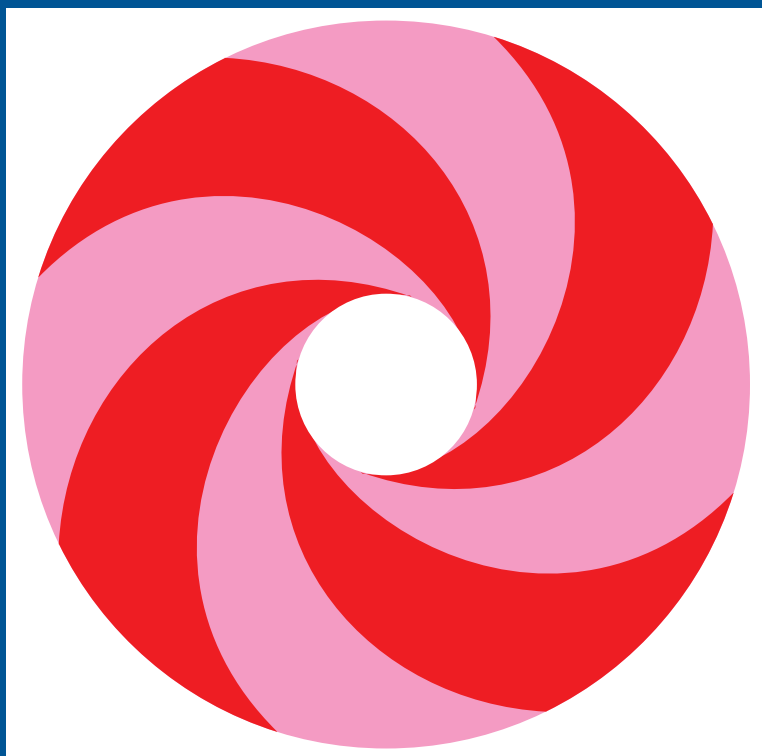


M. CORTES CHERTA
CURSO MODERNO DE
MAQUINAS ELECTRICAS
ROTATIVAS

TOMO IV

MAQUINAS SINCRONAS
Y MOTORES C. A. DE COLECTOR



editores técnicos asociados, s. a.
Barcelona

MANUEL CORTES CHERTA

**Dr. Ingeniero Industrial
Catedrático de la Escuela Técnica Superior
de Ingenieros Industriales de Barcelona**

**CURSO MODERNO
DE MAQUINAS ELECTRICAS
ROTATIVAS**

TOMO IV

**MAQUINAS SINCRONAS Y MOTORES C. A.
DE COLECTOR**



editores técnicos asociados, s. a.

Edición en español

Copyright © Editores Técnicos Asociados, S. A., 1994

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 1994

ISBN 978-84-7146-089-9

Edición e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2013

ISBN 978-84-291-9217-9

Producción distribución exclusiva:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

e-mail: reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

PROLOGO

Con el estudio de las máquinas síncronas y de los motores de corriente alterna de colector completamos la segunda sección de nuestra obra, según la división que de la misma se expuso en el prólogo del tomo I.

De todos los convertidores electromecánicos de energía es la máquina síncrona la más importante, la máquina reina, como decimos a nuestros alumnos, no solamente porque la casi totalidad de la energía eléctrica que se consume procede de este tipo de máquina sino porque es también la que mayores potencias unitarias ha alcanzado.

Siguiendo el mismo plan expositivo y analítico que utilizamos en el estudio de las máquinas de corriente continua y asíncrona (tomos II y III), se inicia éste con la constitución de la máquina en sus dos formas constructivas clásicas: la de rotor de polos salientes, propia de los alternadores hidráulicos y la de rotor cilíndrico universalmente usada para los alternadores de alta velocidad accionados por turbinas de vapor, más bien conocidos por turboalternadores.

A continuación, apoyándonos en los conocimientos fundamentales y de aplicación general que se estudiaron en el primer tomo, se justifican los principios fundamentales de la máquina síncrona como generador y como motor y se amplían aspectos constructivos de mayor interés.

En el capítulo II se exponen los funcionamientos en vacío y en carga, planteándose desde un punto de vista más bien físico que matemático, el importante fenómeno de la reacción de inducido en la máquina síncrona.

