.

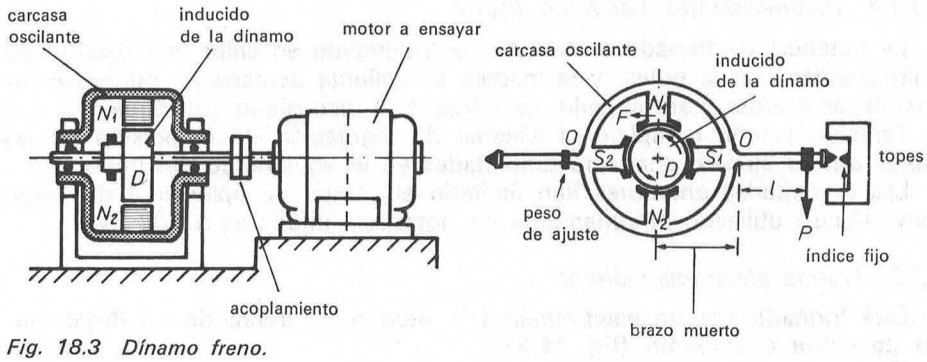


Fig. 18.3 Dínamo freno.

18.2.3.1 *Funcionamiento*

Al ponerse en funcionamiento el motor a ensayar, se crearán unas fuerzas electrodinámicas entre el rotor y el estator de la dínamo-freno, que tenderán a hacer girar la carcasa en el mismo sentido de rotación del motor.

Para impedir el giro y conseguir equilibrar la acción electrodinámica se colocarán unos pesos en los platillos situados en los brazos de la dínamo-freno, pudiendo medirse el par, mediante la expresión:

$$\boxed{M = p \cdot l}$$

Al comportarse como una dínamo normal, producirá una energía que se disipará en un circuito exterior, o incluso podría recuperarse por medio de una red de c. c.

La potencia de frenado se variará actuando sobre el circuito de excitación.

También puede funcionar la dínamo-freno como *motor de c. c.,* pudiendo medir entonces la potencia absorbida por un generador.

18.3 **Determinación de la característica de velocidad**

La característica de velocidad (apartado 11.5.1) se representa por:

$$\boxed{N = f\ (I_i)} \text{ para } V_b = \text{cte.}$$

y se obtiene por medio del ensayo al freno.

18.3.1 *Característica de velocidad del motor derivación*

En la figura 18.4 se indica el esquema de montaje correspondiente a un motor de excitación en derivación (similar al independiente como ya se indicó en el apartado 12.1.3).

18.3.1.1 *Modo operativo*

Una vez acoplado el motor a ensayar a la dínamo-freno o, en su defecto, a otro tipo de freno (de cinta, electromagnético, etc.), se conecta el motor a su tensión nominal V_b.

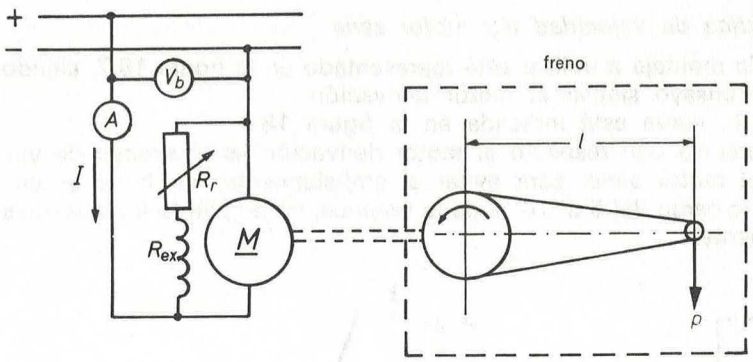


Fig. 18.4 Esquema de montaje correspondiente al ensayo del freno de un motor de excitación derivación.

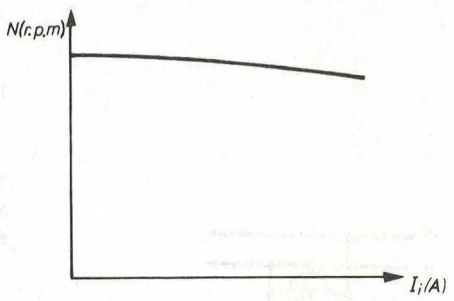


Fig. 18.6 Característica de velocidad de un motor derivación.

A continuación, se actúa sobre su excitación (R_r) llevando al motor a su velocidad nominal a plena carga, utilizándose el freno para cargar el motor.

Una vez fijada la excitación para el valor de plena carga, no se modificará en todo el ensayo.

18.3.1.2 *Toma de valores y representación de la característica*

El primer punto de la característica corresponde al funcionamiento del motor en vacío, por lo que habrá de separarse del freno. El amperímetro señalará la corriente absorbida de la red, que será algo superior a la corriente de inducido, si bien el error es de escasa importancia. La velocidad la indicará un tacómetro (fig. 17.7).

Los restantes puntos se obtendrán cargando el motor con el freno, y las lecturas de amperímetro y tacómetro se anotarán en su estadillo de mediciones (tabla 18.5). La forma de la curva está representada en la figura 18.6.

Tabla 18.5 Mediciones correspondientes al ensayo al freno de un motor de corriente continua

Carga	*Valores medidos*					*Valores calculados*			
	V_b (V)	I_{ab} (A)	N (r. p. m.)	l (m)	p (kgf)	M_u (kgf · m)	P_u (W)	P_a (W)	η
0									
1/4									
2/4									
3/4									
4/4									
5/4									
Observaciones						$M_u = p \cdot l$ (kgf · m) $P_u = 1{,}027 \cdot M_u \cdot N$ (W) $P_a = V_b \cdot I_{ab}$ (W) $\eta = \frac{P_u}{P_a}$			

18.3.1.3 *Observaciones*

a) Los ensayos a realizar son 6: uno en vacío y los otros a 1/4, 2/4, 3/4, 4/4 y 5/4 de plena carga, aproximadamente.

b) Las lecturas deben hacerse a la *temperatura de régimen,* para lo cual el motor habrá de estar funcionando en carga, cierto tiempo antes de comenzar el ensayo.

c) Debe vigilarse que la tensión de red V_b permanezca constante, y si varía ha de actuarse sobre la fuente de alimentación para llevarla a su valor normal.

18.3.2 *Característica de velocidad del motor serie*

El esquema de montaje a utilizar está representado en la figura 18.7, siendo la realización del ensayo similar al motor derivación.

La forma de la curva está indicada en la figura 18.8.

La única diferencia con respecto al motor derivación es el ensayo de vacío, ya que en el motor serie, para evitar el embalamiento, se hace el ensayo con una ligera carga del 5 al 10 % de la nominal, continuando los restantes ensayos normalmente.

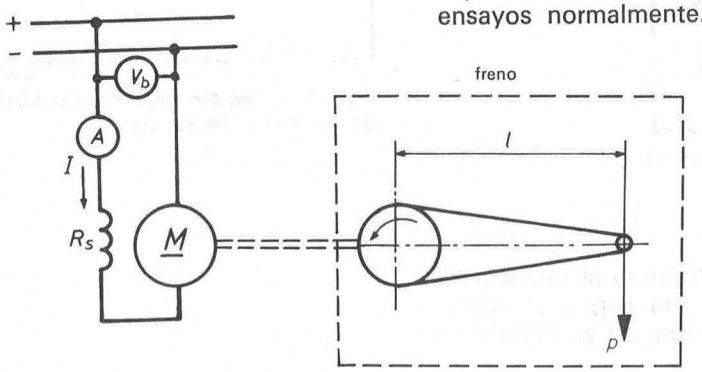


Fig. 18.7 Esquema de montaje correspondiente al ensayo al freno de un motor de excitación serie.

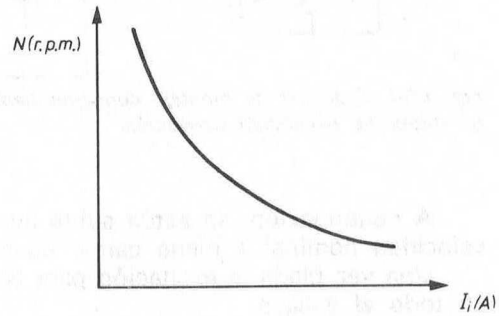


Fig. 18.8 Característica de velocidad de un motor serie.

18.3.3 *Característica de velocidad del motor compound*

Los ensayos que se realizan para determinar esta característica son similares a los explicados para el motor derivación.

Las formas de las curvas dependerán del tipo de motor, aditivo (fig. 12.16), o diferencial (fig. 12.19).

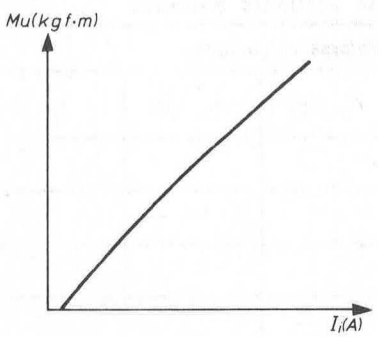


Fig. 18.9 Característica de par motor útil de un motor derivación.

18.4 Determinación de la característica de par motor

La característica del par motor (apartado 11.5.1), se representa por:

$$M_u = f\ (I_i) \quad \text{para } V_b = \text{cte.}$$

y se obtiene por el *ensayo al freno.*

18.4.1 *Característica de par motor del motor derivación*

El esquema de montaje es el representado en la figura 18.4, y la forma de realizar el ensayo coincide en su totalidad con la descrita para la característica de velocidad.

La única diferencia es la toma de mediciones, que ahora será el par desarrollado, en lugar de la velocidad, obtenido por la expresión:

$$M_u = p \cdot l$$

y se hará para cada valor de corriente del inducido, como se indica en el estadillo de mediciones anterior (tabla 18.5).

La forma de la característica se indica en la figura 18.9.

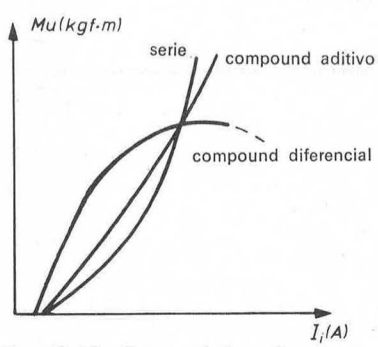


Fig. 18.10 Características de par motor útil de motores serie, compound aditivo y compound diferencial.

18.4.2 *Características de par motor en los motores serie y compound*

Se repite lo dicho para la obtención de la característica de velocidad, obteniéndose las curvas representadas en la figura 18.10.

18.5 Determinación de la característica mecánica

La característica mecánica (apartado 11.5.1) se representa por:

$$M_u = f\ (N) \quad \text{para } V_b = \text{cte.}$$

y se obtiene, bien por el ensayo al freno, o por cálculo a partir de las características de velocidad y de par motor.

La realización de los ensayos es similar a las características de velocidad y de par, sólo que ahora han de medirse el par y la velocidad en cada punto de la curva.

Las representaciones de las curvas obtenidas para los diversos tipos de motores se indicaron en las figuras 12.8, 12.15, 12.18 y 12.21.

18.6 Determinación del rendimiento de un motor

De forma similar al rendimiento de los generadores, podrá determinarse a partir de los métodos directo e indirecto.

Los puntos elegidos normalmente para representar la curva son los citados en los ensayos de *determinación de las curvas características,* o sea, 1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4, de la potencia nominal.

18.6.1 *Medida directa del rendimiento de un motor*

Se hace a la vez que se determinan las características electromecánicas, ya que éste se obtiene por cociente entre la potencia cedida por el motor y la potencia eléctrica absorbida:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

en donde:

$P_u = 1{,}027 \cdot p \cdot I \cdot N$ (medida con el freno)
$P_a = V_b \cdot I$ (medida con voltímetro y amperímetro)

La forma de la curva del rendimiento, aplicable a un motor de c. c. normal, se indica en la figura 18.11.

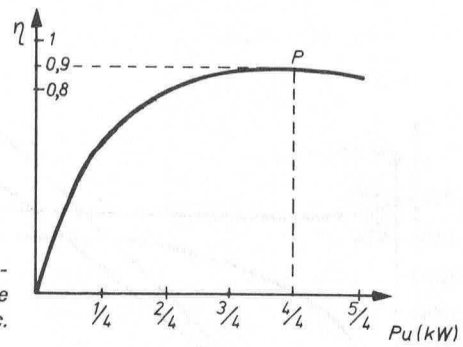


Fig. 18.11 Curva de rendimiento de un motor de c. c.

18.6.2 *Medida indirecta del rendimiento de un motor*

En motores de potencias superiores a 10 kW, aproximadamente, se determina el rendimiento por el sistema indirecto, debido a las dificultades que surgían para realizar los ensayos directos.

El rendimiento del motor es idéntico al que se obtendría si funcionara como generador (apartado 17.6.2), por lo que se aplicará el ensayo de pérdidas constantes, si bien la determinación de las pérdidas constantes es más sencilla, ya que bastará hacer funcionar el motor en vacío, a su tensión y velocidad nominales, y medir la potencia consumida de la red. La potencia eléctrica total absorbida menos las pérdidas por efecto Joule en el inducido y en el circuito de excitación, dará las pérdidas constantes, (independientes de la intensidad).

Ejercicio de aplicación

Como resumen de los ensayos a realizar para la determinación de las características electromecánicas, potencia y rendimiento de un motor de c. c., se dan a continuación, los datos obtenidos en el ensayo al freno de un motor de excitación en derivación de potencia nominal 4 CV a 220 V. Velocidad nominal 1 500 r. p. m.

Aunque en el laboratorio se toman los datos comprendidos en el apartado *Valores medidos,* se da completo el estadillo (tabla 18.12), con objeto de facilitar el ejercicio.

Tabla 18.12 Mediciones correspondientes al ensayo al freno de un motor derivación de 4 CV a 220 V y 1 500 r. p. m.

Carga aprox.	*Valores medidos*					*Valores calculados*			
	V_b (V)	I_{ab} (A)	N (r. p. m.)	l (m)	p (kgf)	M_u (kgf · m)	P_u (W)	P_a (W)	η
0	220	2,5	1 500	0,5	0	0	0	550	0
1/4	220	5,45	1 450	0,5	1	0,50	744	1 199	0,62
2/4	220	9,15	1 460	0,5	1,96	0,98	1 469	2 013	0,73
3/4	220	12,80	1 450	0,5	2,95	1,475	2 196	2 816	0,78
4/4	220	16,70	1 470	0,5	3,90	1,950	2 944	3 674	0,80
5/4	220	21,25	1 470	0,5	4,90	2,450	3 698	4 675	0,79

Observaciones

Se han elegido valores de carga lo más próximos posible a las fracciones indicadas.

$M_u = p \cdot l$ (kgf · m)
$P_u = 1{,}027 \cdot M_u \cdot N$ (W)
$P_a = V_b \cdot I_{ab}$ (W)
$\eta = \frac{P_u}{P_a}$

Solución:

Así, pues, aplicando las fórmulas correspondientes indicadas en la tabla 18.12, se completarán los valores que interesa representar en las curvas características.

El eje de abscisas es común a todas las características y representa la potencia útil (kW).

El eje de ordenadas representa los valores de velocidad (N), corriente absorbida (I_{ab}), par útil (M_u) y rendimiento (η).

Las curvas resultantes se indican en la figura 18.13.

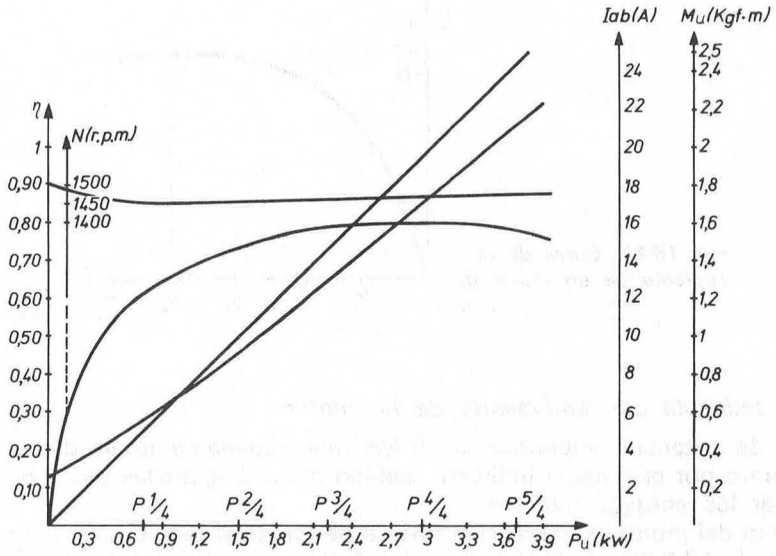


Fig. 18.13 Características de un motor derivación (4 CV 220 V. 1 500 r. p. m.).

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Explicar el funcionamiento de un freno de cinta, y de un freno hidráulico, de utilización en medida de pares de motores eléctricos.

— Explicar el ensayo en oposición utilizado en la determinación del rendimiento de un motor de c. c. (método de Kapp).

— Explicar el funcionamiento de los principales instrumentos utilizados para la medida de velocidad de una máquina de c. c.

CUESTIONARIO

18.1 ¿Qué es un dinamómetro de transmisión y para qué se utiliza en Electrotecnia?
18.2 ¿Qué es un freno dinamométrico?
18.3 ¿Cuáles son los principales tipos de frenos dinamométricos?
18.4 Explicar el funcionamiento de una dínamo-freno como generador.
18.5 Explicar el funcionamiento de una dínamo-freno como motor.
18.6 ¿Podrá utilizarse la dínamo-freno para la medición de la potencia útil de un motor de explosión? Razonar la respuesta.
18.7 En los ensayos al freno obtenidos en el laboratorio, ¿se mide el par útil o el par interno?
18.8 Explicar la forma de realizar el ensayo en vacío de un motor derivación.
18.9 ¿Qué problemas pueden surgir en el ensayo en vacío de un motor serie?, ¿y en motor compound?
18.10 ¿Cómo se varía la acción de frenado en el ensayo de un motor por medio de un freno Prony?
18.11 ¿Cómo se produce la acción de frenado en el ensayo de un motor por medio de un freno electromagnético? Dibujar el esquema correspondiente para el ensayo al freno de un motor serie.
18.12 ¿Qué inconvenientes presentará la variación de tensión en la red, al realizar el ensayo al freno de un motor de c. c.?
18.13 ¿Cómo habrían de distribuirse las pérdidas de un motor, para que el rendimiento fuese máximo para el 50 % de plena carga?
18.14 ¿Cómo se puede conocer el estado de saturación magnética de un motor de c. c.?
18.15 ¿Puede utilizarse el método de deceleración para determinar las pérdidas constantes de un motor de c. c.?

BIBLIOGRAFIA

UNE, *Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.* Madrid.
BANDINI A., *Ensayos de máquinas,* Rede, Barcelona 1967.
TIBERIO F., *Pruebas de Máquinas Eléctricas,* Vicens-Vives, Barcelona 1965.

Tema 19

Convertidores rotativos

OBJETIVOS

— *Clasificar los diversos tipos de convertidores rotativos.*
— *Describir el funcionamiento de los convertidores.*
— *Justificar la utilización de los convertidores.*
— *Analizar el funcionamiento de las conmutatrices.*
— *Enumerar las principales aplicaciones de la conmutatriz.*

GUION

— Introducción.
— Grupos convertidores.
— Motor c. a. Dinamo.
— Motor c. c. Alternador.
— Convertidor de frecuencia.
— El dinamotor.
— Conmutatrices.
— Principio de funcionamiento.
— Utilización de las conmutatrices.
— Tensiones en una conmutatriz.
— Corrientes en una conmutatriz.
— Arranque de conmutatrices.

PUNTOS CLAVE

— Conceptos sobre la aplicación de los grupos convertidores.
— Funcionamiento y utilización de las conmutatrices.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Repaso de los Temas: 4, máquinas de corriente continua rotativas; 5, motores de corriente continua; 6, máquinas de corriente alterna rotativas; 8, motores de corriente alterna del libro *Tecnología. Instalaciones y Líneas Eléctricas 2.1.*

EXPOSICION DEL TEMA

19.1 Introducción

Por regla general la producción de energía eléctrica se realiza en forma de corriente alterna por ser más económica su producción y, sobre todo, menores las pérdidas en su transporte.

La producción se realiza a una determinada frecuencia (en Europa 50 Hz y en USA 60 Hz), y a una tensión que se eleva para transportar la energía y hacer, de esta forma, menores las pérdidas, aunque sea grande la potencia. La expresión de ésta es:

$$P = V \cdot I$$

en consecuencia, P será tan grande como lo sea V (varios miles de voltios), ya que las pérdidas son producidas por efecto Joule, y éste depende de I (en general, de valor absoluto menor que V).

Así, sabiendo que se dispone de energía eléctrica alterna, se podrá distribuir y transportar hasta los puntos de utilización (ciudades, centros de transformación, fábricas, altos hornos, etc.); estos puntos de utilización no son todos iguales y, además, no en todos se necesitará corriente alterna, sino que en cada punto particular se realizará una conversión de esta energía a la que para cada máquina o uso se precise (alterna de otra frecuencia o continua).

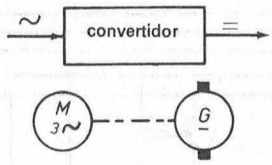


Fig. 19.1 Convertidor de c. c. en c. c.

19.1.1 *Definición*

Se llama *convertidor rotativo* a toda máquina o conjunto de máquinas rotativas que transforman una forma de energía eléctrica en otra también eléctrica.

19.1.2 *Clases de convertidores*

Las clases de convertidores serán tantas como posibilidades de modificación hay:

— Corriente alterna a corriente continua (fig. 19.1).
— Corriente continua a corriente alterna (fig. 19.2).
— Modificación de la frecuencia (fig. 19.3).

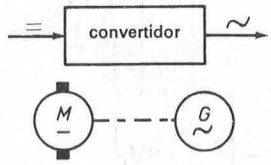


Fig. 19.2 Convertidor de c. c. en c. a.

19.1.3 *Ventajas e inconvenientes*

La ventaja de los convertidores rotativos, frente a los estáticos, estriba en que, con un dimensionado adecuado del convertidor, se pueden utilizar para potencias elevadas.

No obstante, con el progreso de los materiales de estado sólido (semiconductores), en la actualidad con estos materiales se pueden convertir potencias del mismo orden de magnitud.

Entre los inconvenientes más acentuados, se encuentran los siguientes:

— Bajo rendimiento total de la conversión.
— Falta de estabilidad de las tensiones y frecuencias por efectos mecánicos.

Recuérdese que el rendimiento total de una máquina es el producto de los rendimientos:

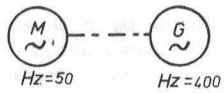


Fig. 19.3 Convertidor de frecuencia.

$$\eta_T = \eta_M \cdot \eta_G$$

siendo:

η_T = el rendimiento de la transformación (entre 0,5 y 0,8);
η_M = el rendimiento del motor (entre 0,7 y 0,9);
η_G = el rendimiento del generador (entre 0,7 y 0,9).

Aunque en estas clases de conversiones se suele utilizar motores muy estables en su número de revoluciones, cualquier variación de la carga afecta a las características de la energía producida por el convertidor y, en consecuencia, son necesarias complejas maniobras de regulación y control.

19.2 **Grupos convertidores**

Este apartado intentará dar una idea clara del funcionamiento de los *grupos convertidores* o *grupos motor-generador.*

En la descripción, el nombre de grupo motor-generador es más explícito que grupo convertidor, puesto que dicho grupo consta de un motor que va aplicado, mecánica o directamente, a un generador.

Como se vio en el apartado 19.1.2, según sea la energía de partida (c. a. o c. c.), así será el motor, de corriente alterna o continua.

De forma análoga, según se quiera la corriente de salida, el generador será un alternador o una dinamo.

19.2.1 *Funcionamiento*

El motor absorbe energía eléctrica para su funcionamiento, transformándola en energía mecánica de rotación, en su eje; tal energía es transmitida al generador por medio del acoplamiento entre motor y generador; este acoplamiento puede ser mecánico (correas, cadenas, engranajes, etc.) o directo (eje acoplado directamente o el mismo eje). La energía mecánica en el eje se transforma así en la eléctrica deseada.