En base a esta visión física de los fenómenos funcionales de la máquina, en el siguiente capítulo se vuelve a considerar, haciendo uso de técnicas analíticas y gráficas, el tema de la reacción de inducido en sus dos variantes: reacción única y doble reacción. Dada la remarcable influencia que este estudio tiene en el proyecto y en el funcionamiento en servicio de la máquina síncrona, no dudamos en recomendar vivamente a nuestros lectores dediquen a este capítulo su mayor atención.

El problema de la regulación de tensión se presenta en el capítulo IV. La regulación constituye una cualidad muy importante en la utilización de una máquina síncrona como generador, tanto si lo hace aisladamente como si trabaja en paralelo con otras máquinas.

Los tres capítulos siguientes tratan de los problemas funcionales de la máquina síncrona como componente de un sistema eléctrico de potencia. Estimamos huelga todo comentario sobre ellos por cuanto su índice es ya suficientemente explícito.

Sí, en cambio, es obligado justificar los capítulos VIII y IX que vienen a continuación.

Al presentar este «Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas» dijimos que limitar, hoy día, el estudio de las máquinas eléctricas al régimen permanente era dejar éste inacabado, que se hace necesario completarlo con el de los regímenes transitorios, señalando que el tratamiento de estos regímenes para todas las máquinas sería objeto de la tercera sección de nuestra obra.

Esta demora en abordar el régimen transitorio mantenida en la máquina de corriente continua y en la asíncrona, en la máquina síncrona no puede sostenerse de una manera absoluta.

El papel de «vedette» que juega la máquina síncrona dentro de un sistema eléctrico de potencia hace que no pueda omitirse en un tratado sobre la misma, aun cuando sea en régimen permanente el estudio del cortocircuito y de las oscilaciones pendulares.

Estos fenómenos de carácter transitorio, son tan importantes en esta máquina que es perfectamente normal y correcto exponerlos aquí, si quiera sea en sus aspectos físicos y sin rigorismos matemáticos.

En el capítulo VIII se estudia el cortocircuito en sus diversas formas y en el capítulo IX las oscilaciones pendulares, ambos vistos bajo un prisma, repetimos, más bien práctico que teórico.

El capítulo X está dedicado a la conmutatriz, máquina que participa del carácter de síncrona en su funcionamiento como convertidor de energía eléctrica continua en energía eléctrica alterna o viceversa.

Si bien en la actualidad se puede afirmar que la conmutatriz ha dejado de construirse para fines industriales, hemos considerado que, por tratarse de un convertidor electromecánico casi universal y por el carácter docente de nuestra obra, no debíamos dejarla en olvido, tanto más cuanto su estudio aporta conocimientos muy formativos que justifican por sí mismos su estudio. Y con los motores de corriente alterna de colector, que dan cuerpo al capítulo XI, se cierra la segunda sección de esta obra.

Estos motores, que, en su versión trifásica, hace unos años alcanzaron cierta difusión en la industria, hoy día sólo siguen teniendo vigencia en su versión monofásica, en particular el motor serie compensado y el

motor universal, que son los que ocupan la mayor parte de este último capítulo.

Al final de cada uno de los capítulos se presentan una serie de problemas, algunos con su solución completa, otros con los resultados y los menos con el solo enunciado, que a nuestro juicio constituyen el mejor medio de comprobar por uno mismo si se han captado y asimilado bien los temas estudiados, a la vez que enfrentan al lector con la realidad de las aplicaciones industriales y le familiarizan con los valores prácticos de las magnitudes que maneja.

Y terminamos expresando un ruego y un reconocimiento. El ruego es que conscientes de que se habrá deslizado en el texto más de un error y de que alguna exposición no sea muy clara sepan disculparnos y si a bien lo tienen se nos haga partícipes de tales faltas. Por adelantado nuestra sincera gratitud.

Y el reconocimiento es a todos mis alumnos por sus sugerencias y críticas sobre los tomos ya publicados y su estímulo para que no demore la totalidad de la obra.

EL AUTOR

INDICE DE MATERIAS

Prólogo	1
CAPÍTULO PRIMERO. — Generalidades	1
1.1. Constitución y clasificación de las máquinas síncronas	1
1.2. Principio de funcionamiento como generador y como motor	4
1.3. El sistema inductor y su excitación	11
1.4. Devanados de inducido	18
1.5. Refrigeración de las grandes unidades	20
1.6. Máquina síncrona homopolar	23
Problemas	26
CAPÍTULO II. — Funcionamiento en vacío y en carga del generador síncrono	31
2.1. Onda de f.m.m. de excitación	31
2.2. Fuerza electromotriz inducida	35
2.3. Funcionamiento en vacío y características de vacío	37
2.4. Fenómeno de reacción de inducido en el funcionamiento en carga	40
2.5. Flujos útil y de dispersión. Reactancia de dispersión	41
2.6. Reacción de inducido de la máquina síncrona polifásica	45
2.7. Reacción de inducido de la máquina síncrona monofásica	52
2.8. Influencia y efectos de la saturación	55
Problemas	58
CAPÍTULO III. — Diagramas vectoriales, curvas características y parámetros singulares	61
3.1. Diagrama en el espacio de la máquina de rotor cilíndrico con carga equilibrada	61
3.2. Diagrama vectorial y circuito equivalente de la máquina síncrona de rotor cilíndrico, no saturada	66
3.3. Diagrama vectorial de la máquina saturada	71
3.4. Diagrama vectorial de la máquina síncrona de polos salientes	74
3.5. Característica en cortocircuito	79
3.6. Triángulo de Potier	82
3.7. Característica reactiva	84
3.8. Reactancia síncrona no saturada y saturada	88
3.9. Relación de cortocircuito	93
Problemas	95

CAPÍTULO IV. — Métodos para la predeterminación de la regulación de tensión de un alternador	103
4.1. Regulación de un alternador	103
4.2. Métodos antiguos de Behn-Eschenburg y A.I.E.E.	105
4.3. Métodos de Potier y A.S.A.	110
4.4. Método de Blondel para máquinas de polos salientes	115
4.5. Determinación de las reactancias síncronas longitudinal y transversal	121
Problemas	129
CAPÍTULO V. — Características de servicio del generador síncrono	147
5.1. Potencias activa y reactiva de la máquina síncrona	147
5.2. Característica «potencia-ángulo de par»	157
5.3. Característica exterior	159
5.4. Característica de regulación	160
5.5. Autoexcitación de un alternador	163
Problemas	170
CAPÍTULO VI. — Funcionamiento en paralelo de las máquinas síncronas	179
6.1. Introducción	179
6.2. Maniobra de acoplamiento. Sincronización	180
6.3. Estabilidad estática del funcionamiento en paralelo	186
6.4. La máquina síncrona acoplada a una red de potencia infinita	192
6.5. Análisis del funcionamiento como generador y como motor	193
6.6. Diagrama circular de corrientes a excitación constante y potencia variable	200
6.7. Diagrama de potencias	205
6.8. Reparto de las potencias activa y reactiva entre alternadores acoplados en paralelo sobre una red de potencia infinita	210
Problemas	220
CAPÍTULO VII. — Arranque y características de servicio de los motores síncronos	231
7.1. Métodos de arranque del motor síncrono	231
7.2. Motor asíncrono-sincronizado	236
7.3. El motor síncrono como compensador de fase	238
7.4. Par y potencia del motor síncrono	241
7.5. Características de la máquina síncrona como motor. Curvas en V de Mordey	243
7.6. Aplicaciones del motor síncrono	246
7.7. Motores de reluctancia y de histéresis	247
Problemas	253
CAPÍTULO VIII. — Cortocircuito de la máquina síncrona	265
8.1. Cortocircuito permanente simétrico	265
8.2. Cortocircuitos permanentes asimétricos	270
8.3. Cortocircuito fase-neutro	273
8.4. Cortocircuito entre dos fases	275
8.5. Cortocircuitos dos fases y neutro	276

8.6.	Medida de las reactancias directa, inversa y homopolar	277
8.7.	Cortocircuito brusco de un alternador funcionando en vacío	280
8.8.	Reactancias subtransitoria y transitoria	288
8.9.	Cortocircuito brusco de la máquina síncrona en carga	293
8.10.	Cortocircuito brusco trifásico en máquinas de polos salientes	296
8.11.	Cortocircuito brusco asimétrico	298
8.12.	Constantes de tiempo que intervienen en el cortocircuito brusco	301
	Problemas	307
CAPÍTULO IX. — Oscilaciones pendulares de las máquinas síncronas		317
9.1.	Generalidades	317
9.2.	Pares que intervienen en el proceso oscilante	319
9.3.	Oscilaciones libres de pequeña amplitud	322
9.4.	Constante de aceleración e inercia específica	327
9.5.	Oscilaciones pendulares forzadas	330
9.6.	Oscilaciones de gran amplitud	336
	Problemas	344
CAPÍTULO X. — La conmutatriz		349
10.1.	Constitución y particularidades funcionales	349
10.2.	Relaciones de transformación de las tensiones y de las corrientes	353
10.3.	Relación de las potencias como conmutatriz y como generador de corriente continua	358
10.4.	Reacción de inducido y conmutación	365
10.5.	Puesta en marcha y regulación de la tensión continua	367
	Problemas	374
CAPÍTULO XI. — Motores de corriente alterna con colector		377
11.1.	Motores monofásicos de colector	377
11.2.	F.e.ms. inducidas y par motor	379
11.3.	Motor monofásico serie compensado	387
11.4.	Diagramas vectoriales, conmutación y características	390
11.5.	El motor universal	400
11.6.	Motor de repulsión	402
11.7.	Motores polifásicos de colector	407
	Problemas	414
	Índice alfabético	419