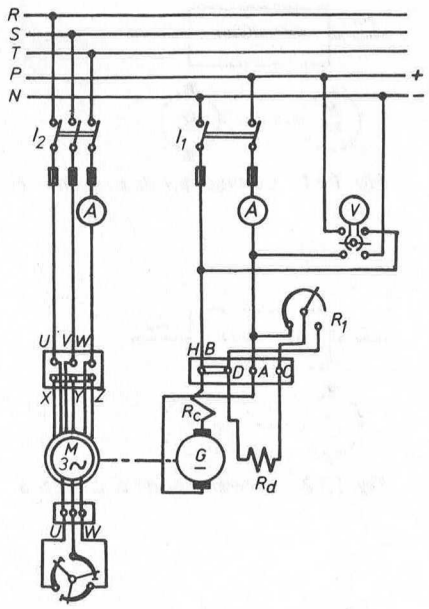


Fig. 19.5 Convertidor de c. a. en c. c. con motor asíncrono y arranque por resistencias rotóricas.

19.2.2 *Motor c. a.-dínamo (c. a./c. c.)*

Para esta clase de convertidores pueden emplearse tanto motores asíncronos como síncronos para arrastrar la dinamo.

No obstante, mientras el motor asíncrono se arranca por medio de alguno de sus métodos (estrella-triángulo, etc.), el motor síncrono necesita un motor de arranque o un transfomador para arranque como motor asíncrono.

Por lo general, cuando se usa un motor síncrono, se utiliza como motor de arranque la propia dinamo, excitándola adecuadamente, alimentándola con una batería de acumuladores, hasta que el motor alcanza su velocidad de sincronismo. En este momento, la dinamo deja de actuar como motor de c. c. y se convierte en generador (fig. 19.4).

19.2.2.1 *Funcionamiento y regulación*

En la figura 19.4 se puede ver que, al cerrar el interruptor I_1, si en las barras de continua existe tensión, G empezará a girar como un motor de continua y, variando el reóstato de campo R_1, se obtendrá mayor o menor par en el eje que une la dinamo G y el motor síncrono M. A su vez, M es alimentado a través de R_2, y en las bornas (U, V, W) se generará tensión alterna, cuya frecuencia dependerá del par producido por G.

La tensión será modificada según la excitación de M (modificando R_2).

Cuando la tensión de red y la frecuencia de ésta coincidan con las producidas por M, se podrá accionar I_2 y, en ese momento, M se convertirá en un motor síncrono y G en una dinamo. A partir de este instante, el grupo convertido funciona para la conversión de c. a./c. c.

Si se quisiera modificar la tensión de salida de la dinamo, bastaría con cambiar la posición de R_1, con lo que se conseguiría regular la corriente de excitación.

En la figura 19.5, se muestra el esquema de un convertidor c. a./c. c., con motor asíncrono y arranque por resistencias rotóricas. El funcionamiento de éste es inverso en su arranque, ya que primero lo hace M, regulando su velocidad mediante las resistencias, y posteriormente se conecta I_1.

Se regula la tensión de salida de la misma forma que en el caso anterior, variando R_1.

19.2.3 *Motor de c. c.-alternador (c. c./c. a.)*

Esta clase de convertidor rara vez se usa en aplicaciones industriales, ya que por lo general es reducida la potencia de que se puede disponer en una batería de acumuladores.

Un esquema básico de esta clase de convertidores es el de la figura 19.6. En el mismo se aprecia que tanto puede convertir c. a. en c. c. como viceversa.

Cuando se conecta para obtener c. a. a partir de c. c., se llama *inversor* (fig. 19.7).

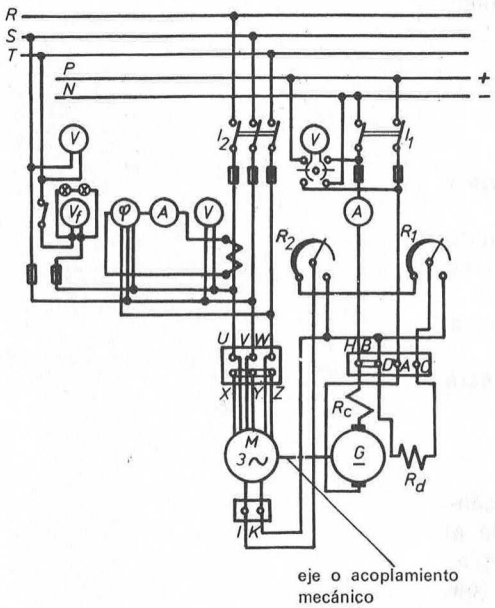


Fig. 19.4 Esquema de un convertidor de c. a. en c. c., con motor síncrono.

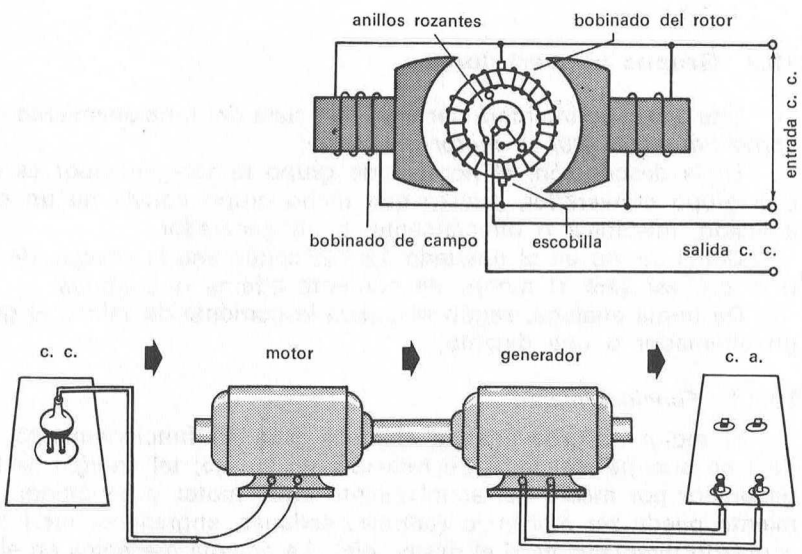


Fig. 19.6 Esquema básico de un convertidor de c. c. en c. a.

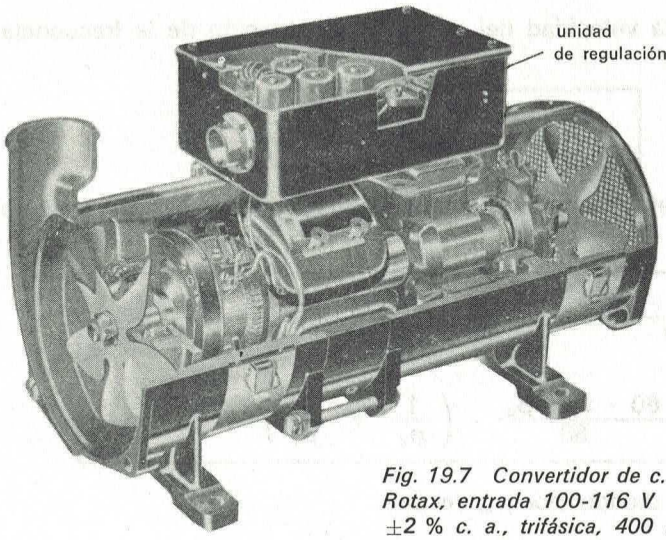


Fig. 19.7 Convertidor de c. c. en c. a. Inversor Rotax, entrada 100-116 V c. c., salida 115 V ±2 % c. a., trifásica, 400 Hz.

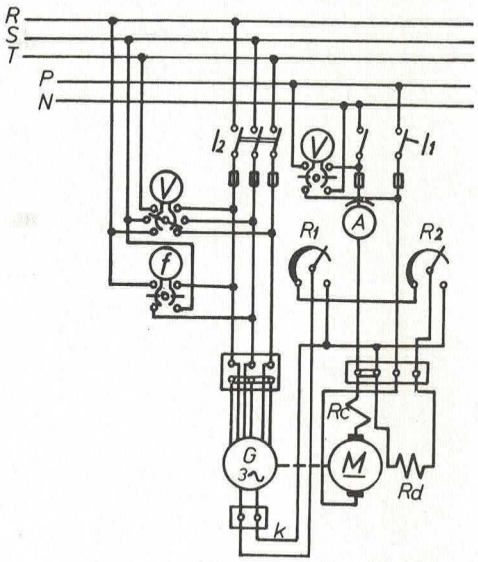


Fig. 19.8 Convertidor de c. c. en c. a.

En la figura 19.8, se puede apreciar un esquema similar al de la figura 19.4, ya que un motor síncrono en el arranque se puede considerar como un alternador.

El arranque viene producido por el motor *M* de c. c., que arrastra al alternador; cuando éste consigue la tensión de frecuencia adecuada, se conecta a I_2; a partir de dicho momento, se dispone de corriente trifásica en las barras de alterna.

19.2.4 *Convertidor de frecuencias*

Los grupos convertidores se suelen utilizar también para la conversión de una corriente trifásica en monofásica o trifásica de otra frecuencia.

Es usual encontrar convertidores rotativos para transformar c. a. de 50 Hz a 60 Hz, 100 Hz, a 400 Hz (fig. 19.9).

Para esta clase de convertidores se suelen utilizar motores asíncronos sincronizados, ya que ni los síncronos ni los asíncronos son óptimos para su uso; los primeros, por no poder arrancar con carga y, además, por perder su velocidad de sincronismo si se le conecta aquélla de una forma brusca; los segundos, porque no mantienen de una forma uniforme la velocidad de giro, siendo ésta dependiente del deslizamiento.

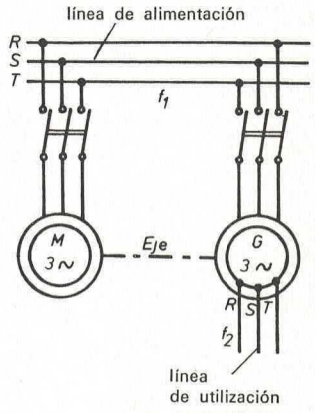
Según sea la frecuencia de entrada y de salida, así será la transmisión mecánica que une ambas máquinas, puesto que esta unión puede ser al mismo eje (eje común) o con una reducción adecuada.

Recuérdese que la frecuencia generada será:

$$f_2 = \frac{p_2 \cdot (N_2 + N_1)}{60}$$

siendo:

f_2 = la frecuencia de c. a. deseada;
p_2 = el número de pares de polos del generador;
$(N_2 + N_1)$ = el número de revoluciones por minuto con que el campo inductor corta al inducido.



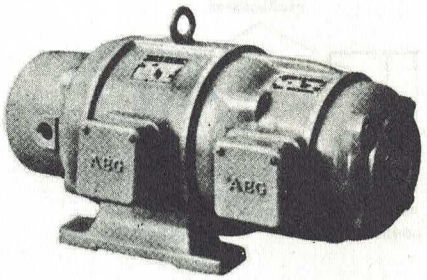


Fig. 19.9 Convertidor de frecuencia: A, esquema de conexión; B, convertidor de 100 a 400 Hz.

Además, las revoluciones de un motor asíncrono sincronizado cuando ha alcanzado la velocidad de sincronismo, es:

$$N_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p_1}$$

donde:

f_1 = la frecuencia que se quiere modificar;
p_1 = el número de pares de polos del motor;
N_1 = número de revoluciones.

De análoga forma, la velocidad del generador en función de la frecuencia de red será:

$$N_2 = \frac{60 \cdot f_1}{p_2}$$

Suponiendo que el eje es común a ambas máquinas, y que el deslizamiento es nulo, se obtiene:

$$f_2 = \frac{p_2 \cdot (N_2 + N_1)}{60} = \frac{p_2}{60} \cdot \left(\frac{60 \cdot f_1}{p_2} + \frac{60 \cdot f_1}{p_1} \right)$$

$$= \frac{60 \cdot f_1 \cdot p_2}{60} \cdot \left(\frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_1} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por p_2, resulta:

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 + \frac{p_2}{p_1} \right)$$

La potencia entregada por este grupo convertidor es aportada por el motor y el generador en proporción inversa al número de pares de polos de cada uno:

$$\frac{P_M}{P_G} = \frac{p_2}{p_1}$$

siendo:

P_M = la potencia motor;
P_G = la del generador.

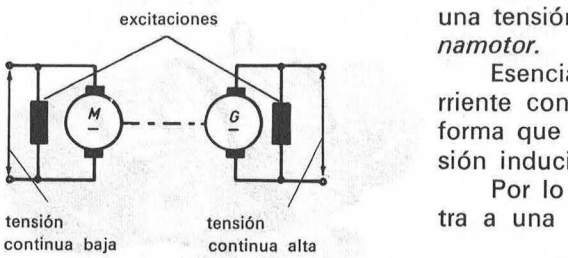
Si se utiliza un motor asíncrono, es necesario que tenga colector de velocidad regulable, con el fin de que se puedan compensar las oscilaciones de la red que se quiere modificar.

19.2.5 *El dinamotor*

También se emplean grupos convertidores para la elevación de c. c. de una tensión a otra mayor; a esta máquina se le conoce con el nombre de *dinamotor.*

Esencialmente, esta clase de convertidores suelen ser un motor de corriente continua y una dinamo que se montan sobre la misma armadura, de forma que el generador de c. c. disponga de más devanados para que la tensión inducida en ellos sea mayor (fig. 19.10).

Por lo general, el motor de c. c. suele ser un motor derivación que arrastra a una dínamo shunt acoplada sobre el primero (fig. 19.11).



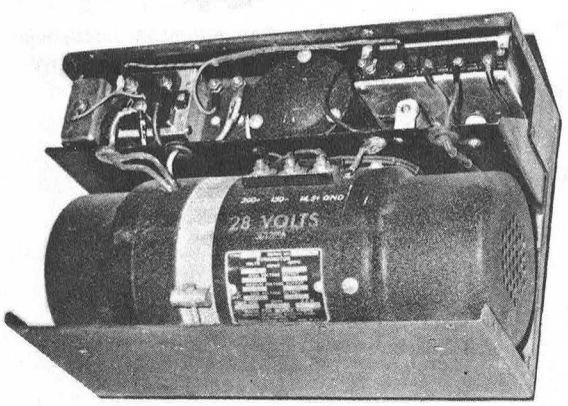


Fig. 19.11 Dinamotor (convertidor rotativo de c. c. a c. c.).

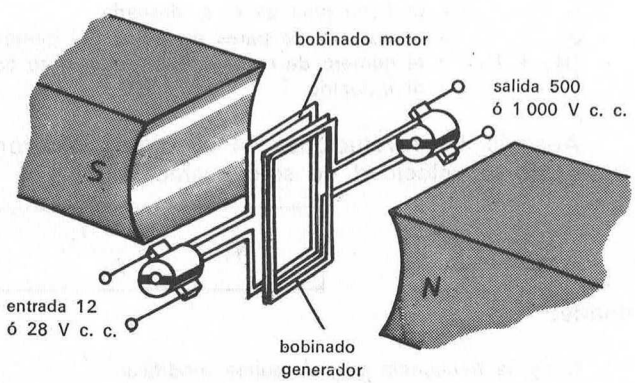


Fig. 19.10 Principio básico del funcionamiento de un dinamotor.

19.3 Conmutatrices

En los apartados anteriores se han estudiado diferentes clases de convertidores rotativos; pero sin duda alguna el más adecuado y utilizado es la conmutatriz; aunque en la actualidad está siendo desbancada por los rectificadores de estado sólido, esta máquina rotativa se ha venido utilizando para la conversión de una clase de corriente (c. a. o c. c.) en la contraria (c. c. o c. a.).

El aspecto externo de tener su inducido no difiere mucho de una dinamo; además de tener su inducido conectado a las delgas y éstas a los polos de c. c., disponen también de unos anillos rozantes por los que entra o sale la corriente alterna, según su utilización (fig. 19.12).

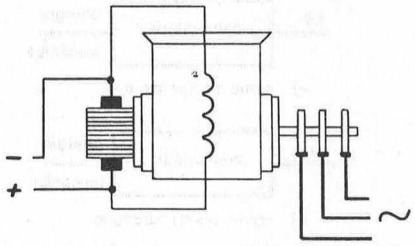


Fig. 19.12 Conmutatriz trifásica.

El inducido de estas máquinas constituye el rotor, parte móvil de las mismas que, como se podrá ver mirando desde las delgas de continua, será un devanado abierto; por el contrario, visto desde los anillos rozantes, constituye un devanado cerrado.

19.3.1 *Principio de funcionamiento*

El funcionamiento de una conmutatriz se basa en que, en el bobinado de una máquina de c. c., se inducen corrientes alternas.

Haciendo tomas adecuadas y conectándolas a unos anillos rozantes, se podrán obtener fuerzas electromotrices alternas.

A fin de justificar esta aseveración, piénsese en un devanado en anillo situado en el interior de un campo magnético (fig. 19.13). Si se toman dos puntos cualesquiera, *R* y *S*, éstos se encontrarán a una diferencia de potencial igual a la suma algebraica de las tensiones inducidas en cada espira.

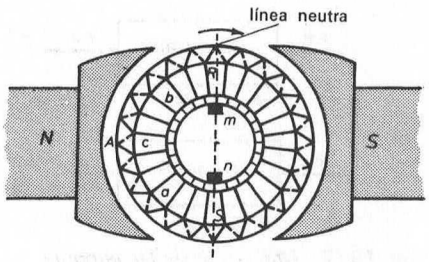


Fig. 19.13 Esquema de una conmutatriz bifásica-bipolar.

Si el movimiento de dicho devanado es circular, de una pulsación ω, la tensión o fuerza electromotriz inducida en cada espira, será senoidal y de expresión:

$$e = E_0 \cdot \text{sen } (\omega t + \Phi)$$

Por tanto, entre *R* y *S* aparecerá también una fuerza electromotriz senoidal. El máximo de ésta será cuando el punto medio del devanado entre *R* y *S*, *A*, pase por el centro del polo *N* (posición de la figura), siendo nula la tensión cuando *A* pasa por la línea neutra, y máximo en sentido contrario cuando se enfrenta al centro de *S*.

Como puede verse, para una máquina bipolar, cada revolución completa es un ciclo de la señal alterna.

Si se desea disponer de un sistema trifásico de fuerzas electromotrices, bastará que se divida el devanado en tres partes iguales, por ejemplo los puntos *R*, *S*, *T* (fig. 19.14), correspondiendo cada parte a 120° de devanado. Los máximos de tensión se producirán cuando el punto medio de cada una de estas partes *RS*, *ST*, *TS*, coincida con los ejes de los polos; y se tendrán nulos cuando estos puntos medios pasen por la línea neutra.

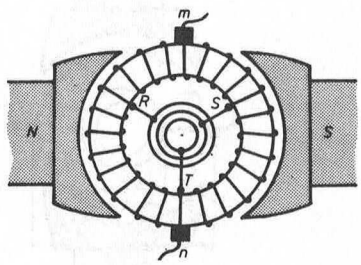


Fig. 19.14 Conmutatriz trifásica-bipolar, esquema básico.

19.3.2 *Utilización de las conmutatrices*

Las conmutatrices son los convertidores más adaptables, puesto que pueden usarse para múltiples aplicaciones, reunidas generalmente en tres grupos:

— Generadores.
— Motores.
— Convertidores.

Y cada una de estas formas de aplicación se puede, a su vez, subdividir según alimentación o accionamiento.

19.3.2.1 *Conmutatrices como generadores*

Cuando la conmutatriz es arrastrada por un motor auxiliar, puede proporcionar corriente continua en el colector de delgas, en consecuencia, es como si actuase de dínamo (fig. 19.15A).

Análogamente, podrá obtenerse corriente alterna, en los anillos rozantes, cuando sea accionada por un motor cualquiera; en este caso, funcionará como alternador (fig. 19.15B).

Estas dos clases de corrientes se pueden obtener simultáneamente, cuando sea accionada por un motor auxiliar; recibe entonces el nombre de generador poliformo (fig. 19.15C).

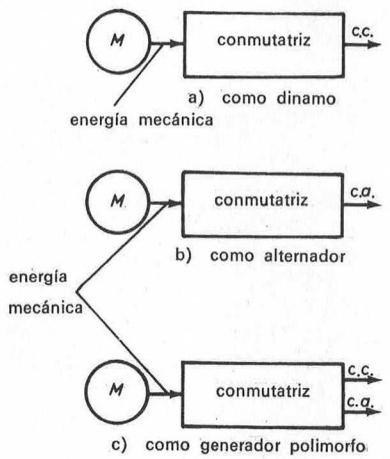


Fig. 19.15 Utilización de las conmutatrices como generadores.

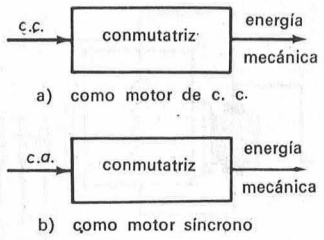


Fig. 19.16 Utilización de las conmutatrices como motores.

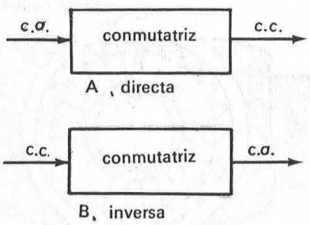


Fig. 19.17 Utilización de las conmutatrices como convertidores.

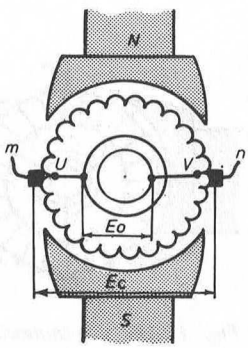


Fig. 19.18 Relación de tensiones en una conmutatriz monofásica-bipolar.

19.3.2.2 *Conmutatrices como motores*

Si se invierte el proceso, se podrá ver que, al aplicar corrientes adecuadas a las delgas o a los anillos, el eje de la conmutatriz comenzará a girar.

Cuando se aplica corriente continua a las delgas, actúa como motor de corriente continua (fig. 19.16A), transformando esta energía en mecánica.

Cuando, por el contrario, se aplica c. a. a los anillos rozantes, la conmutatriz actúa como un motor síncrono, convirtiendo la energía eléctrica aplicada en mecánica (fig. 19.16B).

19.3.2.3 *Conmutatrices como convertidores*

La forma fundamental de utilización de una conmutatriz es en *conexión directa,* es decir, actuando como convertidor de corriente alterna en continua.

Si se aplica corriente alterna a los anillos rozantes, por acción de ésta la conmutatriz girará, obteniéndose corriente continua en el colector de delgas (fig. 19.17A).

En la práctica, es ésta la forma de utilización más usual, casi la única.

Por último, si se aplica corriente continua al colector de delgas, la conmutatriz empezará a girar y en los anillos rozantes se podrá obtener corriente alterna; a esta forma de utilización se le denomina *conmutatriz inversa* (figura 19.17B).

19.4 Tensiones de una conmutatriz

Como se ha dicho, la utilización más común de una conmutatriz es la conversión de corriente alterna en continua; por tanto, es importante conocer cuál es la relación que liga las tensiones de ambas.

Se observará que esta relación de tensiones depende del número de fases que se tomen en el inducido.

— Monofásicas (2 tomas).
— Trifásicas (3 tomas)
— Tetrafásicas (4 tomas).
— Hexafásicas (6 tomas).

A continuación, se expondrá el estudio de las tensiones de una conmutatriz monofásica y se generalizará para una polifásica.

19.4.1 *Relación de tensiones en una conmutatriz monofásica*

Considérese una conmutatriz bipolar monofásica (fig. 19.18).

Al alimentar la conmutatriz con una tensión alterna, de valor máximo E_o, se obtendrá una tensión E_c en las delgas.

Si se efectúa el razonamiento de forma inversa, se verá que cuando las escobillas del colector de delgas *A* y *B* coincidan con los puntos de toma de corriente alterna, ambos valores serán iguales, ya que la máxima tensión alterna se consigue cuando la espira media pasa por la línea media de los polos (posición de la figura).