INDICE DE FIGURAS

Fig.	Pág.
1.01 Máquina síncrona trifásica de polos salientes. Circuito magnético . . .	3
1.02 Máquina síncrona de rotor cilíndrico. Circuito magnético	4
1.03 Génesis de la máquina síncrona elemental	5
1.04 Máquina síncrona elemental trifásica	6
1.05 Sistema trifásico simétrico directo, de f.e.ms.	7
1.06 Variación de la reluctancia del circuito magnético del campo excitado por el inducido (f.m.m. \mathcal{F}_i)	10
1.07 Composición de las f.m.ms. y par motor en la máquina síncrona	11
1.08 Variación del entrehierro en la máquina síncrona de polos salientes	12
1.09 Devanado amortiguador tipo jaula de ardilla	13
1.10 Bobinas inductoras de la máquina síncrona de polos salientes	15
1.11 Rotores de máquinas síncronas de alta velocidad	15
1.12 Excitación de una máquina síncrona generatriz de gran potencia	16
1.13 Excitación «sin escobillas» de un generador síncrono	17
1.14. Autoexcitación de un generador síncrono	17
1.15 Limitación del efecto de concentración de corriente por subdivisión del conductor	19
1.16 Transposición de los conductores estatóricos dentro de las ranuras	20
1.17 Tres tipos de ranuras rotóricas de alternador refrigerados por hidrógeno	21
1.18 Tres tipos de ranuras estatóricas de alternadores de 250 a 600 MW, con refrigeración por agua o por hidrógeno. El fluido refrigerante circula por el interior de la funda aislante de ranura	22
1.19 Representación esquemática del circuito de refrigeración por agua de los arrollamientos estatóricos	22
1.20 Oscilación del flujo en un alternador homopolar	23
1.21 Alternador homopolar	25
2.01 Onda de f.m.m. del inductor en máquinas de polos salientes	32
2.02 Onda de inducción en las máquinas de polos salientes y entrehierro polar constante	32
2.03 Onda de inducción con entrehierro variable	33
2.04 Onda de f.m.m. del inductor en máquinas síncronas de rotor cilíndrico. Número de ranuras por polo Q impar	34
2.05 Onda de f.m.m. del inductor en máquinas de rotor cilíndrico, cuando Q es par	35
2.06 Onda rectangular de inducción sustitutiva de la onda real	36
2.07 Esquema de conexiones para la-determinación experimental de la característica de vacío	38