En consecuencia:

$$E_c = E_o$$

como las tensiones alternas se suelen expresar por su valor eficaz, y éste está relacionado con el máximo, según la expresión

$$E = \frac{E_c}{\sqrt{2}}$$

por consiguiente, sustituyendo,

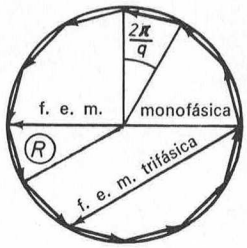
$$\boxed{E_c = \sqrt{2} \cdot E = 1{,}41\ E}$$

Ejemplo de aplicación

¿Cuál será el valor de la tensión alterna monofásica con que se alimentará una conmutatriz, para obtener una tensión de 100 V?

$$E_c = 100 \text{ V}$$

$$E = \frac{E_c}{1{,}41} = \frac{100}{1{,}41} = 70{,}7 \text{ V}$$



19.4.2 *Relación de tensiones en una conmutatriz polifásica*

En el apartado anterior se ha visto que el valor máximo de la tensión alterna coincide con el valor de la tensión continua.

Además, es sabido que la suma vectorial de las tensiones inducidas sobre medio devanado tienen que ser igual a la tensión continua; en consecuencia, se podrá aplicar un método matemático para conocer la relación que liga las tensiones alterna y continua.

En una conmutatriz con tomas de tensión (en la figura, tomamos 12), equidistantes cada dos consecutivas, habrá una diferencia de potencial que puede llamarse E_0 (fig. 19.19).

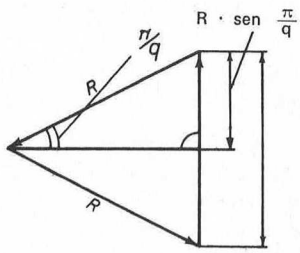


Fig. 19.19 Relación matemática entre las fuerzas electromotrices generadas en una conmutatriz polifásica.

Llamando E_c a la tensión continua, se tendrá:

$$E_c = 2 \cdot R$$

Por tanto, como E_0 vale

$$E_0 = 2 \cdot R \cdot \text{sen } \frac{\pi}{q} = E_c \cdot \text{sen } \frac{\pi}{q} \quad (\pi \text{ rad} \gtrapprox 180^\circ)$$

su valor en función de la tensión eficaz será:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \cdot \text{sen } \frac{\pi}{q}$$

Por ello, sea cual sea el número de fases de una conmutatriz, se verifica la expresión anterior.

Se define como *relación de transformación* el cociente entre la tensión eficaz y la tensión continua.

$$m_t = \frac{E}{E_c} = \frac{\text{sen } \frac{\pi}{q}}{\sqrt{2}}$$

En la tabla 19.20 se pueden apreciar algunos de los valores más usuales.

Tabla 19.20 Relación de las tensiones en una conmutatriz

Tipo	*q*	$\frac{\pi}{q}$ (°)	*sen* $\frac{\pi}{q}$	m_t
monofásica	*1*	*180*	*1*	*0,70710*
trifásica	*3*	*60*	*0,8660*	*0,61237*
tetrafásica	*4*	*45*	*0,7071*	*0,5000*
hexafásica	*6*	*30*	*0,5*	*0,35355*

19.5 Intensidad de una conmutatriz

El inducido de una conmutatriz es recorrido por una corriente eléctrica, cuya forma dependerá de la utilización que se le dé a la máquina.

Cuando funciona como motor de c. c. o dinamo, la corriente que recorre el devanado es en impulsos, debido a la conmutación de las delgas, ya que la corriente mantiene su valor durante el tiempo de contacto de una delga con la escobilla (fig. 19.21A).

De forma análoga, cuando funciona como máquina de c. a., será ésta la forma de corriente que atraviese el devanado (fig. 19.21B), tanto si la misma funciona de alternador como si lo hace tipo motor síncrono.

Cuando la conmutatriz funciona como generador poliformo (apartado 19.3.2.1), se puede suponer que en la espira media (entre dos tomas), se dan simultáneamente los efectos de máquina de continua y de alterna. Por tanto, la corriente total que recorrerá la espira media será la suma de ambas corrientes, o sea, igual que si funcionara como alternador y como dínamo (fig. 19.21C).

En el resto de las espiras la corriente continua será igual pero la alterna estará desplazada un ángulo inicial y, por tanto, la curva resultante será como se muestra en la figura 19.21D.

Por último, en el funcionamiento de la conmutatriz, tanto directa como inversa, la corriente alterna es de sentido contrario, por ser absorbida de la línea y, en consecuencia, se restan ambas corrientes (fig. 19.21E).

Esta figura es válida para la espira media (punto A, fig. 19.13), siendo para el resto de las espiras dependientes del ángulo de fase inicial (fig. 19.21F).

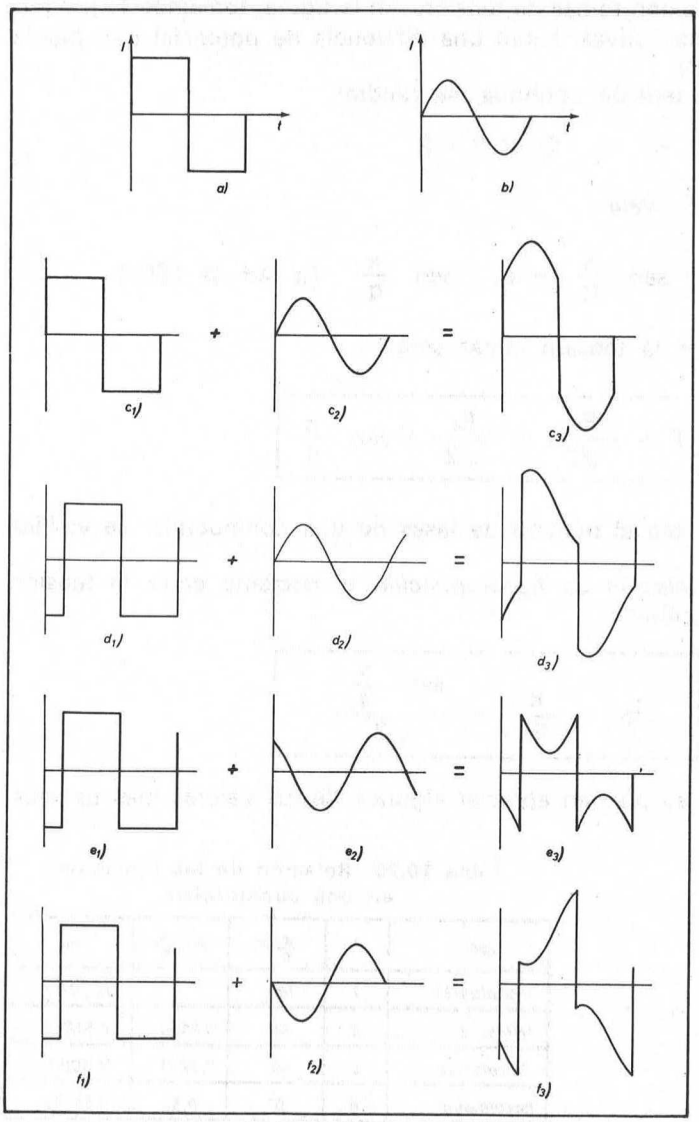


Fig. 19.21 Representación de las corrientes de una conmutatriz.

19.5.1 *Relación de las corrientes de una conmutatriz*

Una vez conocida la forma de las corrientes en una conmutatriz, para conocer la relación entre ambas, bastará igualar las potencias de entrada y salida.

La potencia eléctrica en continua será:

$$P_c = E_c \cdot I_c$$

afectada por el rendimiento η de la máquina, pues es ésta la que se desea utilizar.

$$\eta = \frac{P_c}{P} \qquad P = \frac{E_c \ I_c}{\eta}$$

P es la potencia entregada a la conmutatriz y la potencia suministrada en alterna por un sistema polifásico es

$$P = q \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi$$

donde:

q = al número de fase;
E = la tensión eficaz;
I = la corriente eficaz;
cos φ = el factor de potencia.

Igualando, se obtendrá:

$$\frac{E_c \cdot I_c}{\eta} = q \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Pero, teniendo en cuenta el valor deducido para *E* en el apartado 19.4.2, se tiene:

$$\frac{E_c \cdot I_c}{\eta} = q \cdot \frac{E_c}{\sqrt{2}} \cdot \text{sen} \ \frac{\pi}{q} \cdot I \cdot \cos E$$

donde, dividiendo por E_c y agrupando, resulta:

$$I = \frac{I_c \cdot \sqrt{2}}{q \cdot \text{sen} \ \frac{\pi}{q} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

Y teniendo presente que la corriente de línea en un sistema polifásico vale (fig. 19.22):

$$I_1 = 2 \cdot I \cdot \text{sen} \ \frac{\pi}{q}$$

Sustituyendo, se obtendrá:

$$I_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_c}{q \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = 2{,}8284 \cdot \frac{I_c}{q \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

Se define como relación de corrientes la expresión:

$$m_i = \frac{I_1}{I_c} = \frac{2{,}8284}{q} \cdot \frac{1}{\cos \varphi \cdot \eta} = K_i \cdot \frac{1}{\cos \varphi \cdot \eta}$$

En la tabla 19.23 se pueden ver los valores que toma esta relación para los diferentes sistemas polifásicos.

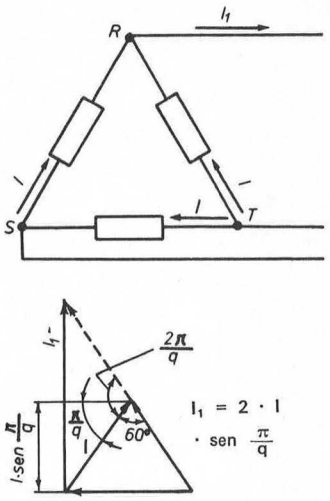


Fig. 19.22 Relación entre las corrientes de un sistema trifásico y su corriente de línea correspondiente.

Tabla 19.23 Relación de las corrientes en una conmutatriz

Tipo	q	$k_i = \frac{2\sqrt{2}}{q}$	m_i
monofásica	1	2,8284	$2{,}8284/\cos\varphi \cdot \eta$
trifásica	3	0,9428	$0{,}9428/\cos\varphi \cdot \eta$
tetrafásica	4	0,7071	$0{,}7071/\cos\varphi \cdot \eta$
hexafásica	6	0,4714	$0{,}4714/\cos\varphi \cdot \eta$

19.6 Arranque de una conmutatriz

En este apartado se verán los métodos de arranque de una conmutatriz, utilizándola como *convertidor directo.*

Las diferentes formas para el arranque de una conmutatriz se sintetizan en dos:

— Por medios propios.
— Por medios auxiliares.

Ambos son difíciles, debido a las regulaciones de velocidad hasta alcanzar el sincronismo y posteriormente la conmutación de tensiones.

19.6.1 *Arranque de una conmutatriz por medios propios*

La conmutatriz no dispone más que de dos sistemas propios para poder efectuar el arranque: los devanados de alterna por una parte y los de continua por otra.

19.6.1.1 *Arranque como motor shunt*

Si se puede disponer de tensión continua independiente en el momento de arranque, al suministrársela al devanado de continua, la conmutatriz arrancará como un motor shunt y, regulando su velocidad mediante un reóstato de arranque R, se podrá lograr la velocidad síncrona, pudiéndose desconectar I_1 y conectar los anillos rozantes a la red, con las mismas precauciones que en el acoplamiento de los alternadores (fig. 19.24).

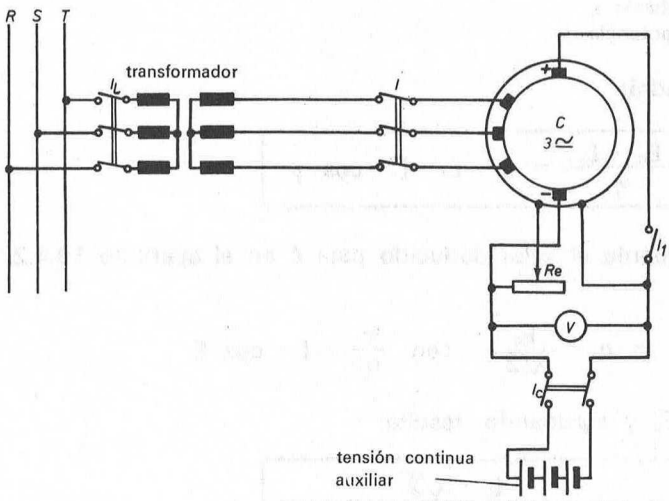


Fig. 19.24 Arranque de una conmutatriz como motor shunt.

19.6.1.2 *Arranque como motor asíncrono*

Cuando no se dispone de una tensión continua para el arranque y tan solo se dispone de alterna, se puede arrancar la conmutatriz como un motor asíncrono. En este caso, es preciso dejar la excitación en circuito abierto y, por tanto, al aplicarle tensión al estator se crea un campo giratorio, que induce en los polos de la máquina unas corrientes que originan el arranque del rotor. Regulando la tensión suministrada al motor, para el arranque por medio de autotransformadores y resistencias, se obtendrá una velocidad muy próxima a la síncrona, alcanzándose ésta, al cerrar el inductor (excitación).

El proceso de suministrar corriente a las barras de continua es muy delicado puesto que, si la velocidad no es la síncrona, la tensión suministrada en las delgas es alterna de una frecuencia muy baja. Por esta razón hay instrumentos para medir la tensión de excitación (fig. 19.25); cuando la tensión sea la adecuada, se podrá conectar a las barras.

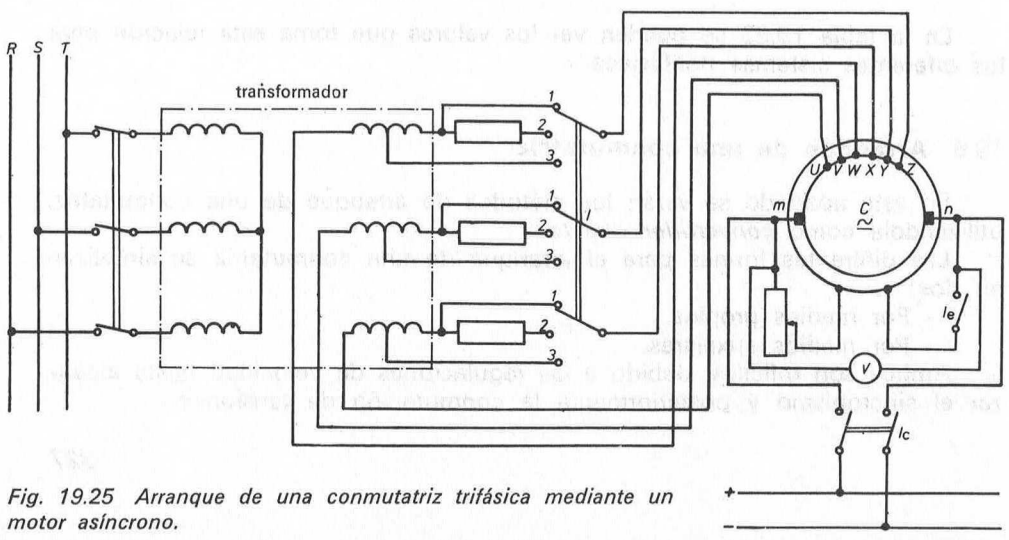


Fig. 19.25 Arranque de una conmutatriz trifásica mediante un motor asíncrono.

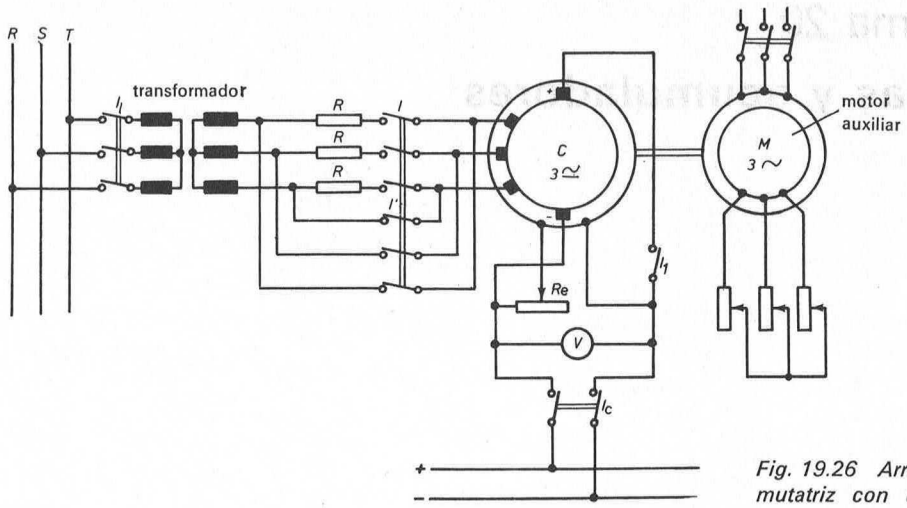


Fig. 19.26 Arranque de una conmutatriz con un motor auxiliar.

19.6.2 *Arranque de una conmutatriz por medios auxiliares*

Los medios auxiliares para el arranque de una conmutatriz son cualquier clase de motor: síncronos, asíncronos, asíncronos sincronizados y motores de c. c. que se encuentran solidarios con el eje de la conmutatriz.

El método de arranque con estos medios es común a todos ellos.

En primer lugar, se arranca el motor auxiliar, que arrastra a la conmutatriz; una vez que se ha alcanzado la velocidad síncrona, se conecta la línea de alterna a los anillos rozantes y, posteriormente, las delgas *m*, *n* a las barras (fig. 19.26).

Así, pues, tan solo es necesario regular los arranques de los motores por un medio auxiliar.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realícense, en el laboratorio de máquinas, las conversiones posibles con grupos convertidores y conmutatrices, desarrollando un trabajo monográfico sobre estos procesos.

— Búsquense catálogos de estos convertidores y estúdiense sus usos industriales más usuales.

CUESTIONARIO

19.1 ¿Cuál es la razón fundamental para el uso de los convertidores?

19.2 ¿Cuál será la corriente que circula por una línea de alta tensión, si la tensión de servicio es 15 000 V y la potencia de servicio son 30 kVA?

19.3 ¿Cuál será la potencia necesaria suministrable a un convertidor si el rendimiento de motor y generador es respectivamente 0,6 y 0,7, sabiendo que la potencia deseada es de 10 kW?

19.4 Del problema anterior, dedúzcase uno de los inconvenientes de los convertidores.

19.5 ¿Qué es un grupo convertidor?

19.6 ¿Cuál es la forma de energía que ataca al generador en los grupos motor-generador?

19.7 ¿Cómo se puede regular la tensión de salida de un grupo c. a./c. c.?

19.8 En el arranque de un grupo convertidor c. a./c. c. cuyo motor es síncrono, ¿cómo se produce el arranque?

19.9 ¿Cómo se llama el convertidor que pasa de c. a. a c. c.?

19.10 ¿Qué es un convertidor de frecuencia? ¿En qué se basa?

19.11 ¿Podría conseguirse la conversión de frecuencia si el motor y el generador disponen del mismo número de pares de polos?

19.12 Si se conocen las frecuencias de un convertidor de entrada y salida, 50 Hz y 125 Hz respectivamente, ¿cuál será el número de pares de polos del generador, si en el motor son 2?

19.13 Calcular la relación de pares de polos para un convertidor de frecuencia rotativo de 50 a 60 Hz, y para la conversión contraria.

19.14 ¿Qué es un dinamotor?

19.15 ¿Para qué se emplea una conmutatriz directa?

BIBLIOGRAFIA

KÖNIGSLÖW, *Escuela del técnico electricista,* tomo V, Editorial Labor, S. A., Madrid 1968.

HERING P., *Escuela del técnico electricista,* tomo X, Editorial Labor, S. A., Madrid 1968,

RAPP J., *Tratado práctico de Electrotecnia,* tomo II, Editorial Vagma, Bilbao 1973.

Máquinas de corriente alterna; Transformadores, convertidores, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1973.

Tema 20
Pilas y acumuladores

OBJETIVOS

— *Analizar las constantes de una pila eléctrica.*
— *Clasificar los tipos de pilas eléctricas más utilizados.*
— *Justificar la necesidad del acoplamiento de pilas eléctricas.*
— *Diferenciar los dos tipos de acumuladores: de plomo y alcalinos.*
— *Representar las características de carga y descarga de un acumulador.*

GUION

— Características generales de las pilas eléctricas.
— Tipos de pilas eléctricas.
— Acoplamiento de pilas.
— Acumuladores, generalidades.
— Acumuladores de plomo.
— Acumuladores alcalinos.
— Mantenimiento.

PUNTOS CLAVE

— Características generales de las pilas eléctricas (resistencia interna, f. e. m., etc.).
— Cálculos de las asociaciones de pilas eléctricas.
— Principio general de funcionamiento de los acumuladores de plomo y alcalinos; materias activas en ambos.
— Mantenimiento y averías.

EXPOSICION DEL TEMA

20.1 Características generales de las pilas eléctricas

Las pilas eléctricas son dispositivos que convierten la energía que se produce en una reacción química espontánea, en energía eléctrica.

Sumergiendo dos electrodos de distintos metales en un electrólito (solución acuosa de ácido sulfúrico, solución de sal amoníaco, etc.), aparece entre ellos una tensión eléctrica cuyo valor viene determinado por la naturaleza de los materiales utilizados como electrodos, así como por la composición y concentración del electrólito.

Los electrodos se escogen de la llamada *serie de Volta,* que es: 1, potasio; 2, sodio; 3, aluminio; 4, cinc; 5, plomo; 6, estaño; 7, antimonio, 8, bismuto; 9, hierro; 10, cobre; 11, plata; 12, oro; 13, platino; 14, carbono.

Cuanto más distantes se encuentren los cuerpos en la serie, tanto mayor será la tensión eléctrica producida, siempre que ambos estén a la misma temperatura.

En la figura 20.1 se indica la estructura más sencilla de una pila.

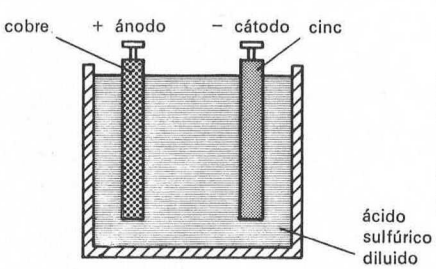


Fig. 20.1 Estructura de una pila.

Al introducir los electrodos en el electrólito, los metales se disuelven, cediendo parte de sus átomos al disolvente (electrólito) en forma de iones. El

cinc cede átomos al ácido sulfúrico dejando dos de sus electrones al electrodo, por lo que éste queda cargado negativamente (se le llamará *cátodo);* luego entre el electrodo y electrólito existirá una d. d. p. Con el cobre ocurre algo semejante pero en menor cantidad, debido a que el cobre se disuelve más despacio, por lo que, con respecto al cinc, el electrodo de cobre será más positivo. También entre el electrodo de cobre y el electrólito se establecerá, pues, una d. d. p.

Si se unen con un conductor exterior ambos electrodos, los electrones en exceso del cinc pasarán, por el conductor, a la barra de cobre y, a través de éste, a la disolución, de forma que neutralizarán los iones positivos, haciendo así que se disuelvan más átomos del cinc; por ello, de nuevo se tendrá exceso de electrones en el cinc, que podrán circular por el circuito exterior hasta el electrodo de cobre (positivo).

Esta corriente, al pasar por el agua del disolvente, la descompone en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno en forma de burbujas, se deposita sobre el ánodo, aislándolo del disolvente, causando progresivamente el cese de las reacciones químicas que producen la corriente eléctrica. Entonces se dice que la pila se ha *polarizado.*

La *despolarización* se realiza casi siempre por medios químicos, con el empleo de un agente oxidante, tal como el bióxido de manganeso o ácido crómico, que se disponen en contacto con el ánodo. De esta forma, el hidrógeno descompuesto se combina con el oxígeno de estos agentes para formar nuevamente agua (H_2O), que de nuevo se incorpora a la solución.

En general, los elementos que constituyen cualquier tipo de pila son los mismos; éstos son (fig. 20.2):

a) Electrodo positivo.
b) Electrodo negativo.
c) Electrólito.
d) Despolarizante.

El funcionamiento de estas pilas está caracterizado por las siguientes magnitudes:

a) Fuerza electromotriz.
b) Resistencia interna.
c) Corriente de régimen.
d) Capacidad.

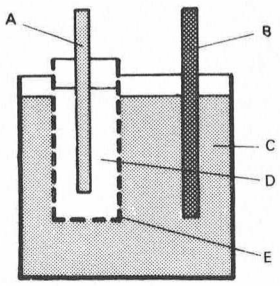


Fig. 20.2 Elementos de una pila: A, *electrodo positivo;* B, *electrodo negativo;* C, *electrólito;* D, *despolarizante;* E, *vaso permeable.*

20.1.1 *Fuerza electromotriz*

Conectando los dos electrodos a los bornes de un voltímetro de gran resistencia, la corriente consumida es casi nula y la d. d. p. indicada por el voltímetro es, por tanto, aproximadamente igual a la fuerza electromotriz de la pila.

20.1.2 *Resistencia interna*

Es la resistencia que opone el electrólito al paso de la corriente eléctrica.

Se puede conocer efectuando dos mediciones con dos resistencias externas diferentes. Llamando r a la resistencia interna y R a la externa, la f. e. m. se calculará de la siguiente forma:

$$E = R \cdot I + r \cdot I$$

siendo $R \cdot I$ la tensión en bornes de la pila y $r \cdot I$ la caída interna de tensión; por lo que:

$$V = R \cdot I$$

$$E = V - r \cdot I$$

Colocando una primera resistencia, se tendrá:

$$V_1 = E - r \cdot I_1$$

Y con la segunda:

$$V_2 = E - r \cdot I_2$$

De estas dos mediciones se deduce que:

$$r = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1}$$

20.1.3 *Corriente de régimen*

Se llama *corriente de régimen* la máxima corriente que puede dar la pila sin polarizarse. Depende de las dimensiones de la pila y de las sustancias que la constituyen.

Esta corriente valdrá:

$$I = \frac{E}{R + r}$$

20.1.4 *Capacidad*

La capacidad de una pila es la cantidad de electricidad en *amperios-hora* que puede suministrar.

20.2 Tipos de pilas eléctricas

A continuación, se va a exponer un breve resumen de la construcción y funcionamiento de las pilas más comúnmente utilizadas. Será una síntesis puesto que, de lo contrario, tendría que elaborarse un amplio tema que se saldría de los límites del objetivo de esta pregunta.

20.2.1 *Pila de Volta o galvánica*

Reciben este nombre en honor de Galvani y Volta (fig. 20.3).

Si se conectan los dos electrodos a través de sus disoluciones mediante un puente salino para la migración de iones, se forma una pila cuya f. e. m. es igual a la diferencia de potencial de sus bornes.

El funcionamiento es el descrito en la pregunta anterior.

El puente salino debe llenarse de un electrólito, como: cloruro potásico, nitrato amónico, etc.

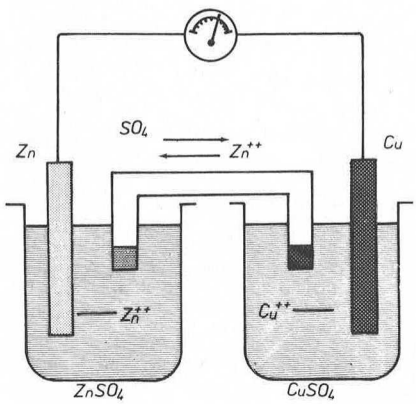


Fig. 20.3 Pila de Volta.

20.2.2 *Pila Leclanché*

De las diversas pilas voltaicas que pueden establecerse, muy pocas pueden utilizarse técnicamente, ya que deben ser de fácil construcción, baratas y no polarizarse en su funcionamiento al suministrar una cierta intensidad.

La pila Leclanché posee un electrodo central de carbón, rodeado de bióxido de manganeso, que actúa de despolarizante; está dispuesto en un recipiente poroso, recubierto por otro de cinc, que hace de electrodo. En su interior se coloca una disolución de cloruro amónico, al 20 %, que hace la misión de electrólito (fig. 20.4).

La diferencia de potencial que genera una pila de este tipo es de 1,4 a 1,7 V.

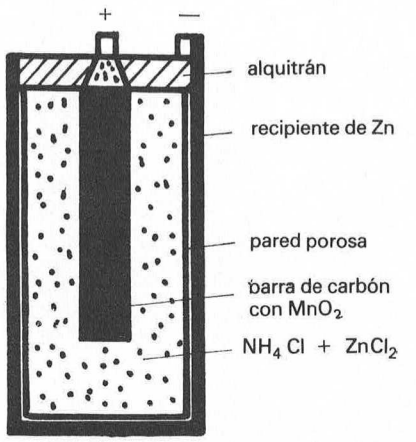


Fig. 20.4 Pila de Leclanché.

20.2.3 *Pilas secas*

Las llamadas pilas secas son pilas Leclanché en las que el electrólito está embebido en bentonita (material arcilloso absorbente) y el depósito es un recipiente de cinc; el polo de carbón se dispone en el centro, y el orificio de la pila se cierra con alquitrán. Estas pilas se aplican como generadores luminosos en linternas de todo tipo.

La f. e. m. de una pila seca varía entre 1,5 y 1,6 V, estando nueva, pero baja a 1,4 V con el tiempo, aun cuando la pila esté inactiva.

20.2.4 *Pila de Weston*

Cuando se requieren medidas exactas de tensión e intensidad, se necesita una f. e. m. exactamente conocida y que no puede variar durante la medida.

La f. e. m. de una pila depende de los materiales que la constituyen, de sus impurezas, de la concentración del electrólito, de la temperatura, de los efectos de polarización, etc. Parece difícil, por todo esto, conseguir estos materiales para una pila, de manera que permitan reproducirla en distintos momentos y en lugares diferentes con un grado suficiente de precisión. La *pila patrón*

de Weston cumple todas estas condiciones, por lo que se emplea universalmente como pila patrón.

Su constitución (fig. 20.5) es la siguiente: el cátodo es de mercurio; el ánodo, de amalgama de cadmio; el electrólito es una solución de sulfato de cadmio y sulfato mercurioso, a la que se añaden cristales de sulfato de cadmio en contacto con la solución, con lo que se consigue que esté siempre saturada a cualquier temperatura.

El vaso que contiene la pila es un tubo de vidrio en forma de *H;* está cerrado herméticamente.

El cátodo de mercurio está situado en el fondo de uno de los brazos del tubo en *H* y, sobre él, la pasta de sulfato mercurioso. En el fondo del otro brazo está el ánodo de amalgama de cadmio. En ambos fondos se han fundido unos hilos de platino, que actúan como terminales. El conjunto se encierra en una caja metálica.

La f. e. m. de la pila patrón de Weston es de 1,083 V, a 20 °C de temperatura. En esta pila, la f. e. m. varía mínimamente con las variaciones de temperatura.

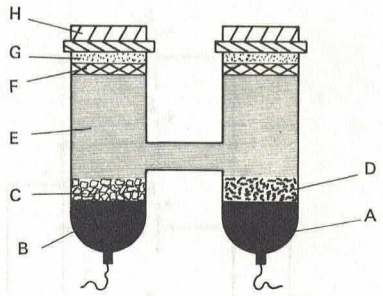


Fig. 20.5 Pila patrón de Weston. A, *amalgama de cadmio;* B, *mercurio;* C, *despolarizante de sulfato mercurioso;* D, *cristales de sulfato de cadmio;* E, *electrólito;* F, *parafina;* G, *corcho;* H, *tapón de lacre.*

20.3 Acoplamiento de pilas eléctricas

Las pilas se pueden conectar de tres formas diferentes:
— Acoplamiento en serie.
— Acoplamiento en paralelo.
— Acoplamiento mixto.

20.3.1 *Acoplamiento en serie*

Se emplea cuando es necesario disponer de tensiones superiores a las que puede proporcionar un solo elemento. El acoplamiento se hace uniendo el polo positivo del primer elemento con el polo negativo del segundo, el polo positivo del segundo con el negativo del tercero, y así sucesivamente (fig. 20.6), quedando libres el polo negativo del primero y el positivo del último (terminales de la batería).

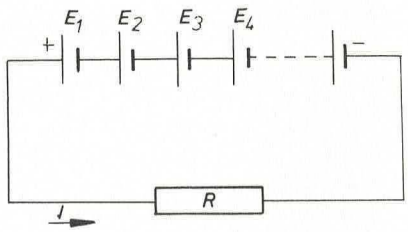


Fig. 20.6 Acoplamiento en serie.

20.3.1.1 *Propiedades*

Las propiedades del acoplamiento en serie son las siguientes:

— La f. e. m. de la batería es la suma de todas las fuerzas electromotrices de los elementos (pilas):

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots$$

— La resistencia interna de la batería es la suma de las resistencias internas de todos los elementos:

$$r_t = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots$$

— Se deben acoplar elementos que soporten la misma intensidad máxima siendo, por tanto, la corriente que suministrará la batería igual a la de un solo elemento:

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3 = \ldots$$

— Como todos los elementos suministrarán la misma corriente, la capacidad total de la batería es la de uno de sus elementos:

$$C_t = C_1 = C_2 = C_3 = \ldots$$

— La tensión en bornes de la batería se obtiene restando, a la f. e. m. total, la caída de tensión interna total:

$$V = E_t - r_t \cdot I$$

Ejemplo

Se dispone de una batería de 10 pilas en serie, de las siguientes características:f. e. m. = 1,5 V, y r = 0,2 Ω cada una. Alimentan un circuito exterior formado por una resistencia de 50 Ω. Hallar:

1.º Intensidad exterior.
2.º Tensión en bornes.
3.º Potencia útil consumida por la resistencia.

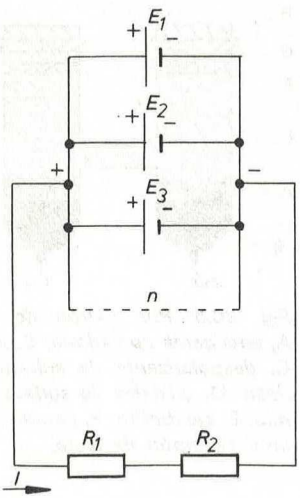


Fig. 20.7 Acoplamiento en derivación.

Solución:

1.º Observando la figura 20.6, puede calcularse el valor de la intensidad:

$$I = \frac{E_t}{R + r_t} = \frac{10 \times 1{,}5}{50 + (10 \times 0{,}2)} = \frac{15}{52} = 0{,}2884 \text{ A}$$

2.º El cálculo de la tensión en bornes es simplemente aplicación de la fórmula:

$$V = E_t - (r_t \cdot I) = 10 \times 1{,}5 - (2 \times 0{,}2884) = 14{,}42 \text{ V}$$

3.º La potencia útil en el receptor se obtiene por la fórmula:

$$P = V \cdot I = (14{,}42) \times (0{,}2884) = 4{,}159 \text{ W}$$

20.3.2 *Acoplamiento en paralelo*

Se emplea cuando es necesaria una corriente mayor de la que puede suministrar un solo elemento. El acoplamiento se hace uniendo todos los polos positivos en un mismo punto, e igualmente los negativos en otro punto. Estos dos puntos son los polos terminales de la batería (fig. 20.7).

El acoplamiento en paralelo se debe realizar con elementos que tengan la misma f. e. m. y también la misma resistencia interna.

20.3.2.1 *Propiedades*

Las propiedades del acoplamiento en paralelo son:

La f. e. m. de la batería es igual a la f. e. m. de cada elemento:

$$E_t = E_1 = E_2 = E_3 = \ldots$$

La resistencia interna de la batería es igual al cociente entre la resistencia de un elemento y el número de elementos.

Al ser varias resistencias en derivación, la resistencia total es la siguiente:

$$r_t = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \ldots} = \frac{1}{\frac{n}{r}} = \frac{r}{n}$$

siendo *n* el número de elementos.

— La corriente suministrada por la batería es la suma de las corrientes suministradas por todos sus elementos:

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots$$

— La capacidad total de la batería es la suma de las capacidades de todos sus elementos:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

— La tensión en bornes de la batería se obtiene restando, de la f. e. m. de cada elemento, la caída interna total:

$$V = E_t - r_t \cdot I_t = E_1 - r_t \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + \ldots)$$

$$= E_1 - \frac{r}{n} \cdot (n \cdot I_1) = E_1 - r \cdot I_1$$

Ejemplo

Un circuito formado por dos resistencias en serie de 25 Ω cada una, está alimentado por una batería de 10 elementos en paralelo, de f. e. m. igual a 1,5 V, y r = 0,2 Ω cada una (figura 20.7).

Averiguar: 1.º, la intensidad que circula por las resistencias; 2.º, tensión en bornas de cada resistencia; 3.º, rendimiento eléctrico de la batería.

Solución:

1.º La resistencia total del circuito será:

$$r_t = \frac{r}{n} = \frac{0{,}2}{10} = 0{,}02 \ \Omega$$

La resistencia total del circuito será:

$$R_t = R + r_t = (25 + 25) + (0{,}02) = 50{,}02\ \Omega$$

La intensidad del circuito principal será:

$$I = \frac{E_t}{R_t} = \frac{1{,}5}{50{,}02} = 0{,}02998\ A$$

2.º La tensión en bornas de la batería será:

$$V = E_t - r_t \cdot I_t = 1{,}5 - (0{,}02 \times 0{,}029) = 1{,}4994\ V$$

3.º El rendimiento eléctrico es el cociente entre:

$$\eta = \frac{V \cdot I}{E \cdot I} = \frac{V}{E} = \frac{1{,}49}{1{,}5} = 99\ \%$$

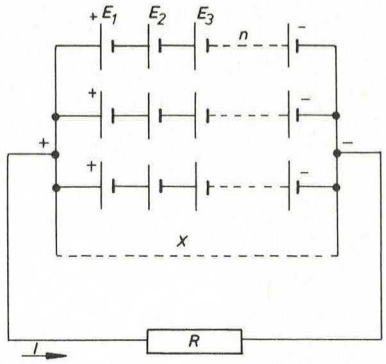


Fig. 20.8 Acoplamiento mixto.

20.3.3 *Acoplamiento mixto*

Se emplea este acoplamiento para situaciones medias entre la conexión serie y la derivación. Este procedimiento agrupa elementos en serie puestos, a su vez, en derivación entre sí.

La tensión resultante dependerá del número de elementos en serie; y la intensidad, del número de baterías de pilas en paralelo (fig. 20.8).

20.3.3.1 *Propiedades*

Las propiedades del acoplamiento mixto son:

— La f. e. m. de la batería es la de un grupo cualquiera de los elementos en serie:

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots = n \cdot E$$

siendo *n* el número de elementos en serie.

— La resistencia interna de la batería es el cociente entre la resistencia de un grupo y el número de grupos:

$$r_t = \frac{n \cdot r}{X}$$

siendo *X* el número de grupos.

— La corriente suministrada por la batería es el producto de la corriente de un elemento por el número de grupos:

$$I_t = X \cdot I_1 = X \cdot I_2 = X \cdot I_3 = \ldots$$

— La capacidad total de la batería es el producto de la capacidad de un elemento por el número de grupos:

$$C_t = X \cdot C_1 = X \cdot C_2 = X \cdot C_3 = \ldots$$

— La tensión en bornas de la batería se obtiene restando, de la f. e. m. total, la caída interna total:

$$V = E_t - r_t \cdot I_t$$

Ejemplo

Se dispone de un acoplamiento mixto formado por 3 grupos en paralelo, de 15 elementos en serie, de E = 1,5 V y r = 0,2 Ω cada elemento, para alimentar un receptor de 44 Ω de resistencia (fig. 20.8).

Hallar: 1.º, la corriente absorbida por el receptor; 2.º, la tensión que existe en bornas de la batería; 3.º, la potencia consumida por el receptor.

Solución:

1.º La f. e. m. total será:

$$E_t = n \cdot E = 15 \times 1{,}5 = 22{,}5\ V$$

La resistencia total de la batería será:

$$r_t = \frac{n \cdot r}{X} = \frac{15 \times 0{,}2}{3} = 1\ \Omega$$

La resistencia total del circuito será:

$$R_t = R + r_t = 44 + 1 = 45\ \Omega$$

La corriente que circula por el receptor será:

$$I = \frac{E_t}{R_t} = \frac{22{,}5}{45} = 0{,}5\ A$$

2.º La tensión en bornas de la batería será:

$$V = E_t - (r_t \cdot I) = 22{,}5 - (1 \times 0{,}5) = 22\ V$$

3.º La potencia consumida será:

$$P = V \cdot I = 22 \times 0{,}5 = 11\ W$$

20.4 **Acumuladores: generalidades**

El descubrimiento de los acumuladores se remonta al año 1859, cuando el científico francés Gastón Planté inventó el primer acumulador de plomo.

La diferencia básica entre el acumulador descubierto por Planté y las pilas de Volta o Leclanché era que, mientras en estas últimas se producían energía eléctrica a partir de una reacción química irreversible, en el acumulador la reacción química era reversible, lo cual hacía que se pudiese recargar.

Posteriormente al invento de Planté, Junger-Edison descubrieron, en los años 1889-1901, unos nuevos acumuladores con materiales alcalinos.

El acumulador se puede definir *como un transductor de energía química en energía eléctrica, que puede reponerse de nuevo a sus condiciones químicas iniciales, una vez descargado total o parcialmente.*

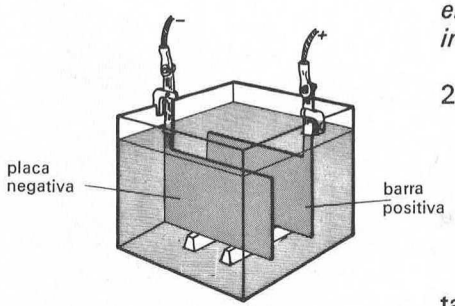


Fig. 20.9 Composición de un acumulador.

20.4.1 *Componentes constructivos*

Básicamente, un acumulador consta de cuatro elementos (fig. 20.9):

— Placa positiva.
— Placa negativa.
— Electrólito.
— Recipiente.

Por lo general, las placas positivas y negativas suelen construirse con metales como plomo, níquel, hierro, cadmio, etc.

El electrólito suele ser un producto químico líquido, que tiene características iónicas.

El recipiente está, por lo general, construido con materiales anticorrosivos: plástico, caucho endurecido, etc.

20.4.2 *Principio químico de funcionamiento*

En la figura 20.10A, se muestra esquemáticamente el proceso químico que se realiza en la descarga de un acumulador.

El electrólito es una solución fuertemente ionizable; esto es, una vez formado, se disgrega en dos sustancias o elementos con cargas eléctricas diferentes, positiva una y negativa otra.

El ion positivo del electrólito se dirige hacia el borne positivo, en el cual reaccionará adquiriendo carga negativa y neutralizándose.

Al ion negativo del electrólito le sucede algo parecido al acercarse al borne negativo; en éste, deja su carga (cede sus electrones en exceso), al reaccionar; en consecuencia, el electrólito irá perdiendo portadores de carga y, por tanto, el acumulador irá descargándose.

Si, por el contrario, el proceso es de carga, lo que se conectará entre bornes del acumulador será un generador, que proporcionará la carga eléctrica (figura 20.10B).

Supóngase que en el electrólito sólo existen cationes y aniones neutralizados; los aniones neutralizados se dirigirán al borne negativo de nuevo, y to-

marán un electrón procedente del generador; de igual forma, el catión neutralizado se dirigirá al borne positivo y cederá el electrón que posee en exceso.

Por tanto, se dispondrá, de nuevo, de electrólito disociado y con carga, que será utilizable posteriormente.

Estos procesos químicos proporcionan electricidad, siendo característica de cada material usado en la construcción de los electrodos, una tensión determinante entre los bornes del acumulador. A esta tensión se le llama *tensión característica de vaso o elemento.*

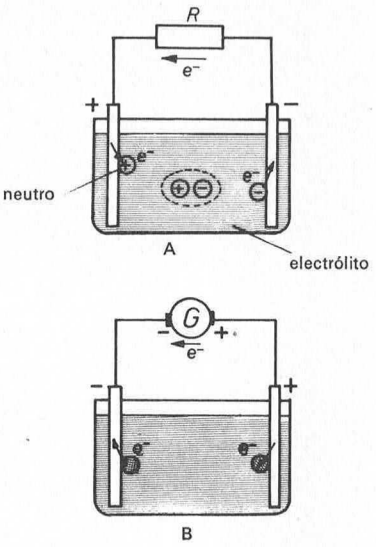


Fig. 20.10 Principio químico de funcionamiento de un acumulador; A, *descarga;* B, *carga.*

20.4.3 *Baterías: su tensión (asociación de vasos)*

La tensión de un elemento oscila alrededor de los 2 V, por lo cual, en las aplicaciones industriales, se suelen asociar varios elementos en serie (fig. 20.11); el dispositivo así formado se suele llamar comúnmente *batería.*

La tensión de una batería en vacío (recuérdese la resistencia interna en el acoplamiento de pilas y acumuladores) es función del número de elementos y de su tensión característica.

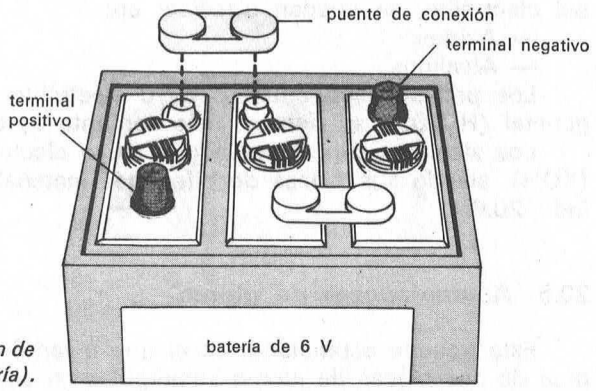


Fig. 20.11 Asociación de vasos (batería).

20.4.4 *Resistencia interna*

El electrólito necesita moverse por el interior del acumulador, por lo cual, si en la construcción del mismo se incluyen elementos de separación, la resistencia interna del acumulador aumenta.

Por lo general, éste es un dato característico que proporcionan los fabricantes y que depende, en gran medida, de la geometría del acumulador y de las cualidades del electrólito.

20.4.5 *Capacidad de una batería*

La capacidad de una batería *Q*, indica la cantidad de electricidad que esa batería contiene, o sea:

$$Q = I \cdot t$$

La capacidad se puede definir *como la cantidad de electricidad que una batería completamente cargada puede suministrar, hasta alcanzar una tensión mínima.* (Tensión de descarga recomendada por el fabricante.)

Este dato se suele expresar en *Ah* y depende de las dimensiones y número de placas por elemento (fig. 20.12), siendo influyente en el mismo el régimen de descarga al que se someta la batería.

En general, la capacidad de una batería se suele dar en un número de Ah, para un régimen continuo, durante un cierto número de horas (tabla 20.13).

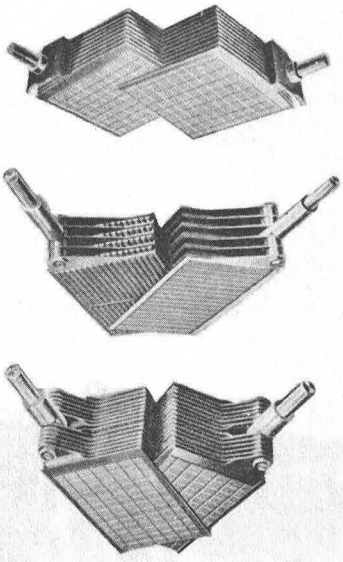


Fig. 20.12 La variación de la capacidad de un acumulador es debido a la superficie de las placas y al número de ellas por elemento.

Tabla 20.13 Características de las baterías (Tudor)

Tipos	*Capacidades, Ah. en:*				*Corriente de carga*	
	1 h	*3 h*	*5 h*	*10 h*	*Inicial*	*Final*
3/2 SPg 118	24	34	40	46	8	2
3/3 SPg 118	36	51	60	69	12	4
3/4 SPg 118	48	68	80	92	16	5
3/5 SPg 118	60	85	100	115	20	6
3/6 SPg 118	72	102	120	138	24	7
3/7 SPg 118	84	119	140	161	28	8
3/4 SPg 215	90	124	140	164	28	8

Por ejemplo: la batería 3/5 sPg 118 tiene una capacidad de 115 Ah si se efectúa una descarga continua durante 10 horas; si la descarga se hace en 1 hora, no mantiene esta capacidad, siendo, en este caso, de 60 Ah.

O sea, si durante 10 horas se somete la batería a una descarga de 11,5 A, la batería funcionará perfectamente. Pero si la descarga se hace a razón de 60 A, la batería sólo funcionará durante una hora.

20.4.6 *Rendimiento de un acumulador*

Se define como *rendimiento de un acumulador la relación entre la energía entregada en la descarga y la necesaria para cargarlo.*

$$\eta = \frac{Q_{des.}}{Q_{car.}} \times 100 \quad \text{(en \%)}$$

20.4.7 *Clases de acumuladores*

Existen dos clases de acumuladores, diferenciándose en las características del electrólito; se pueden clasificar en:

— Acidos.
— Alcalinos.

Los primeros son aquéllos cuyo electrólito es un ácido, sulfúrico por lo general (H_2SO_4); su nombre más corriente es el de *acumuladores de plomo.*

Los alcalinos son acumuladores cuyo electrólito suele ser potasa cáustica (KOH), siendo sus placas de diferentes materiales, como se verá en el apartado 20.6.

20.5 **Acumuladores de plomo**

Este tipo de acumulador es el que inventó el físico francés Planté; constaba de dos placas de plomo sumergidas en ácido sulfúrico diluido.

Debido a los defectos del primer acumulador, se hicieron mayores investigaciones durante los años posteriores, hasta llegar a mejorarlo en el año 1881, con el llamado *acumulador Faure,* que suele ser prácticamente el que se construye en la actualidad (fig. 20.14).

20.5.1 *Principio de funcionamiento*

20.5.1.1 *Descarga*

En la figura 20.15A se muestra, en forma esquemática, el proceso de descarga de un acumulador de plomo. En el mismo, se podrá ver que el sulfúrico se disocia en 2 H^+ y un anión $SO_4^=$, que se dirigen hacia los bornes positivo y negativo respectivamente.

Las reacciones que se producen en cada electrodo son:

Cátodo (electrodo-positivo):

$$PbO_2 + 2\,H^+ + H_2SO_4 + 2\,e^- \longrightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O$$

Anodo (electrodo-negativo):

$$Pb + SO_4^= \longrightarrow PbSO_4 + 2\,e^-$$

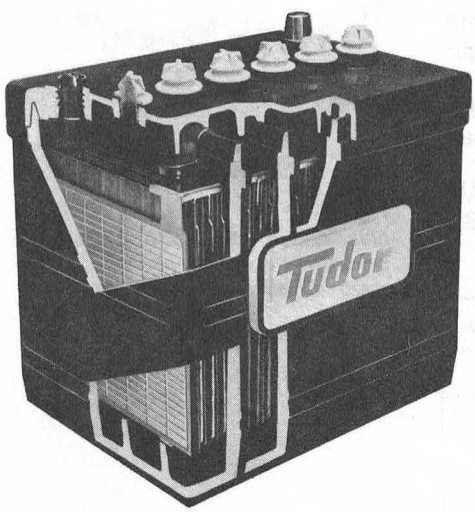


Fig. 20.14 Acumulador de plomo o Faure.

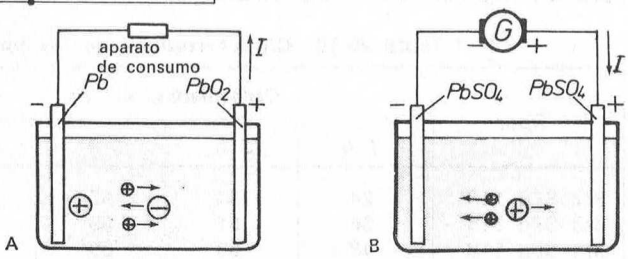


Fig. 20.15 Principio de funcionamiento de los acumuladores de plomo: A, *descarga;* B, *carga.*

Puede verse en estas reacciones que, mientras en el cátodo el electrólito absorbe dos electrones, en el ánodo los cede, estableciéndose la corriente a través del circuito externo.

20.5.1.2 *Carga*

En las reacciones anteriores se observará que en ambas placas se produce H_2SO_4 (sulfato de plomo), que se deposita en los electrodos o cae al fondo en forma de escamas o residuos.

Por ello, es necesario que esta sustancia vuelva a convertirse en peróxido de plomo (PbO_2) en un electrodo, y plomo (Pb) en el otro, como eran inicialmente.

Si se conecta un circuito de carga (fig. 20.15B), el electrólito restante del recipiente actuará según las reacciones siguientes:

Cátodo:

$$PbSO_4 + SO_4^{=} + 2\ H_2O \longrightarrow PbO_2 + 2\ H_2SO_4 + 2\ e^-$$

Anodo:

$$PbSO_4 + 2\ H^+ + 2\ e^- \longrightarrow Pb + H_2SO_4$$

Con lo cual se consigue aumentar la cantidad de electrólito disociado y, además, reponer a su forma original los electrodos.

Puede comprobarse, en las reacciones anteriores, que en el cátodo se ceden dos electrones al circuito externo, absorbiéndose también dos en el ánodo.

Las reacciones se pueden refundir en la siguiente:

$$PbO_2 + 2\ H_2SO_4 + Pb \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftarrows}} PbSO_4 + 2\ H_2O + PbSO_4$$

20.5.2 *Componentes de un acumulador de plomo*

A partir del acumulador de Faure, se fueron introduciendo nuevas mejoras para obtener mayor rendimiento. En la actualidad, los acumuladores son de la forma mostrada en la figura 20.16.

Los elementos de que consta un acumulador de plomo son:

— Recipiente y tapas.
— Placas.
— Separadores.
— Electrólito.
— Tapones.
— Conexiones.

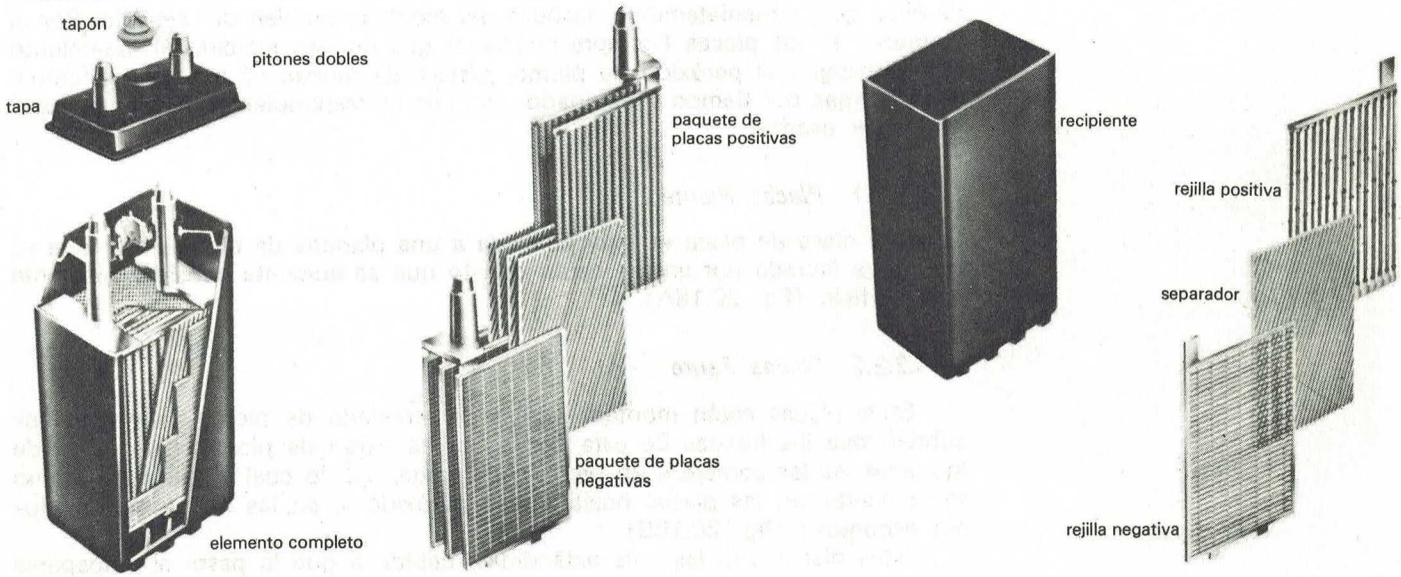


Fig. 20.16 Componentes de un acumulador de plomo (Tudor).

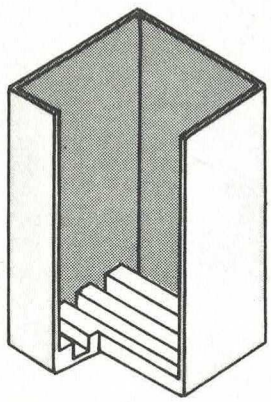


Fig. 20.17 Fondo almacenado de los recipientes.

20.5.2.1 *Recipiente y tapas*

El *recipiente* es la parte del acumulador destinada a alojar en su interior todos sus componentes.

La elección del recipiente dependerá de que el acumulador sea transportable o estacionario. El recipiente de un acumulador transportable deberá estar preparado para soportar golpes y vibraciones, además de estar construido con materiales aislantes y resistentes a la corrosión del ácido sulfúrico.

Para los acumuladores estacionarios, puede emplearse un recipiente de vidrio o plástico, que reúna las cualidades de resistencia al ácido y aislamiento eléctrico; además, suelen ser transparentes, para que se pueda ver en cualquier momento el nivel del electrólito y el estado general.

Los recipientes empleados en tracción se suelen hacer de baquelita, polipropileno y ebonita o caucho endurecido.

Característica común a todos los recipientes suele ser la forma almenada de su fondo (fig. 20.17). Esta forma de construcción es debida a que las placas deben asentarse en el fondo; pero, al propio tiempo, es necesario que el electrólito circule con facilidad. Además, en los procesos de carga y descarga, se suelen producir escamas, que se desprenden de las placas; y, si no existen estos fosos, podrían provocar el cortocircuito entre las placas.

La tapa es el elemento que cierra el recipiente; se sella en caliente con una pasta especial, una vez montado totalmente el acumulador.

En la parte superior de la tapa se encuentran los *pitones* o terminales, sobre los que se puede conectar la utilización.

20.5.2.2 *Placas*

Es evidente que las placas de plomo usadas por Planté producirían muy poco rendimiento, debido a que las reacciones entre el electrólito y las placas se tienen que realizar en las superficies de éstas, y en aquéllas su superficie era reducida.

Al ser las placas el elemento más importante del acumulador, todo el proceso de mejora de éstos está relacionado muy estrechamente con el aumento de la superficie de las placas.

Existen cuatro clases de placas:

— Placas Planté.
— Placas Faure o empastadas.
— Placas de rosetones o botón Planté.
— Placas tubulares o acorazadas.

Todas estas placas están construidas sobre plomo esponjoso o aleaciones de este material.

Por lo general, al fabricar las placas positivas, son tratadas químicamente, para conseguir que en su superficie se forme una capa de peróxido de plomo, de color marrón rojizo.

Las placas así tratadas se llaman *placas formadas,* siendo característico de ellas que, inmediatamente después del montaje, pueden dar servicio. Por el contrario, en las placas (siempre positivas) que no han recibido el tratamiento para conseguir el peróxido de plomo, *placas sin formar,* es necesario efectuar varias cargas por tiempo prolongado, con sus correspondientes descargas, para poder ser usadas.

20.5.2.2.1 *Placas Planté*

Esta clase de placa es muy parecida a una plancha de plomo, sólo que se encuentra labrada por ambas caras, con lo que se aumenta considerablemente la superficie (fig. 20.18A).

20.5.2.2.2 *Placas Faure*

Estas placas están montadas sobre un enrejado de plomo-antimonio, recubriéndose los huecos de éste con pasta de óxido de plomo. Con el fin de formarlas, se las somete a un proceso de carga, con lo cual el óxido de plomo se convierte, en las placas positivas, en peróxido y, en las negativas, en plomo esponjoso (fig. 20.18B).

Estas placas son las más extendidas, debido a que la pasta al empaparse con el electrólito, ofrece una superficie de contacto extremadamente alta.

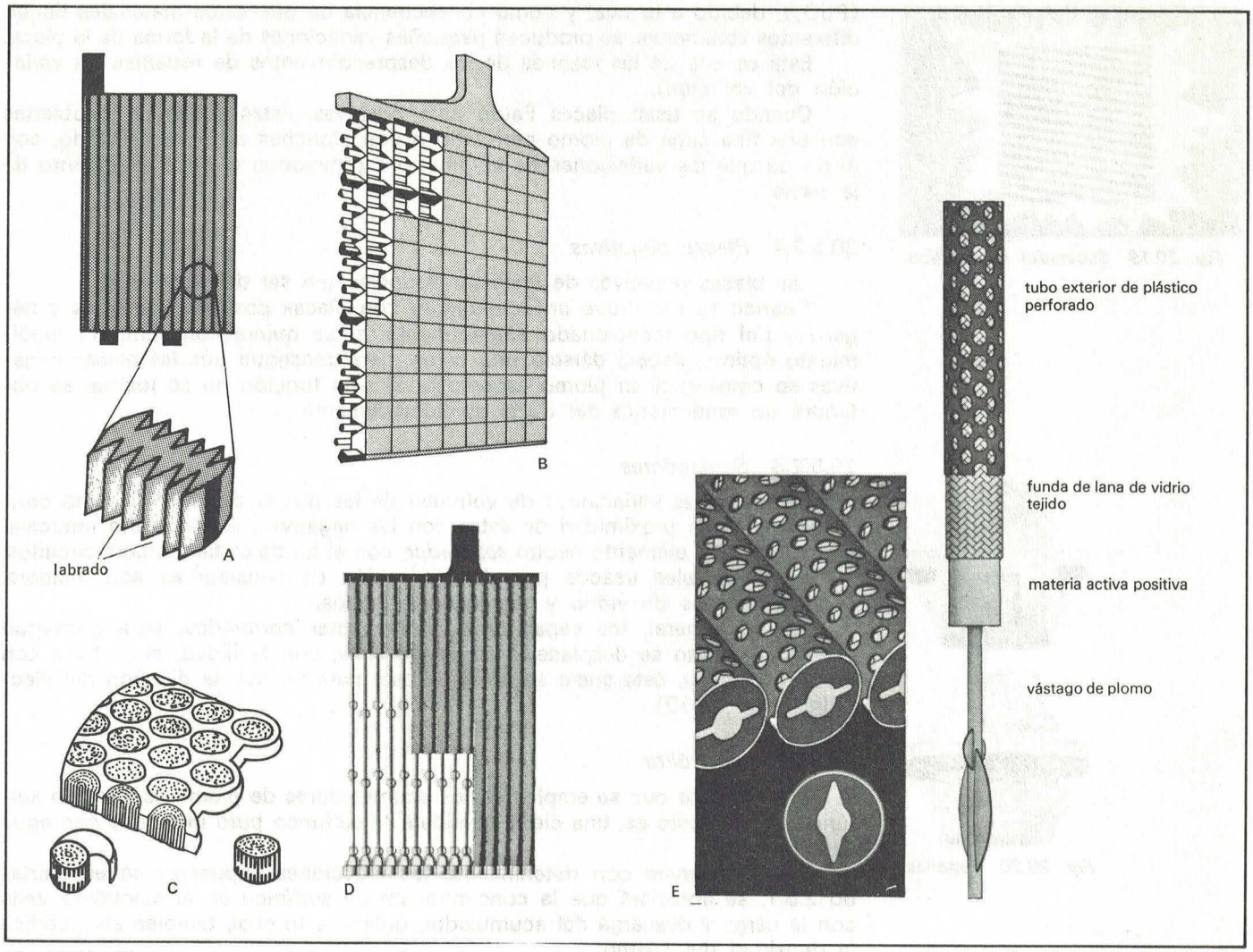


Fig. 20.18 Placas para acumuladores de plomo: A, *placa Planté;* B, *placa Faure;* C, *placa de rosetones;* D, *placas tubulares;* E, *tubos de placas.*

20.5.2.2.3 *Placas de rosetones*

Estas placas sólo se usan como positivas, dado que en su construcción se usan unas cintas onduladas de plomo el cual, al formar la placa, se transforma en peróxido de plomo, siendo la rejilla de plomo-antimonio (fig. 20.18C).

20.5.2.2.4 *Placas tubulares*

Están formadas por numerosos tubitos (fig. 20.18D), con lo que se consigue una gran superficie activa. Estos tubos están constituidos por dos capas, una interior de fibra de vidrio tejida, resistente al ácido, y otra exterior de plástico perforado (fig. 20.18E).

En el interior de cada tubo existe un vástago de plomo, al que se adhiere la materia activa (peróxido de plomo), estando unidos todos los vástagos por sus extremos, formando la placa.

20.5.2.3 *Placas positivas*

Como ya se ha dicho, las placas positivas formadas se caracterizan por su color; no así cuando están sin formar, que poseen el color característico del plomo (grisáceo).

Analizar en un acumulador cuáles son las placas positivas y cuáles las negativas es relativamente sencillo, ya que las primeras siempre son una menos que las negativas; la razón de esto estriba en el hecho de que las placas positivas deben trabajar por ambos lados, para evitar deformaciones importantes.

Al producirse las cargas y descargas de un acumulador, en la placa positiva se forman dos sustancias: sulfato de plomo ($PbSO_4$) y peróxido de plomo

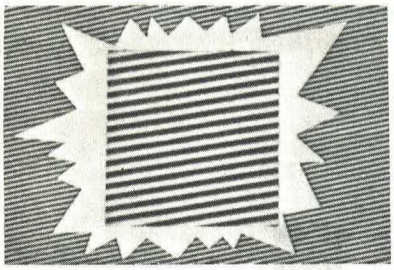


Fig. 20.19 Separador de plástico.

(PbO_2), debido a lo cual y como consecuencia de que estos materiales tienen diferentes volúmenes, se producen pequeñas variaciones de la forma de la placa.

Esta es una de las razones de los desprendimientos de escamas (la variación del volumen).

Cuando se usan placas Faure para positivas, éstas suelen ir recubiertas con una fina capa de plomo perforado o con planchas de fibra de vidrio, con el fin de que las variaciones de volumen no provoquen el desprendimiento de la pasta.

20.5.2.4 *Placas negativas*

Las placas negativas de un acumulador suelen ser del tipo Faure.

Cuando se construye un acumulador con placas positivas formadas y negativas del tipo mencionado anteriormente, si se quiere conseguir un rendimiento óptimo, deberá dársele una carga, para conseguir que las placas negativas se conviertan en plomo esponjoso. Si esta función no se realiza, se obtendrá un rendimiento del 80 % aproximadamente.

20.5.2.5 *Separadores*

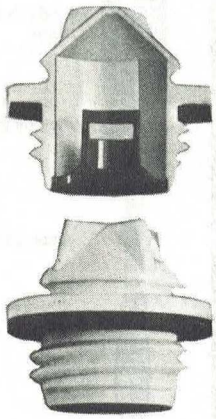


Fig. 20.20 Tapones.

Debido a las variaciones de volumen de las placas positivas y como consecuencia de la proximidad de éstas con las negativas, es necesario intercalar entre ambas un elemento neutro *separador,* con el fin de evitar los cortocircuitos.

Los materiales usados para la fabricación de separadores son: madera, ebonita, láminas de vidrio y materiales plásticos.

Por lo general, los separadores suelen estar perforados, para conseguir que el electrólito se desplace, a través de ellos, con facilidad; si se hace con material plástico, éste suele ser muy poroso, para facilitar la difusión del electrólito (fig. 10.19).

20.5.2.6 *Electrólito*

El electrólito que se emplea en los acumuladores de plomo es el ácido sulfúrico diluido, esto es, una cierta cantidad de sulfúrico puro mezclado con agua destilada.

Si se observan con detenimiento las reacciones expuestas en el apartado 2.5.1, se apreciará que la concentración de sulfúrico en el electrólito varía con la carga y descarga del acumulador, debido a lo cual, también se modifica la densidad del mismo.

La densidad del electrólito, necesario para la construcción de un acumulador, es función de la clase de éste (ver Apéndice 1), siendo el valor adecuado alrededor de 1,200 g/cm³.

Las densidades de plena carga y descarga varían según el empleo de la batería, no debiendo sobrepasar 1,300 g/cm³ para la carga, y 1,100 g/cm³ para la descarga.

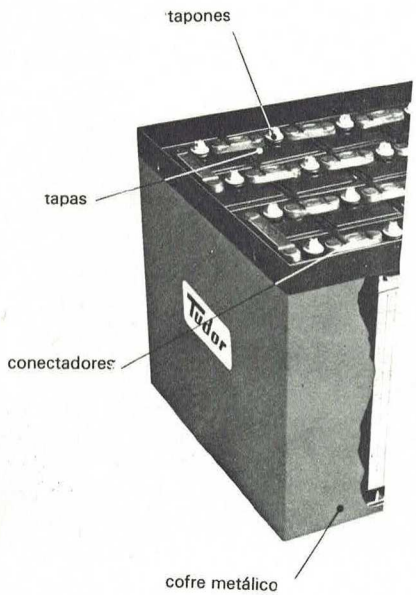


Fig. 20.21 Disposición de las conexiones y tapones en una batería de tracción Tudor.

20.5.2.7 *Tapones*

Los tapones hacen de cierre del recipiente, cerrando los orificios por los que se recarga de electrólito la batería, permitiendo, además, que se expulsen por ellos los gases que se forman en los procesos de carga y descarga, ya que la electrólisis del agua (agua destilada) produce la generación de H_2 y O_2, además de la evaporación de la misma por calentamiento, debido a la resistencia interna de la batería (fig. 20.20).

Los tapones se suelen fabricar con plástico que resista altas temperaturas evitando, así deformaciones. Suelen, además, disponer de un sistema de laberinto, que retiene las gotas del electrólito dejando pasar sólo los gases totalmente secos.

20.5.2.8 *Conexiones*

Normalmente es necesario disponer de varios acumuladores en serie (baterías), porque la tensión suministrada por uno solo es próxima a los 2 V; se precisa, entonces, la unión de varios elementos mediante conectadores (figura 20.21).

Los conectadores son de plomo y van soldados a los terminales; están calculados con una sección muy amplia para disminuir las pérdidas óhmicas; unen, además, todos los elementos formando un bloque único y resistente.

20.5.3 *Carga de un acumulador*

La operación de carga consiste en conectar la batería a una fuente de corriente continua, de tensión superior a la de la batería, teniendo especial cuidado en no sobrepasar la corriente máxima de carga en cada tipo de batería. El polo positivo de la fuente de alimentación se conecta al positivo de la batería y el negativo de la fuente de alimentación al negativo de la batería.

La carga de baterías dependerá del tipo de funcionamiento, clasificándose en dos tipos:

— Baterías que funcionan en ciclos de carga-descarga (ejemplo, baterías de carretillas eléctricas).

— Baterías conectadas permanentemente al equipo de carga y al circuito de utilización (ejemplo, baterías de automóviles).

Un gráfico típico de la carga de una batería en régimen de intensidad decreciente se puede ver en la figura 20.22.

La tensión de un acumulador de plomo recién cargado oscila entre 2,40 y 2,60 V; pero, después de una hora de reposo, la tensión se suele estabilizar sobre 2,2 V.

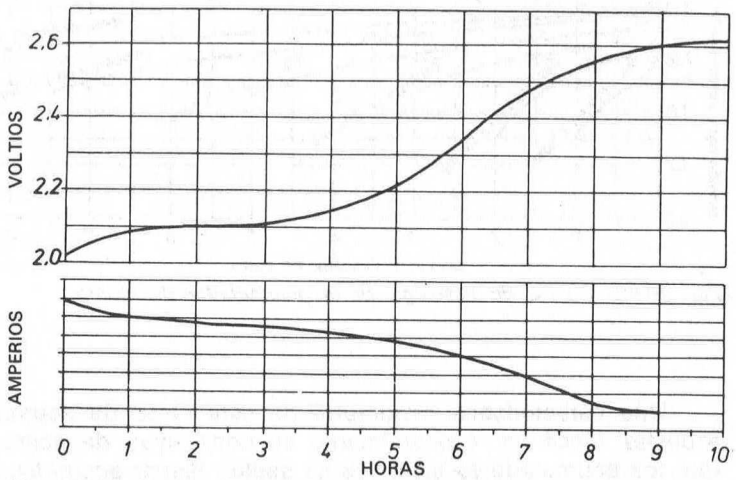


Fig. 20.22 Curvas de carga con intensidad decreciente.

20.5.4 *Descarga de un acumulador*

Cuando se utiliza un acumulador de plomo para alimentar un circuito exterior (descarga), su tensión desciende por debajo de la tensión de vacío.

Cuando el acumulador se está descargando, la tensión en bornes disminuye al principio lentamente y, al final, de un modo más rápido. La tensión en la descarga depende de la capacidad del acumulador y de la intensidad de descarga, siendo menor cuanto más fuerte sea la corriente.

En la figura 20.23 puede apreciarse la variación de tensión para diferentes regímenes de descarga.

El rendimiento de estos acumuladores alcanza el 98 %.

20.6 **Acumuladores alcalinos**

Aunque los acumuladores de plomo son muy utilizados por tener una tensión de elemento o vaso grande y un precio reducido, utilizar como electrólito un ácido produce cierto recelo en los usuarios, por el manejo del ácido mismo y por la sulfatación que las placas llevan.

Intentando reducir estos defectos de los acumuladores de plomo, en 1889 y 1901, los físicos Waldemar Junguer (sueco) y Tomás Alba Edison (norteamericano) idearon y desarrollaron los acumuladores alcalinos, cuyo electrólito es una sustancia alcalina.

A diferencia de los acumuladores de plomo, los acumuladores alcalinos pueden ser de tres clases, según las sustancias de que estén compuestas sus placas:

— Acumuladores de Ni-Cd.
— Acumuladores de Ag-Zn.
— Acumuladores de Ni-Fe.

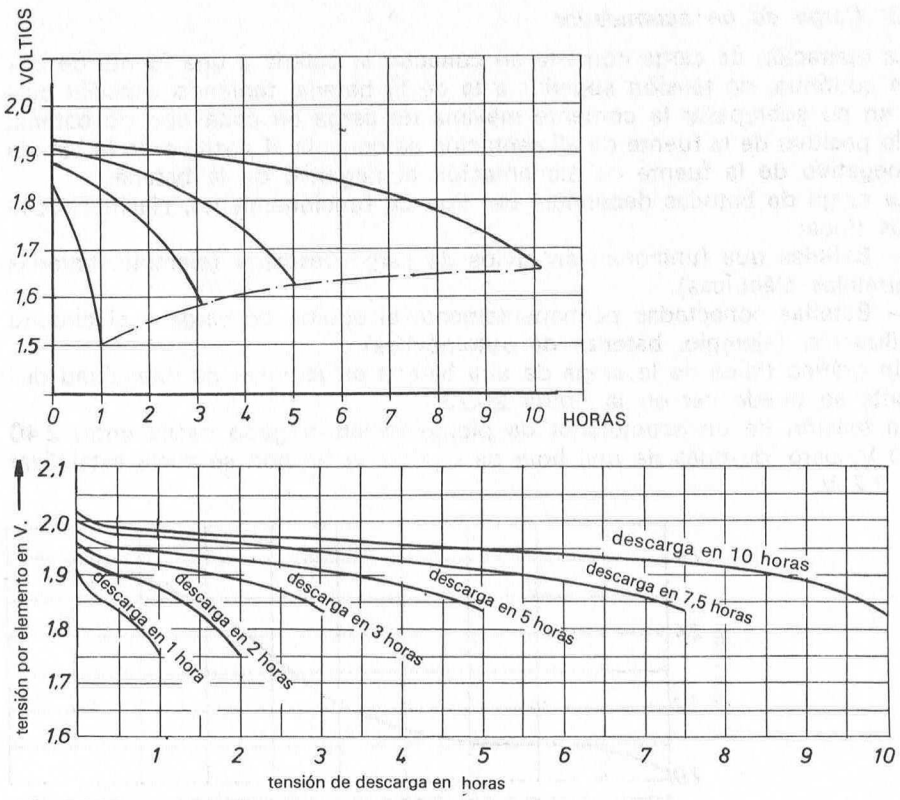


Fig. 20.23 Curvas de descarga en un acumulador de plomo.

Una característica estructural de esta clase de acumuladores es su gran robustez mecánica (generalmente se construyen de acero niquelado), por lo que los acumuladores alcalinos se suelen llamar *acumuladores de acero.*

20.6.1 *Principio de funcionamiento*

Las reacciones que se obtengan en la carga y descarga de los acumuladores serán función de la clase de acumulador, o sea, de la sustancia de que estén construidas sus placas, ya que la potasa cáustica (KOH) es el electrólito común para todos.

20.6.1.1 *Acumulador de níquel-cadmio (Ni-Cd)*

Las sustancias activas en esta clase de acumuladores son el hidróxido de níquel [$Ni(OH)_2$] para la placa positiva e hidróxido de cadmio [$Ca(OH)_2$] para la negativa.

Las reacciones que se producen en los procesos de carga y descarga pueden verse en la ecuación siguiente:

$$2\ Ni(OH)_2 + KOH + Cd(OH)_2 \underset{\text{descarga}}{\overset{\text{carga}}{\rightleftharpoons}} 2\ Ni(OH)_3 + KOH + Cd$$

Es de destacar que la potasa cáustica interviene en la reacción para transportar su carga iónica, pero ni aumenta ni disminuye su concentración, lo que constituye una gran ventaja, dado que no será necesario reponer electrólito periódicamente.

20.6.1.2 *Acumulador de plata-cinc (Ag-Zn)*

En esta clase de acumulador alcalino, las sustancias activas son: óxido de plata para los electrodos o placas positivas, y cinc para las negativas.

Las reacciones que se producen en los procesos de carga y descarga pueden verse en la ecuación siguiente:

$$H_2O + 2\ AgO + Zn + KOH \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftharpoons}} 2\ Ag + ZnO + KOH + Zn(OH)_2$$

En el proceso de descarga, la placa positiva se convierte en plata pura y, además, el electrólito disminuye su volumen aumentando la concentración de KOH, debido a la absorción de agua en la reacción. Cuando de nuevo se carga, el electrólito recupera su nivel normal, siendo una característica de esta clase de acumuladores.

Otra ventaja de estos acumuladores es que, en reducidas dimensiones y poco peso, almacenan gran cantidad de energía, teniendo como contrapartida su precio elevado (plata).

Para conseguir precios menos elevados, se ha desarrollado un acumulador cuyo electrodo positivo es el mercurio (Hg), siendo su funcionamiento idéntico al explicado anteriormente.

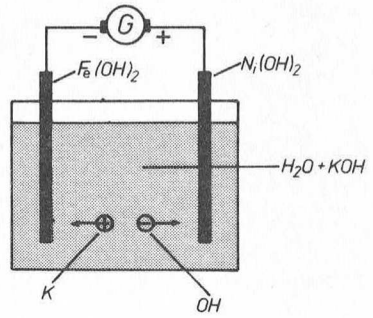


Fig. 20.24 Principio de funcionamiento de un acumulador Ni-Fe.

20.6.1.3 *Acumuladores de níquel-hierro (Ni-Fe)*

Esta clase de acumuladores es el más utilizado industrialmente de entre todos los alcalinos, debido a su extraordinaria robustez y costo más reducido.

Las sustancias activas de un *acumulador ferro-níquel,* cuando está descargado, son: hidrógedo de hierro, $Fe(OH)_2$, para las placas negativas, e hidróxido de níquel, $Ni(OH)_2$, para las positivas (fig. 20.24).

Las reacciones de carga de esta clase de acumulador son:

Cátodo:

$$Ni(OH)_2 + 2\ (OH)^- \longrightarrow 2\ Ni(OH)_3 + 2\ e^-$$

Anodo:

$$Fe(OH)_2 + 2\ K^+ + 2\ e^- \longrightarrow Fe + 2\ KOH$$

Si se suman ambas reacciones, se obtendrá:

$$Ni(OH)_2 + 2\ KOH + Fe(OH)_2 \xrightarrow{\text{carga}} 2\ Ni(OH)_3 + 2\ KOH + Fe$$

Puede comprobarse la similitud de esta reacción con la vista en el acumulador Ni-Cd.

Las reacciones de descarga son inversas a las anteriores:

Cátodo:

$$2\ Ni(OH)_3 + 2\ e^- \longrightarrow Ni(OH)_2 + 2\ (OH)^-$$

Anodo:

$$Fe + 2\ KOH \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2\ K^+$$

Quedan, al sumarlas:

$$2\ Ni(OH)_3 + 2\ KOH + Fe \xrightarrow{\text{descarga}} Ni(OH)_2 + 2\ KOH + Fe(OH)_2$$

De la misma forma, como sucedía en los acumuladores de Ni-Cd, el electrólito si bien interviene en la reacción del proceso iónico, permanece siempre en la solución sin variar aparentemente su concentración.

20.6.2 *Componentes de un acumulador alcalino*

Los acumuladores alcalinos se caracterizan por su gran robustez, dado que la mayoría de sus componentes son materiales férricos (chapas, vástagos, tuercas, etc.).

Los elementos de que consta esta clase de acumuladores no se diferencia prácticamente de los que constituían los acumuladores de plomo, aunque, en su técnica de construcción y materiales utilizados, sean diferentes; éstos son (fig. 20.25):

— Recipiente.
— Placas.
— Separadores.
— Electrólito.

El *recipiente* se caracteriza por construirse, por lo general, con chapa de acero niquelada. Suele disponer de una chapa, también de acero, para el cierre superior del mismo; por ella salen los bornes del acumulador y se aíslan con

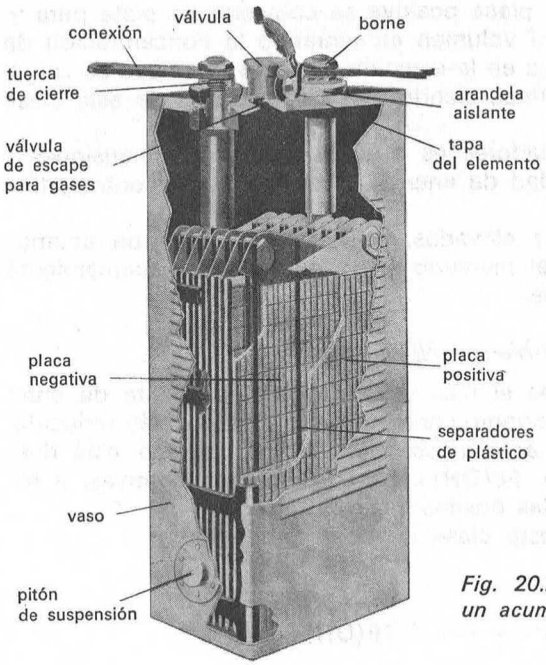


Fig. 20.25 Componentes de un acumulador alcalino.

arandelas adecuadas; además, esta tapa tiene un orificio para alojar el tapón roscado; por éste se repondrá el agua destilada evaporada y por él salen los gases.

Algunos recipientes suelen llevar una válvula de escape automático, para evacuar gases.

Los *separadores* son construidos con materiales plásticos porosos o con materiales perforados, para dejar pasar al electrólito.

20.6.2.1 *Placas*

Las placas positivas utilizadas en esta clase de acumuladores son de dos formas constructivas:

— Placas tubulares (fig. 20.26A).
— Placas de bolsa (fig. 20.26B).

Estas últimas son también utilizadas para las placas negativas.

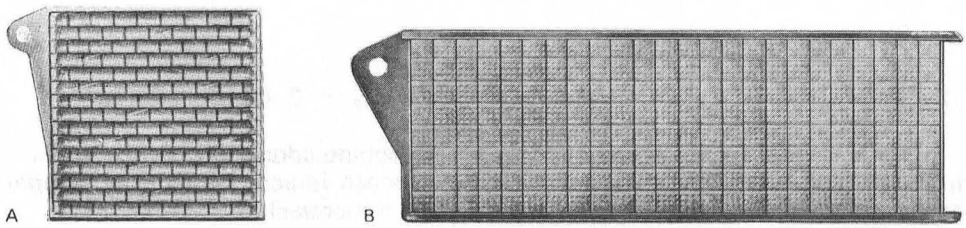


Fig. 20.26 Placas para acumuladores alcalinos: A, *tubulares;* B, *de bolsa.*

20.6.2.2 *Placas tubulares*

Su forma estructural es muy parecida a las explicadas en el apartado 20.5.2.2.4, si bien, en este caso, el tubo se construye con chapa de acero niquelado, colocándose en su interior la materia activa según el acumulador, formándose con varios tubos una placa positiva (fig. 20.26A).

20.6.2.3 *Placas de bolsa*

Estas placas se fabrican a base de tiras de fleje de acero perforado, con el cual se forman unos recipientes rectangulares, que se rellenan de la materia activa (fig. 20.27); uniendo varios de estos recipientes, se consigue la placa (fig. 20.26B).

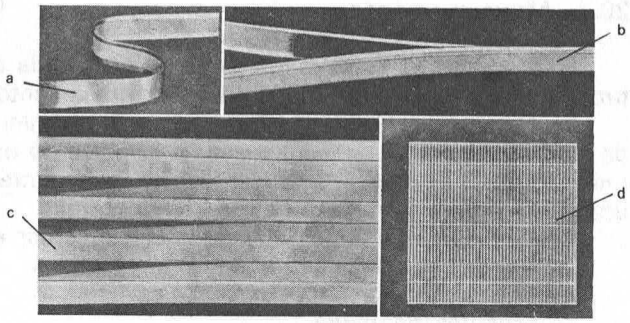


Fig. 20.27 Placas de bolsa: su formación. a, *pletina perforada de acero;* b, *formación de recipiente de sección rectangular;* c, *placa formada;* d, *asociación de recipientes rectangulares.*

20.6.2.4 *Electrólito*

El electrólito utilizado en los acumuladores alcalinos es la potasa cáustica (KOH), diluida en agua destilada, hasta alcanzar una densidad de 1,240 g/cm³; es de resaltar que, en estos acumuladores, la variación de la densidad es prácticamente nula; por tanto, esto no es indicativo del estado de carga del acumulador.

20.6.3 *Carga de un acumulador*

El proceso de carga de un acumulador se tiene que hacer con tensiones superiores a la de los elementos: 1,5 V para Ni-Fe y 1,4 V para Ni-Cd.

Durante el tiempo que la carga se mantiene en esos valores, no se produce desprendimiento de gases; superados 1,7 V, se producen estos gases.

La tensión de cada elemento no debe superar 1,8 V, siendo la mínima tensión 1 V.

Se dice que un acumulador está cargado cuando su tensión supera 1,7 V, no variando durante unos 15 ó 20 minutos.

Un gráfico de carga de esta clase de acumuladores se puede ver en la figura 20.28.

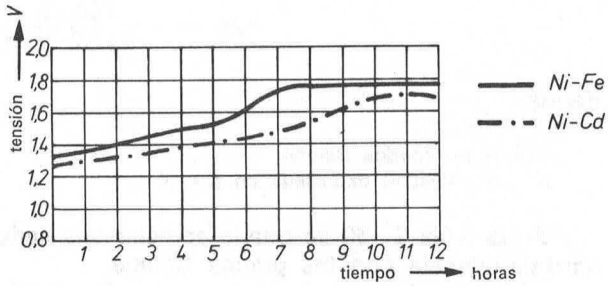


Fig. 20.28 Curvas de carga de un acumulador alcalino.

20.6.4 *Descarga de un acumulador*

La descarga de un acumulador alcalino es función de la corriente de descarga; así, al descargarse en 10 horas una batería de 104 Ah (fig. 20.29), se mantendrá prácticamente una tensión de 1,2 V en cada vaso; si, por el contrario, el régimen de descarga de la batería es de 20 A, el tiempo que mantiene la tensión de descarga de cada vaso es menor.

Por último, si la descarga se hace a un régimen de 60 A, el tiempo de funcionamiento será inferior a una hora.

El rendimiento de los acumuladores alcalinos es menor que el de los de plomo, siendo entre el 50 % para Ni-Fe y el 57 % para Ni-Cd.

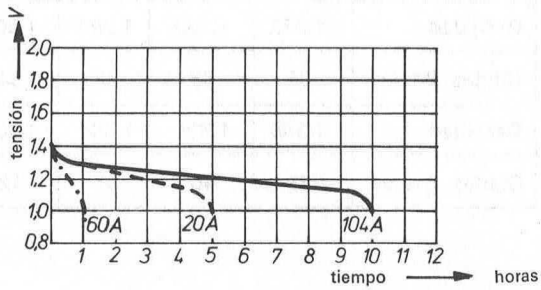


Fig. 20.29 Curvas de descarga en los acumuladores alcalinos.

20.7 Mantenimiento

Si fundamental es el mantenimiento en la vida de cualquier elemento eléctrico, todavía más, si cabe, lo es el mantenimiento de los acumuladores.

En la mayoría de las ocasiones, un mantenimiento adecuado alarga la vida de las baterías en un 100 %; o sea, si la placa de un acumulador puede resistir unas 200 ó 300 cargas y descargas, un mal mantenimiento acortará la vida a unas 100 ó 150 cargas y otras tantas descargas.

Los trabajos periódicos que se deben efectuar en una batería son:

— Reposición de electrólito.
— Reposición de agua destilada.
— Medidas de carga.
— Limpieza y comprobación general.

Estas son las labores que se deben realizar cuando se instala una batería; pero si se produjera una *avería,* debería ser subsanada, para evitar la destrucción total de los acumuladores de la batería.

20.7.1 *Reposición de electrólito*

En este caso, es necesario distinguir tres situaciones: la puesta en marcha de un acumulador nuevo, el relleno por un vertido involuntario y la reposición periódica.

En la primera situación, se debe introducir el electrólito adecuado, H_2SO_4 o KOH según el acumulador, con la densidad indicada por el fabricante.

Por lo general, esta operación es muy poco frecuente, ya que los fabricantes suelen suministrar montadas y rellenas las baterías, o sea, dispuestas para el uso.

Dicha densidad se suele dar en g/cm³ o en grados Baumé.

20.7.1.1 *Relación entre la densidad y los grados Baumé*

En primer lugar, es necesario determinar qué son los *grados Baumé.* Estos grados forman una escala de medida de las densidades, en los países anglosajones, siendo la fórmula de reducción:

$$°Bé = \frac{144{,}32}{144{,}32 - d}$$

donde:

°Bé = los grados Baumé
d = densidad expresada en g/cm³

En la tabla 20.30 se puede apreciar una serie de valores de densidad y su correspondencia con los grados Baumé.

Los acumuladores de plomo se suelen suministrar con ácido sulfúrico, de densidad 1,150 g/cm³, que equivale a unos 18 °Baumé.

En los acumuladores alcalinos, la densidad suele ser de 1,10 g/cm³ equivalentes a 14 °Baumé.

Tabla 20.30 Conversión de densidades a grados Baumé

Densidad	1,115	1,124	1,133	1,142	1,151	1,160	1,169	1,179
Grados Baumé	15	16	17	18	19	20	21	22
Densidad	1,188	1,198	1,208	1,218	1,229	1,239	1,250	1,261
Grados Baumé	23	24	25	26	27	28	29	30
Densidad	1,272	1,283	1,295	1,306	1,318	1,330	1,242	1,355
Grados Baumé	31	32	33	34	35	36	37	38
Densidad	1,368	1,381	1,394	1,408	1,835			
Grados Baumé	39	40	41	42	66			

20.7.1.2 *Relleno y reposición de electrólito*

En la segunda situación, cuando por una manipulación indebida, se ha vertido una cierta cantidad de electrólito y el mismo no llega a cubrir las placas del acumulador, se debe rellenar el recipiente con un electrólito adecuado, hasta conseguir que éste llegue a cubrir de nuevo las placas.

Se ha dicho que el relleno se debe efectuar con electrólito adecuado, ya que la batería podrá estar con una u otra carga cuando se produzca el vertido y, en consecuencia, su densidad será variable.

Para hacer el relleno adecuado, se procederá de la siguiente forma:

a) Se medirá la densidad del electrólito restante.

b) Se realizará una mezcla entre electrólito puro y agua destilada, para conseguir una densidad idéntica a la que queda en la batería.

c) Se rellenará con la mezcla preparada, hasta que el nivel cubra las placas.

20.7.1.3 *Método de mezcla*

En la figura 20.31 se muestra un gráfico que sirve para determinar la proporción entre partes de agua y ácido, según la pureza de éste.

Ejemplo

Se dispone de una batería de la que se ha vertido un poco de electrólito, cuya densidad es 1,179 g/cm³ equivalentes a 22 °Bé. Para hacer la reposición, se tiene ácido sulfúrico de densidad 1,835 g/cm³ y se desea conocer cuál debe ser la proporción de mezcla entre el ácido de que se dispone y agua destilada.

Solución:

En el gráfico de la figura 20.31 se desplaza en horizontal la línea de los 22 °Bé que se desean conseguir, hasta alcanzar la curva del sulfúrico que se posee; en este caso, al ser 1,835 g/cm³, corresponde a 66 °Bé; descendiendo verticalmente, se consigue la proporción entre agua y sulfúrico. En este caso, 5 volúmenes de agua por uno de ácido.

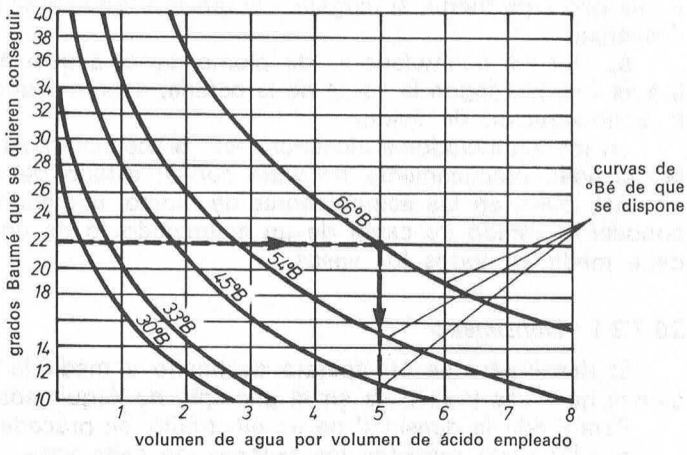


Fig. 20.31 Gráfico para mezclas.

Cuando se realice la mezcla de ácido sulfúrico con agua destilada, se debe realizar la mezcla en el orden adecuado (fig. 20.32), ya que, si se vierte agua sobre ácido, los gases desprendidos en la mezcla provocan como una explosión, en la cual se expulsan ácido y agua hacia el exterior, pudiendo alcanzar al que realiza la operación, con grave riesgo de accidente por quemaduras de ácido.

Para mayor seguridad, se comprobará con un densímetro, una vez efectuada la mezcla.

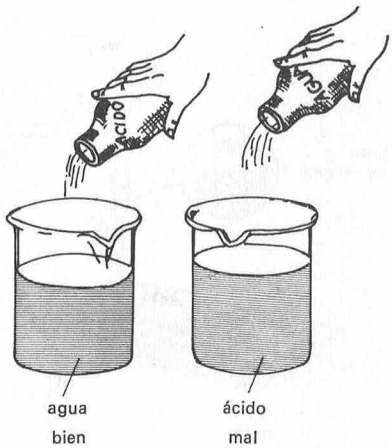


Fig. 20.32 Mezcla de agua y sulfúrico.

20.7.1.4 *Relleno periódico*

Trascurrido un tiempo desde la puesta en funcionamiento de una batería, es conveniente, para el buen funcionamiento de la misma, la sustitución total del electrólito, dado que, después de unos cuantos procesos de carga y descarga, el electrólito contiene en suspensión partículas sólidas (sulfatos o derivados de éstos).



Fig. 20.33 Elemento para comprobar la tensión de los elementos de una batería.

Por lo general, los fabricantes indican el período de tiempo de funcionamiento, de duración de los electrólitos, o sea, indican el número de cargas y descargas que admite un mismo electrólito sin que se deba reponer.

Estas sustituciones se deben realizar una vez cargada la batería, vaciada de electrólito y limpia.

20.7.2 *Reposición de agua destilada*

Periódicamente, durante el funcionamiento de una batería, se deben revisar los niveles de electrólito.

Si el nivel es correcto (cubre las placas), la batería está en buen estado.

Si el nivel del electrólito es deficiente (no cubre las placas), se deberá añadir agua destilada hasta alcanzar el nivel adecuado.

El reponer agua, y no sulfúrico, se debe a que sólo el agua puede evaporarse (disociación, calentamiento, volatilización, etc.). Evidentemente, si la falta de nivel se debe a un vertido de electrólito, se deberá reponer según lo expuesto en los apartados precedentes.

Es muy importante que la reposición de líquido se haga con agua destilada, libre de cloro y sustancias minerales que pudieran reaccionar y producir sedimentos nocivos.

20.7.3 *Medidas de carga*

Otra operación periódica que es necesario realizar es la medida del estado de carga de una batería, ya que una batería descargada durante mucho tiempo equivale a su destrucción.

Para medir la carga de una batería, se puede obrar de dos formas:

a) Midiendo la tensión de cada elemento.

b) Midiendo la densidad del electrólito.

a) Para medir la tensión de cada elemento, se utiliza un voltímetro especial que incorpora una resistencia (fig. 20.33), con lo que se somete al elemento a una descarga fuerte; si mantiene la tensión, está cargado; si cae, se encuentra descargado.

b) En los acumuladores de plomo, se veía que la densidad del electrólito es variable según la carga de la batería, debido a que aumenta o disminuye la concentración de ácido.

En los acumuladores alcalinos, este procedimiento no es válido, dado que la densidad prácticamente no varía con el estado de carga.

Así, pues, en los acumuladores de plomo, midiendo la densidad se podrá conocer el estado de carga de un acumulador o de una batería; en éstas, se debe medir en todos los vasos.

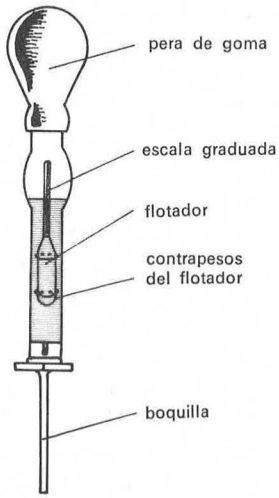


Fig. 20.34 Densímetro.

20.7.3.1 *Densímetro*

El densímetro es un aparato destinado a medir la densidad de las soluciones químicas y se basa en el principio de Arquímedes (fig. 20.34).

Para medir la densidad de un electrólito, se procede de la siguiente forma:

a) Una vez retirados los tapones de cada vaso, se introduce el densímetro y se aspira líquido con la *pera,* hasta que el flotador quede libre (figura 20.35).

b) Se levanta el densímetro y se lee la densidad en la escala graduada, con el nivel del líquido.

Una indicación de la densidad aproximada, según la carga, se puede reflejar a continuación:

— plena carga 1,275 g/cm³.
— media carga 1,230 g/cm³.
— descargado 1,100 g/cm³.

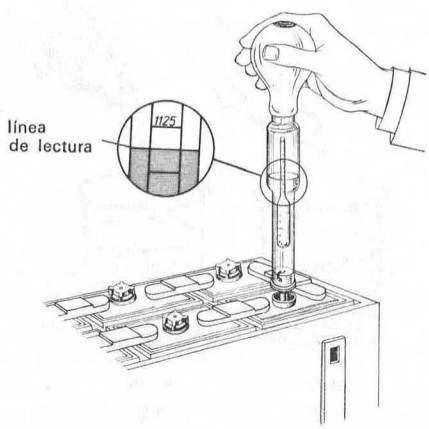


Fig. 20.35 Medida de la densidad de un electrólito.

20.7.4 *Limpieza y comprobación general*

Otros de los trabajos periódicos son la limpieza exterior de la batería y una comprobación general.

La limpieza exterior es necesaria para que no se produzcan sulfataciones u oxidaciones de los bornes y, a la vez, para que no puedan caer polvo o sedimentos al electrólito.

Las comprobaciones generales se deben realizar cada mes o cada seis

meses, según el régimen de funcionamiento que se le dé a la batería. En una comprobación general, se deberán hacer los trabajos descritos anteriormente:

— Reposición de agua destilada.
— Medida de carga.
— Limpieza.

Cuando la revisión periódica coincida con el cambio de electrólito, también se hará esta operación.

20.7.5 *Averías*

A lo largo de la vida de una batería, se producirá alguna avería; en consecuencia, es necesario repararla inmediatamente, ya que, de lo contrario, se corre el riesgo de que se destruya definitivamente.

En general, el criterio para reparar cualquier avería es el siguiente:

— Observar los síntomas de la avería.
— Pensar en una explicación de aquellos síntomas.
— Desmontar y sustituir la parte dañada (para desmontar, se intentará que sea la menor parte; para eso sirve el criterio precedente).

Con el fin de poder dar una ayuda, las tablas 20.36 y 20.37 muestran algunas de las averías que se suelen dar más corrientemente.

Tabla 20.36 Averías de acumuladores de plomo

Tipo	*Avería*	*Posibles causas*	*Reparación*
Acumulador de plomo	1 Descarga rápida	Sobrecarga.	Disminución del consumo.
		Cortocircuito en la instalación.	Eliminarlo o sustituirla.
		Cortocircuito interno entre placas.	Limpiar las placas y cambiar el electrólito.
	2 Suministra tensión inferior a la nominal	Defecto en el electrólito.	Añadir ácido.
		Elementos cortacircuitados.	Eliminarlo.
		Sulfatación.	No es posible en la mayoría de los casos.
		Resistencia interna grande.	Añadir agua destilada. Comprobar la densidad.
	3 Pérdida de agua	Recipiente agrietado.	Cambiarlo.
		Tapones defectuosos.	Cambiarlos.
	4 Terminales muy sucios	Pérdida de electrólito.	Limpiarlo con amoníaco y protegerlo con grasa.
		Contactos flojos.	Apretarlos.
	5 Dificultad de carga	Sulfatación.	No es posible.
		Placas defectuosas.	Cambiar las placas.
		Separadores defectuosos.	Cambiar los separadores.
		Regulador de carga desajustado.	Ponerlo a punto.

Tabla 20.37 Averías de acumuladores de plomo

Elemento averiado y síntomas		*Posible causa*	*Reparación*
1. *Electrólito.*	Sucio.	Se han dejado abiertos los tapones de los elementos; temperatura de la batería demasiado elevada (sobre todo durante la carga); demasiado tiempo sin renovar la potasa; no se ha empleado agua destilada limpia para rellenar.	Cambiar la potasa después de enviar una muestra para su ensayo.
	Salida de los elementos.	Nivel de la potasa demasiado alto: carga demasiado fuerte.	Corregir el nivel del electrólito; reducir corriente de carga.
	Densidad demasiado elevada.	Relleno erróneo (potasa en lugar de agua).	Corregir densidad. En caso de necesidad quitar potasa y reemplazarla por agua.
	Densidad demasiado baja.	Carga demasiado fuerte (derramamiento de potasa). Relleno hasta demasiada altura, por lo tanto salida del electrólito de los elementos.	Controlar carga. Corregir densidad; rellenar con potasa (eventualmente 1,24); bajar nivel de la potasa.
	Formación de espuma.	Electrólito sucio debido a grasa.	Cambiar electrólito previo lavado.
	Nivel demasiado alto.	Relleno hecho indebidamente.	Corregir nivel de electrólito.
	Nivel demasiado bajo.	Se ha olvidado el relleno.	Corregir nivel de electrólito.
	Temperatura demasiado elevada.	Trabajo demasiado intenso; carga demasiado larga; corriente de carga demasiado alta.	Controlar descarga y carga; rebajar descarga; regular la carga en proporción a la descarga; rebajar intensidad de la corriente de carga; intercalar períodos de enfriamiento; eventualmente adquirir batería de repuesto.
	Coloración óxido-marrón.	Electrólito sucio.	Cambio del electrólito.
		El relleno se ha hecho con agua acidulada.	Cambio inmediato del electrólito. Si no se dispone de potasa nueva, lavar con agua destilada; dejar el agua destilada hasta que se eche el electrólito nuevo.
2. *Calentamiento de la batería.*	Demasiado.	Trabajo demasiado intenso; falso contacto; alta resistencia, debida a conexiones o cables flojos; superficies de contacto sucias.	Reducir intensidad de la corriente de carga; eventualmente procurarse una batería de recambio; controlar conexiones; eventualmente limpiarlas; apretar tuercas de terminales.
3. *Humedad.*	Sobre todo en las tapas de los elementos o en el fondo de la caja de batería.	Nivel demasiado alto; relleno defectuoso (agua vertida); orificios de desagüe atrancados por suciedad.	Corregir nivel; limpiar y secar elementos y caja de batería. Limpiar orificios de desagüe.
4. *Revestimiento aislante de cajas de baterías.*	Suelto.	Defecto mecánico.	Limpiar cajas de baterías; rellenar con Chatterton lugares defectuosos y apretarlos (con mordazas).
5. *Revestimiento aislante de los elementos.*	Suelto.	Penetración del electrólito en fisuras y desprendimiento del revestimiento por formación de cristales; fisuras producidas por defecto mecánico.	Limpiar elementos; partes despegadas revestirlas con Chatterton y apretarlas con mordazas; después dar una mano de pintura a los bordes superiores del elemento y del revestimiento.
6. *Reducción de capacidad.*		Carga insuficiente.	Igualar la carga con la descarga, en carga automática variar eventualmente el tiempo del regulador de carga.
		Electrólito sucio.	Cambiar el electrólito.
		Temperatura siempre demasiado alta.	Ninguna; es preciso hacer reparación en fábrica.
		Demasiada vida de la batería.	Ninguna; síntoma normal de desgaste.
		Batería húmeda debido al nivel demasiado alto del electrólito o relleno defectuoso.	Limpiar y secar la batería; en caso de necesidad, desmontarla para ello.

Tabla 20.37 Averías de acumuladores de plomo (continuación)

Elemento averiado y síntomas		*Posible causa*	*Reparación*
7. *Batería en corto.*	Pérdida de capacidad.	Aislamiento de cable defectuoso.	Desembornar cables; si se ha quitado el cortocircuito, entonces la batería está en orden; poner cables nuevos y, si es necesario, mejorar aislamiento.
		La instalación eléctrica del vehículo, defectuosa.	Desembornar cables; si se ha quitado el cortocircuito, está la batería en orden; revisar instalación.
8. *Formación de cristales.*	Se depositan cristales encima de los elementos en grandes cantidades.	Nivel demasiado alto. Carga demasiado fuerte.	Quitar los cristales con brocha, empleando agua caliente. Controlar nivel y carga.
9. *Barnizado de los elementos defectuosos.*	En elementos pulidos.	Desgaste normal.	Quitar restos de barniz; limpiar elementos y desengrasar (tricloretileno); renovar el barnizado (barniz negro).
	En chasis y estantes.	Desgaste normal.	Limpiar y secar chasis y estantes; renovar el barnizado (barniz negro).
	En elementos *L*.	Desgaste normal.	Limpiar bordes de los elementos; renovar la pintura.
10. *Oxidación del elemento.*		Elementos húmedos debido al deficiente relleno, influencias atmosféricas o efectos químicos.	Quitar la parte oxidada con papel esmeril fino (00); engrasar; mantener la batería seca.
11. *Tensión anormal.*	En la carga demasiado alta.	Falso contacto; resistencia elevada debido a terminales o cables flojos; superficies de contacto sucias.	Comprobar conexiones, eventualmente limpiarlas; apretar las tuercas de las bornas.
		Temperatura de la batería, muy baja.	Poner la batería a temperatura normal.
		Corriente de carga demasiado alta.	Reducir corriente de carga.
	En la descarga demasiado baja.	Falso contacto; resistencia elevada debido a terminales o cables flojos; superficies de contacto sucias.	Comprobar conexiones, eventualmente limpiarlas; apretar las tuercas de las bornas.
		Temperatura de la batería, baja.	Poner la batería a temperatura normal.
12. *Pérdida de tensión.*	Prematura.	Carga insuficiente.	Poner la carga en la justa proporción con la descarga.
		Electrólito sucio.	Cambiar el electrólito.
		Defecto de aislamiento (descarga por cortocircuito).	Cambiar aislamiento.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Escríbase un trabajo monográfico sobre el montaje y desmontaje de los acumuladores de plomo y alcalinos.

— Estúdiense los procesos de carga de un acumulador y los equipos que se usan para ello; realícese un trabajo al respecto.

— Realícese un trabajo monográfico de la variación de la densidad de un electrólito con la temperatura.

CUESTIONARIO

20.1 ¿Quién inventó los acumuladores?
20.2 ¿A quién se deben los acumuladores actualmente utilizados?
20.3 ¿Cuáles son los componentes de un acumulador?
20.4 Explicar el principio de funcionamiento de un acumulador.
20.5 ¿A quién se debe el proceso eléctrico?
20.6 ¿Qué diferencia hay entre batería y acumulador?
20.7 ¿A qué se debe la resistencia interna de un acumulador?

20.8 ¿Qué es la capacidad de un acumulador? ¿De quién depende?

20.9 ¿Cuántas clases de acumuladores hay? ¿Cuáles?

20.10 ¿Cuáles son las sustancias de las placas, en la descarga y carga del acumulador de plomo?

20.11 ¿Cuál es la característica constante de las diferentes placas en los acumuladores de plomo?

20.12 ¿Cómo se llaman los diferentes tipos de placas?

20.13 ¿Qué función realizan los separadores?

20.14 ¿Cuál es el electrólito que se utiliza en los acumuladores de plomo? ¿Cuáles son las densidades, extrema y adecuada?

20.15 ¿Cuántas clases de acumuladores alcalinos hay?

20.16 ¿Cuál es la materia activa en los acumuladores Ni-Fe?

20.17 ¿Cómo se llaman las placas utilizadas en los acumuladores alcalinos?

20.18 ¿Cuál es la densidad del electrólito de los acumuladores alcalinos? ¿De qué está compuesto?

20.19 ¿A qué ºBé corresponden las densidades de los electrólitos correspondientes a los acumuladores de plomo y alcalinos? Compruébese.

20.20 En la mezcla de sulfúrico con agua, ¿cuál se debe echar sobre el otro?

20.21 ¿Cómo se puede medir la carga de un acumulador de plomo? ¿Y de otro alcalino?

20.22 ¿Por qué deben limpiarse exteriormente las baterías?

20.23 ¿Cuáles son las funciones necesarias en las averías?

BIBLIOGRAFIA

DAWES CH. L., *Tratado de electricidad,* Gustavo Gili, S. A., Barcelona 1966.

Enciclopedia CEAC, *Pilas y Acumuladores. Máquinas de corriente continua,* Ediciones CEAC, Barcelona 1973.

CASAS SABATA J. M.ª, *Tecnología Química 1.1,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1976.

CASADO R., *Tecnología Eléctrica 1.2,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1976.

HILLE W., *Electricidad,* Ed. Labor, S. A., Barcelona 1968.

HARVEY R. A., *Empleo y carga de los Acumuladores eléctricos,* Marcombo, S. A., Barcelona 1959.

Tema 21

Baños electrolíticos industriales

OBJETIVOS

— *Describir un proceso electroquímico industrial.*
— *Enumerar las fases sucesivas de un baño electrolítico.*
— *Justificar el empleo actual de los rectificadores de las instalaciones electroquímicas.*

GUION

— Aplicación industrial de la electrólisis.
— Tratamiento previo de los objetos.
— Utillajes de las instalaciones galvanostégicas.
— Protección de superficies metálicas.
— Circuitos especiales para baños electrolíticos.

PUNTOS CLAVE

— Reconocer las diferentes aplicaciones de la electrólisis.
— Necesidad de los tratamientos previos.
— Regulación eléctrica en baños electrolíticos.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Repaso del tema 20, apartado 20.1.

EXPOSICION DEL TEMA

21.1 Aplicación industrial de la electrólisis

Las tres aplicaciones más importantes que se hacen de la electrólisis en la industria son las siguientes:

— Galvonostegia.
— Galvanoplastia.
— Refinado de metales.

21.1.1 *Galvanostegia*

Es una aplicación de la electrólisis, que tiene por misión recubrir una pieza de metal con una capa más o menos gruesa de otro metal de mejores propiedades.

21.1.2 *Galvanoplastia*

Es la reproducción de objetos mediante capas de metal depositadas electrolíticamente.

Inicialmente, se construye un molde de material blando, como plástico, cera o yeso, y luego se le hace conductor de la electricidad en la cara que se

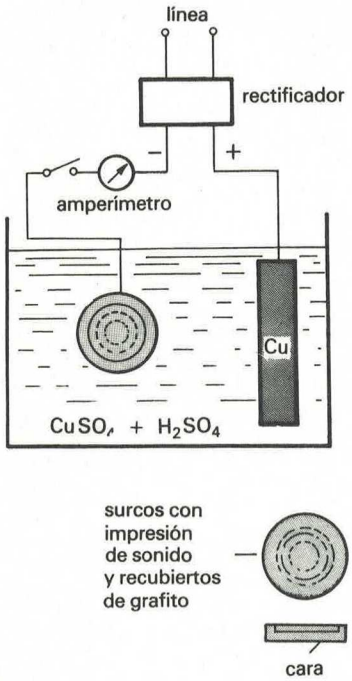


Fig. 21.1 Reproducción de un disco por galvanoplastia.

desea reproducir, esparciendo polvo fino de grafito u otra sustancia conductora de la electricidad.

El clisé negativo formado se introduce como cátodo de una cuba electrolítica y se recubre de una capa de cobre. Como ánodo se emplea una barra de cobre, y la disolución electrolítica está formada de una sal de cobre y ácido sulfúrico (fig. 21.1).

Finalizada la deposición, el molde se separa de la capa electrolítica depositada y se rellena ésta con una aleación que le proporcione rigidez. Con la mascarilla obtenida, pueden reproducirse objetos en serie un gran número de veces.

Las aplicaciones de la galvanoplastia son muy numerosas. Entre las principales: reproducciones tipográficas, grabados, monedas, medallas, estatuas, discos, etc.

21.1.3 *Refinado de metales electrolíticamente*

La deposición de metales por electrólisis es el método más adecuado para obtenerlos en estado de máxima pureza.

En la actualidad, muchos metales se obtienen electrolíticamente; no obstante, el cobre es el de mayor importancia industrial.

Para refinar el cobre, se suspenden los ánodos de cobre bruto en un baño de sulfato cúprico acidulado con ácido sulfúrico. Como cátodos se emplean láminas delgadas de cobre puro recubierto de grafito, para que el metal depositado por la corriente eléctrica pueda separarse después fácilmente; las láminas se suspenden alternativamente con los ánodos en el mismo baño (fig. 21.2).

Cuando pasa la corriente, los iones cobre se descargan en el cátodo, que va engrosándose por el metal puro adherido, a la vez que en el ánodo se disuelve una cantidad equivalente de cobre, formando iones cúpricos. Si las impurezas del cobre son de elementos más activos (cinc, hierro, níquel, plomo), pasan a la disolución y quedan en ella. Si, por el contrario, son menos activos que el cobre (plata, estaño, antimonio), no se disuelven y caen al fondo de las cubas, debajo de los ánodos, formando el barro anódico. Estos últimos, si contienen metales preciosos, se recuperan extrayéndolos del barro, haciendo que sea más rentable el proceso de refinado del cobre.

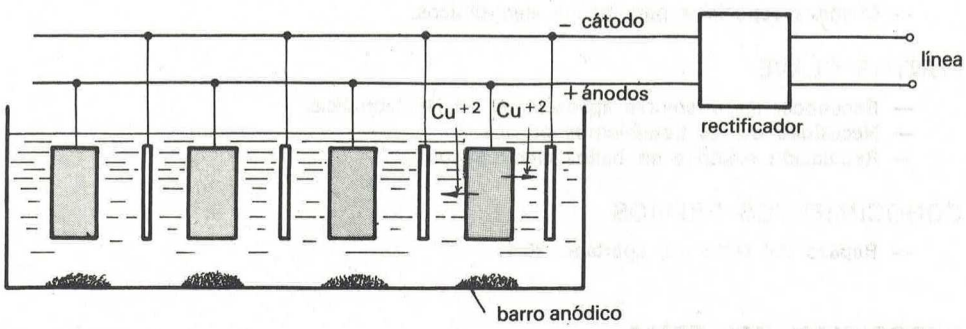


Fig. 21.2 Refinado electrolítico del cobre.

21.2 **Tratamiento previo de los objetos**

El problema más importante en galvanostegia es conseguir recubrir los objetos con un precipitado denso del metal catódico, procurando que sea lo más regularmente posible y quede bien adherido. La adherencia depende principalmente de la superficie que hay que galvanizar. Por esto, las piezas por recubrir deben someterse previamente a unos tratamientos de limpieza para dejarlas en condiciones óptimas para el recubrimiento.

En primer lugar, la superficie debe limpiarse perfectamente de todos los cuerpos extraños, de forma que quede completamente limpia al sumergirla (como cátodo) en el baño.

La superficie de las piezas por galvanizar pueden limpiarse de tres formas:
— por vía mecánica;
— por vía química;
— por vía electrolítica.

21.2.1 *Limpieza mecánica*

Consiste, principalmente en eliminar las suciedades tales como el óxido, herrumbre, grasa, etc., por los métodos de raspado, decapado, esmerilado, pulido, etc.

Hay que tener en cuenta, si se trabaja con lima, que esta dejará huellas perfectamente perceptibles y, si el revestimiento galvánico ha de ser liso, la superficie de la pieza deberá también serlo antes del galvanizado. Estas irregularidades se eliminan puliendo o esmerilando la superficie.

Se pule la pieza en una máquina pulidora compuesta por un disco o cepillo de tela, que gira a gran velocidad. El número de vueltas del inducido de los motores para estas máquinas es de 1 400 a 1 600 r. p. m. en las esmeriladoras, y 2 000 a 3 000 r. p. m. en las pulidoras.

También puede efectuarse la limpieza empleando cepillos de alambre o bien chorro de arena o de perdigones, proyectados sobre la pieza por una máquina especial.

Hay otras máquinas llamadas *tambor de bolas,* que consisten en poner las piezas a pulir dentro de tambores grandes de hierro provistos de bolas de acero brillantes, de modo que aquéllas son envueltas completamente por las bolas de acero. Al hacer girar el tambor, pasan continuamente dichas bolas por la superficie de las piezas, puliéndolas.

21.2.2 *Limpieza química*

En muchos casos no basta con la limpieza mecánica, ya que ha de eliminarse radicalmente la capa de grasa que se forma en la superficie de los objetos como consecuencia de la limpieza mecánica. Esta eliminación se lleva a cabo mediante un tratamiento químico adecuado. El decapado es el procedimiento más utilizado.

El decapado se hace con ácidos diluidos, tales como ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico, etc., teniéndose que adoptar, para los distintos metales, una composición y una temperatura del líquido de decapado perfectamente prescritas.

Antes de sumergir las piezas dentro del baño decapante, se eliminará toda la grasa posible, recociendo las piezas.

21.2.3 *Limpieza electrolítica*

Consiste en colocar como ánodos los objetos que hay que limpiar dentro de un baño de composición adecuada, haciendo circular por éste una corriente eléctrica de bastante intensidad. De esta forma, la capa de óxido que se encuentra en la superficie de los objetos se disuelve. La densidad de corriente ha de ser de 10 A/dm^2 en adelante.

Si se emplean sales neutras o alcalinas, puede conseguirse desengrasar y decapar en el mismo baño.

Otro sistema para limpiar la superficie, sobre todo de yesca, es hacer trabajar los objetos dentro del baño como cátodos, utilizando como ánodo el plomo o carbón, haciendo pasar por la solución una corriente de 4 a 5 A/dm^2 en adelante. De esta forma, se desprenderá hidrógeno de la superficie del cátodo, en forma de burbujas, que arrastrarán consigo la yesca.

21.3 **Utillajes de las instalaciones galvanostégicas**

Los elementos que componen un equipo de galvanostegia están esquematizados en la figura 21.3.

— *Cubas.* Generalmente se requieren cuatro para las operaciones de desengrasado, decapado, lavado y baño de recubrimiento, aunque, en ciertas prácticas industriales, se puede ampliar este número considerablemente.

Se construyen de capacidad adecuada a las piezas por tratar y de un material que resista la acción corrosiva de los baños; generalmente, son de plástico o bien de hierro protegido por una capa de esmalte o barniz inatacable.

— *Electrodos.* Son específicos para cada tipo de recubrimiento. En la tabla del apartado siguiente, se detallarán los materiales adecuados según el recubrimiento.

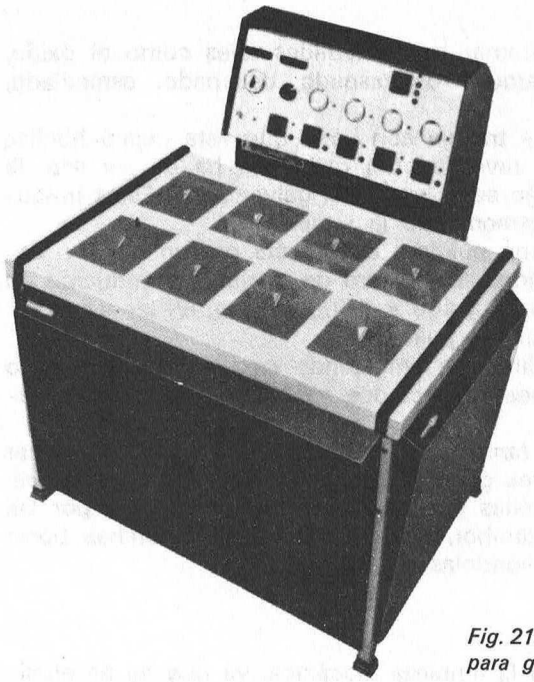


Fig. 21.3 Equipo y utillajes para galvanostegia.

— *Instalación eléctrica.* La instalación será de corriente continua. Hasta no hace mucho tiempo, se empleaban las dínamos para producir dicha energía. Actualmente se utilizan equipos rectificadores controlados para obtener la corriente continua a partir de la corriente alterna de la línea, con un amperímetro y un voltímetro para regular los valores de corriente y tensión a que deben realizarse los tratamientos de cada pieza.

El espesor de la capa depositada depende de la intensidad de la corriente y del tiempo que dura el recubrimiento, de acuerdo con las leyes de Faraday.

La intensidad, asimismo, depende de la superficie de la pieza por recubrir y, por ello, se indica en cada tratamiento la densidad de corriente idónea para el mismo:

$$\delta = \frac{I}{S} \ A/cm^2$$

De esta fórmula se deduce la corriente requerida:

$$I = \delta \cdot S$$

El tiempo se controla, generalmente, con un dispositivo de relojería, que desconecta el circuito o conecta algún sistema de alarma, una vez transcurrido el tiempo preestablecido.

En la figura 21.4 se muestra un equipo didáctico de tratamientos galvánicos con las cubas de trabajo y el panel eléctrico de mandos.

21.4 Protección de superficies metálicas

Las principales aplicaciones de la galvanotecnia son las de proteger los materiales contra la corrosión, y la de decorar.

La película de material protector se obtiene utilizando éste como ánodo, y las piezas que se desea recubrir, como cátodos, empleando un electrólito de una solución del metal que se ha de depositar.

Los principales metales autoprotectores que se depositan electrolíticamente son:

— Cobre (cobreado).
— Cinc (cincado).
— Níquel (niquelado).
— Cromo (cromado).

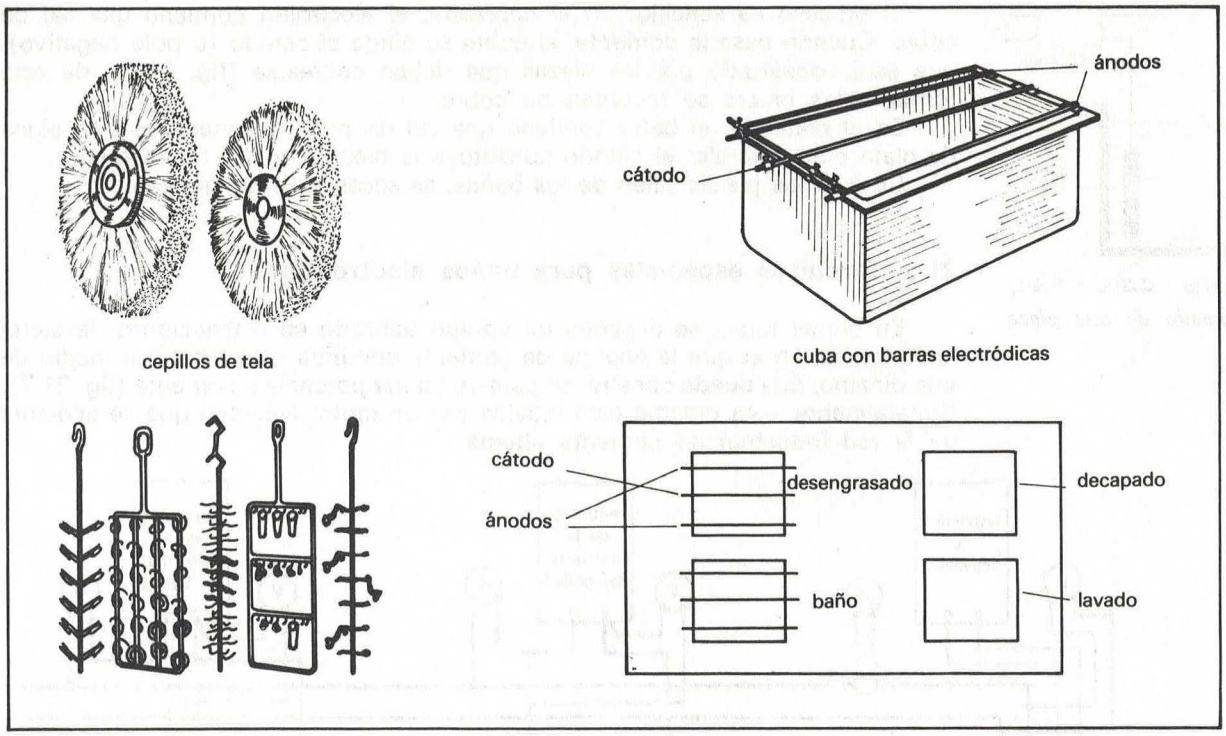


Fig. 21.4 Equipo didáctico de tratamientos galvánicos.

Como decorativos se emplean:
— Oro (dorado).
— Plata (plateado).
— Rodio (rodiado).

El recubrimiento de piezas de hierro o acero con cinc se denomina cincado o también *galvanizado;* y, si la pieza se recubre con una película de estaño, se tiene la *hojalata.*

Los tipos de recubrimientos electrolíticos utilizados principalmente en la industria, así como sus aplicaciones, aparecen resumidos en la tabla 21.5.

Tabla 21.5 Baños y condiciones de trabajo en galvanostegia

	Cobreado	*Niquelado*	*Cromado*	*Cincado*	*Plateado*	*Dorado*
Anodos	Cobre electrolítico	Níquel	Plancha de plomo	Cinc	Plata pura	Oro o bien de acero, platino o nicrom
Baños	$CuSO_4$ en H_2SO_4 o bien CuCN y K CN abrillantadores	$NiSO_4 \cdot 7\ H_2O$ $NiCl_2 \cdot 6\ H_2O$ H_3BO_3 abrillantadores	Acido crómico y $Cr_2(SO_4)_3$	ZnO NaCN NaOH purificador	$K \cdot Ag(CN)_2$ KCN CO_3K_2 KOH abrillantadores	$Cu \cdot Au\ (CN)_2$ K CN
Tiempo	10 minutos	10 minutos	5 minutos	5 minutos	30 segundos	30 segundos
Temperatura	60 °C-70 °C	60 °C-70 °C	50 °C	20 °C-30 °C	80 °C	30 °C-60 °C
Densidad corriente	1,5-2 A/dm²	2-5 A/dm²	5 A/dm²	1,5-2,5 A/dm²	1,5 A/dm²	0,5-2 A/dm²
Aplicaciones	Protección corrosión y como capa intermedia antes del cromado y niquelado.	Piezas mecánicas, capa intermedia antes de cromar	Protección corrosión, decoración, industria automóvil.	Automóvil, tornillería mecánica, aparatos en atmósfera húmeda.	Joyería, espejos metálicos, aparatos químicos, industria alimenticia, contactos eléctricos, reflectores.	Joyería, electrónica reflectores.

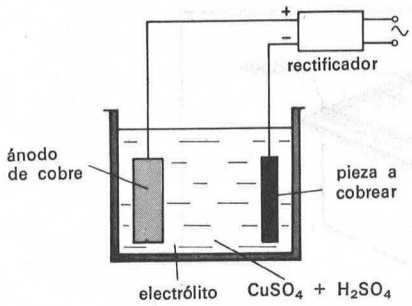


Fig. 21.6 Cobreado de una pieza

El proceso es sencillo: en el cobreado, el electrólito contiene una sal de cobre. Cuando pasa la corriente, el cobre se dirige al cátodo (o polo negativo), que está constituido por las piezas que deben cobrearse (fig. 21.6); de esta forma, estas piezas se recubren de cobre.

En el plateado, el baño contiene una sal de plata; el ánodo es una placa de plata pura, soluble; el cátodo constituye la pieza que hay que proteger.

Cuando las piezas salen de los baños, se secan y se pulimentan.

21.5 Circuitos especiales para baños electrolíticos

En primer lugar, se describe un equipo utilizado en instalaciones de cierta importancia, en el que la energía de corriente continua se genera por medio de una dínamo, que puede construirse para cualquier potencia y corriente (fig. 21.7). Generalmente, esta dínamo está movida por un motor eléctrico que se alimenta de la red industrial de corriente alterna.

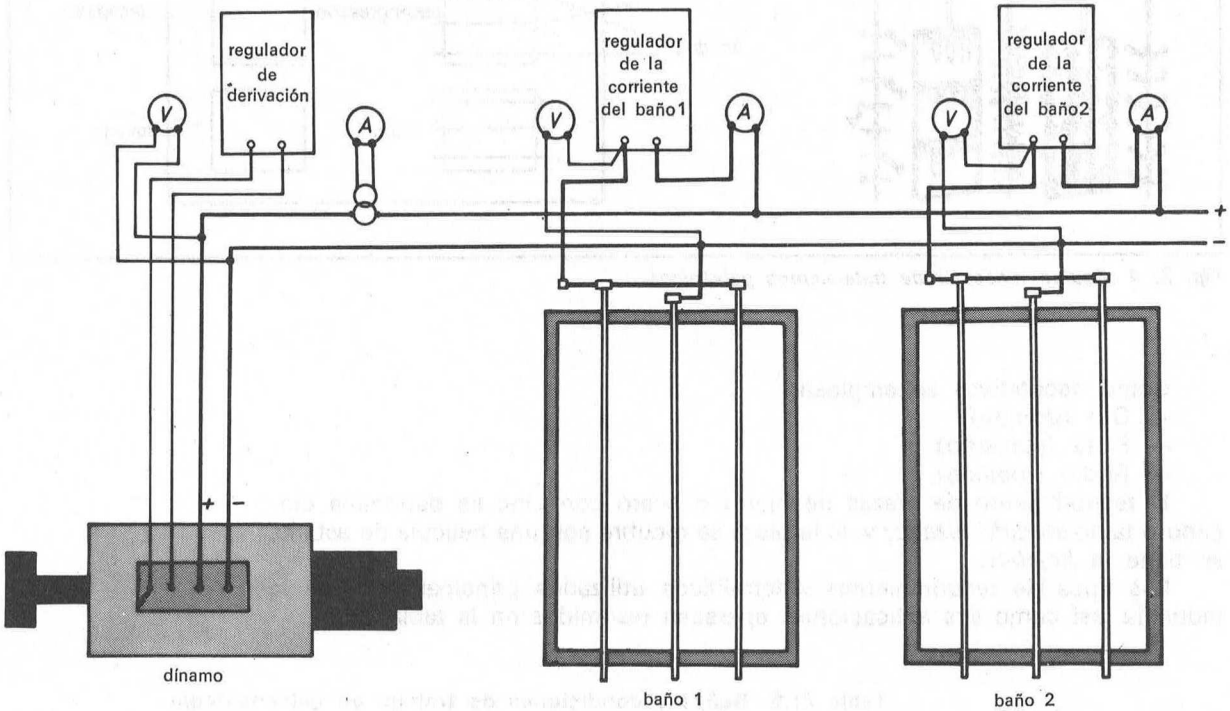


Fig. 21.7 Circuito para una instalación galvánica.

Estos generadores tienen un colector grande, debido a que tienen que suministrar corrientes elevadas de cientos de amperios con tensiones pequeñas de hasta 10 V.

Las dínamos empleadas para estos fines son siempre dínamos shunt; de esta forma, su tensión puede regularse fácilmente por medio de un reóstato.

En instalaciones de cierta importancia, generalmente es el mismo generador el que suministra corriente a varios baños simultáneamente. Mas como la tensión en cada baño dependerá del recubrimiento que se esté aplicando, esta tensión será diferente para cada uno de ellos, por lo que ha de colocarse un regulador de corriente para dar fácilmente la tensión deseada a cada uno (fig. 21.7).

Como tensión del generador se adoptará una que sea algo mayor que la más elevada de los baños que alimente. La tensión sobrante será absorbida por los reguladores de corriente.

Otro equipo más moderno, complejo y automático, para la alimentación de baños electrolíticos, a corriente variable, es el que se indica en la figura 21.8.

Este es un variador electrónico de tensión alterna normalizado V-3 000 de la casa Westinghouse, S. A., que se compone esencialmente de tres unidades de potencia, cada una de ellas constituida por un tiristor y un diodo en antiparalelo, que permiten variar la tensión eficaz de la red si se modifica, me-

diante un circuito de mando adecuado, el instante de encendido de los tiristores entre 0 y 180º eléctricos en cada una de las alternancias positiva y negativa. Igualmente, es posible modificar el ciclo de trabajo en la potencia transmitida a la carga, mediante el control del número de ciclos en que los tiristores conducen durante un determinado período de tiempo.

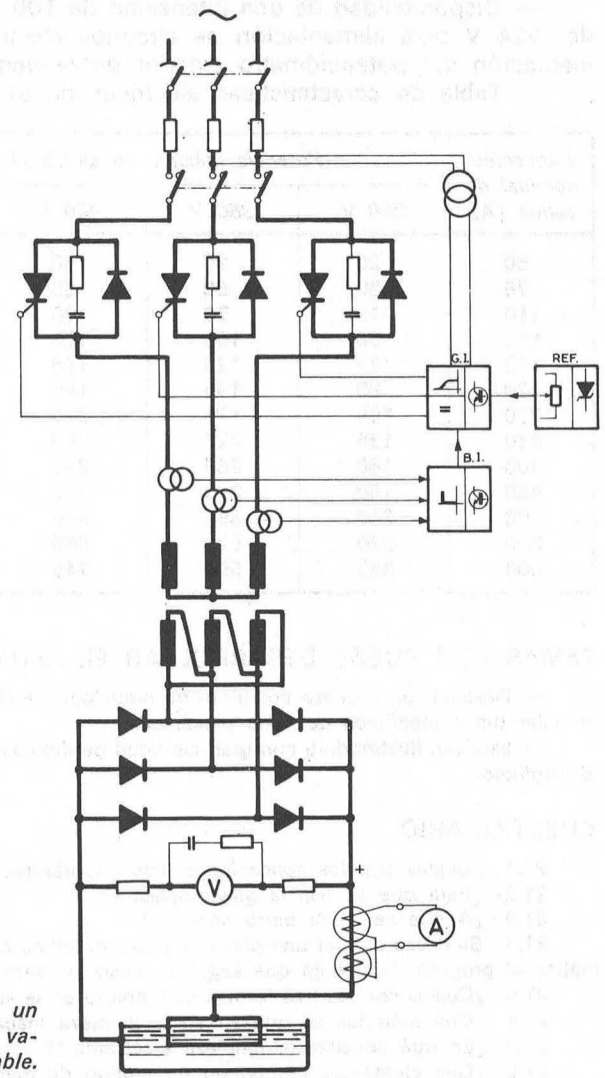


Fig. 21.8 Alimentación de un baño electrolítico a corriente variable.

La salida del variador puede conectarse a un transformador de relación adecuada para obtener una tensión de salida inferior; aplicada ésta a un puente rectificador, se obtiene una tensión variable en corriente continua.

Esencialmente, un variador de tensión alterna V-3 000 consta de:

— Un conjunto de módulos de potencia.
— Un circuito de regulación.
— Los circuitos de protección y secuencia necesarios.

En la figura 21.9 puede apreciarse una tensión de salida controlada por el método de *tiempo proporcional,* o *todo o nada;* en este caso, los tiristores conducen durante un determinado número par de semiciclos completos, en un intervalo de tiempo fijo. La potenci transmitida a la carga será función de la relación entre el número de ciclos durante el cual los tiristores conducen y el número de ciclos total comprendido en dicho período de tiempo fijo. Con este tipo de control se obtiene un buen factor de potencia.

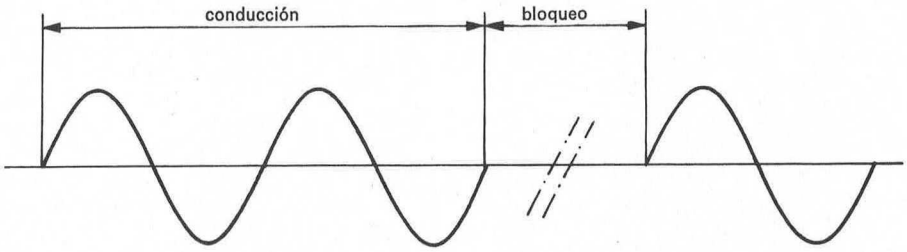


Fig. 21.9 Tensión de salida controlada.

Las características eléctricas del equipo son:

— Tensiones nominales: 230 ó 460 V 60 Hz; y 380 ó 550 V 50 Hz.

— Tolerancia en la tensión nominal: +10 %, −5 %.

— Frecuencia: 60 ± 2 Hz y 50 ± 2 Hz.

— Temperatura ambiente: 0 °C a 40 °C.

— Disponibilidad de una intensidad de 100 mA en las fuentes reguladoras de ±24 V para alimentación de circuitos electrónicos opcionales y para alimentación del potenciómetro exterior de referencia.

— Tabla de características eléctricas de utilización normalizadas:

Intensidad nominal de salida (A)	*Potencia máxima de salida (kVA)*				*Refrigeración*
	230 V	*380 V*	*460 V*	*575 V*	
50	20	30	40	50	Natural
75	30	50	55	75	Natural
110	45	70	90	110	Natural
150	60	100	125	150	Natural
190	75	125	155	190	Natural
220	90	145	180	220	Forzada
270	105	175	225	270	Natural
340	135	225	280	340	Natural o forzada
400	160	260	330	400	Forzada
450	180	300	375	450	Forzada
600	240	395	500	600	Forzada
800	320	525	665	800	Forzada
900	355	590	745	900	Forzada

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Describir un proceso completo de niquelado de alguna de las piezas que realizan en el taller tus compañeros de rama mecánica.

— Explicar, ilustrándolo con gran cantidad de dibujos y esquemas, la obtención del cobre electrolítico.

CUESTIONARIO

21.1 ¿Cuáles son las aplicaciones más importantes de la electrólisis?

21.2 ¿Para qué se usa la galvanoplastia?

21.3 ¿A qué se llama barro anódico?

21.4 Se desea cromar una pieza de acero obtenida en el taller. Explicar de forma esquemática el proceso de trabajo que seguirías hasta obtener el cromado.

21.5 ¿Cuáles son las tres formas de limpieza de la superficie a galvanizar de una pieza?

21.6 ¿Qué métodos se utilizan en la limpieza mecánica?

21.7 ¿En qué consiste la limpieza electrolítica?

21.8 ¿Qué elementos componen un equipo de galvanostegia?

21.9 Expresar si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

a) Un galvanizado es el recubrimiento de una pieza con cinc.

b) Para separar el cobre depositado en los cátodos, en un refinado electrolítico, aquéllos se recubren de grafito.

c) El óxido de una pieza se elimina con el desengrasado.

d) En un equipo de galvanostegia se requieren cuatro cubas.

21.10 La intensidad de corriente que debe pasar por el baño, ¿de qué depende?; ¿de qué fórmula se obtiene?

21.11 ¿Cómo se obtiene la hojalata?

BIBLIOGRAFIA

CASAS SABATA J. M.ª, *Tecnología Química 1.1,* Ediciones Don Bosco, Barcelona 1976.

Escuela del Técnico Electricista, tomo VIII, Labor, Barcelona.

NEY J., *Lecciones de Electricidad,* Marcombo, Barcelona 1969.

Catálogo de Equipos y sistemas electrónicos, de la firma Westinghouse, S. A.

Apéndice

Tabla Ap. 1 Densidades, temperaturas y regímenes de carga

Acumuladores de plomo	*Régimen de descarga (horas)*	*Densidad del electrólito al fin de la carga*	*Temperatura durante la descarga*	*Descenso de la densidad (unidades de la tercera decimal)*	*Régimen de carga (en amperios) (ver nota 3, al final de la tabla)*	*Tensión máxima en carga (voltios)*
Placas Planté.	10	1,210 ó 25 °Bé a 15 °C	15 °C	30 a 60	Principio: 14 % de C_{10} Fin: 7 % de C_{10}	2,30 2,75
Placas de rosetones.	10	1,210 ó 25 °Bé a 15 °C	15 °C	30 a 60	Principio: 14 % de C_{10} Fin: 7 % de C_{10}	2,30 2,65
Alumbrado y acondicionamiento aire de los trenes.	10	1,210 ó 25 °Bé 1,250 ó 28,8 °Bé a 15 °C	15 °C	80 ó 130	10 % de C_{10}	2,65
Baterías de arranque (coches de turismo).	20	1,280 ó 31,5 °Bé a 21 °C	21 °C	170	7 % de C_{20}	2,65
Baterías arranque (vehículos comerciales).	10	1,280 ó 31,5 °Bé a 21 °C	21 °C	170	8 % de C_{10}	2,65
Baterías de arranque (motores Diesel).	5	1,280 ó 31,5 °Bé a 21 °C	21 °C	140	Principio: 20 % de C_5 Fin: 6,66 % de C_5	2,40 2,65
Baterías estaciones radio (de placas delgadas o de placas múltiples).	20	1,250 ó 28,8 °Bé a 21 °C	21 °C	140	7 a 8 % de C_{20}	2,65
Baterías de estaciones radio (de placas gruesas o de placas a masa).	1 000	1,250 ó 28,8 °Bé a 21 °C	21 °C	140	3 % de C_{1000}	2,65
Baterías de aviación.	20	1,280 ó 31,5 °Bé a 15 °C	21 °C	170	7 % de C_{20}	2,65
Baterías de tracción.	5	1,280 ó 31,5 °Bé a 15 °C	27 °C	140	Principio: 20 % de C_5 [1] Fin: 6,66 % de C_5	2,40 2,65
Baterías para la marina (placas acorazadas).	10	1,280 ó 31,5 °Bé a 15 °C	27 °C	170	Principio: 20 % de C_5 Fin: 6,66 % de C_5	2,40 2,65
Acumuladores alcalinos						
Cadmio-níquel (débil resistencia).	5	1,210 ó 25 °Bé	15 °C	—	20 % de C_5	1,68
Cadmio-níquel (resistencia normal).	5	1,210 ó 25 °Bé	15 °C	—	20 % de C_5	1,70
Hierro-níquel.	5	1,210 ó 25 °Bé	15 °C	—	20 % de C_5	1,82

[1] Las baterías de tracción de capacidad muy elevada pueden tener regímenes de carga inferiores a los indicados en esta tabla.

Notas

1.ª Las variaciones de densidad en el curso de la descarga, que figuran en la tabla, son dadas sólo a título indicativo, pues varían con las características de construcción de los elementos. Son los correspondientes valores medios determinados en el curso de una descarga completa al régimen nominal indicado en la primera columna de la tabla.

2.ª Las densidades dadas en la tabla sólo son válidas para los países de clima templado. En los países cálidos se utilizan generalmente electrólitos de una concentración más débil en ácido.

3.ª Los regímenes de carga están expresados en función de la capacidad en amperios-hora al régimen de descarga nominal. Así la indicación 7 % de C_{20} indica que el régimen de carga en *amperios* debe ser igual al 7 % de la capacidad nominal al régimen de descarga en 20 horas, expresada en amperios-hora. El régimen de carga, así obtenido, se redondea generalmente al número entero más próximo cuando el valor encontrado es superior a 10 amperios.

4.ª Las tensiones máximas indicadas en la última columna son las que se observan con un elemento nuevo, cargado a la temperatura normal, al régimen indicado.