Fig.		Pág.
2.08	Característica de vacío $E_o = f(\mathcal{F}_e)$ o $E_o = f(I_e)$	39
2.09	Característica de vacío en valores p.u.	39
2.10	Flujo inductor y dispersión del inductor	41
2.11	Flujo de dispersión del inducido, de ranura	42
2.12	Flujo de dispersión del inducido de cabezas de diente	43
2.13	Flujo de dispersión del inducido de cabezas de bobina	44
2.14	Máquina síncrona bipolar, trifásica, de 12 ranuras	46
2.15	Máquina síncrona trifásica con carga resistiva	47
2.16	Máquina síncrona con carga puramente inductiva	48
2.17	Máquina síncrona con carga puramente capacitiva	49
2.18	Máquina síncrona con carga inductiva	50
2.19	Composición vectorial de las f.m.ms. en las máquinas de rotor cilíndrico	51
2.20	Circuitos magnéticos en las máquinas de polos salientes y componentes de la f.m.m. de reacción de inducido, \mathcal{F}_i	51
2.21	Pulsación del flujo principal en la máquina síncrona monofásica	53
2.22	Pulsación de la corriente de excitación	54
2.23	Oscilogramas de la tensión U , de la corriente I y de la corriente I_e , de un alternador monofásico cuando $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$)	54
2.24	Máquina síncrona de polos salientes, con devanado amortiguador	55
2.25	Influencia de la saturación sobre el efecto de una f.m.m. \mathcal{F}_i , constante, sobre distintas f.m.ms. \mathcal{F}_o	56
2.26	Influencia de la saturación sobre el efecto de una f.m.m. \mathcal{F}_i , variable, sobre una f.m.m. \mathcal{F}_o constante	57
3.01	Composición de las f.m.ms. de una máquina síncrona	62
3.02	Diagrama de f.m.ms. en el espacio y flujo resultante en el entrehierro	65
3.03	Diagrama vectorial de tensiones	65
3.04	Diagrama vectorial de flujos, f.m.ms. y tensiones de la máquina síncrona, <i>no saturada</i> , de rotor cilíndrico	67
3.05	Esquema de la máquina síncrona, asimilando el efecto de la reacción de inducido al de una reactancia	68
3.06	Diagrama vectorial de tensiones de la máquina síncrona no saturada	69
3.07	Circuitos equivalentes de la máquina síncrona	70
3.08	Esquema vectorial simplificado de la máquina síncrona no saturada	71
3.09	Deducción de la corriente de excitación I_e , a partir de la característica lineal del entrehierro	71
3.10	Característica de vacío en su doble papel de característica: $E_o = f(\mathcal{F}_e)$, $E_r = f(\mathcal{F}_r)$	72
3.11	Diagrama de f.m.ms. para la determinación de E_o , en las máquinas síncronas saturadas	73
3.12	Diagrama vectorial de f.m.ms. y f.e.ms. de Potier	74
3.13	Descomposición de la f.m.m. \mathcal{F}_i , en sus componentes longitudinal y transversal	75
3.14	Onda de inducción longitudinal, B_d	76
3.15	Onda de inducción transversal, B_q	76
3.16	Ondas de inducción fundamentales de los flujos de reacción de inducido, longitudinal Φ_d y transversal Φ_q	77
3.17	Diagrama vectorial de f.m.ms., flujos y f.e.ms. de las máquinas síncronas de polos salientes	78
3.18	Diagrama de tensiones de la máquina síncrona de polos salientes. (Diagrama de Blondel)	79

Fig.		Pág.
3.19	Característica en cortocircuito y esquema de conexiones para su determinación	80
3.20	Esquema equivalente de la máquina síncrona en cortocircuito permanente	81
3.21	Diagrama vectorial de f.m.ms. y tensiones de la máquina síncrona en cortocircuito	82
3.22	Determinación gráfica de la f.m.m. \mathcal{F}_i a partir de las características de vacío y de cortocircuito. Triángulo de Potier	82
3.23	Característica reactiva de la máquina síncrona	84
3.24	Diagrama vectorial de f.m.ms. y de tensiones de la máquina síncrona con carga permanente reactiva	85
3.25	Determinación gráfica de la característica reactiva a partir de la de vacío y del triángulo de Potier	86
3.26	Determinación experimental de la característica reactiva	86
3.27	Determinación gráfica del triángulo de Potier a partir de las características de vacío y reactiva	87
3.28	Deducción de las reactancias síncronas no saturada y saturada	89
3.29	Reactancias síncronas en valores p.u.	90
3.30	Deducción gráfica del factor de saturación	91
4.01	Determinación gráfica de la f.e.m. E_o , según el diagrama de Behn-Eschenburg	107
4.02	Determinación gráfica de la tensión en bornes U	107
4.03	Lugar geométrico del afijo de la tensión en bornes al variar: a) el ángulo φ ; b) la carga I	109
4.04	Determinación de la impedancia síncrona por el método A.I.E.E.	110
4.05	Predeterminación de la regulación de una máquina síncrona por el método de Potier	111
4.06	Variante del diagrama vectorial de f.m.ms. y tensiones de Potier	112
4.07	Realización práctica del diagrama de Potier	113
4.08	Predeterminación de la regulación de una máquina síncrona por el método A.S.A.	114
4.09	Diagrama vectorial de tensiones de Blondel de la máquina síncrona de polos salientes	116
4.10	Diagrama vectorial de tensiones de Doherty y Nickel de la máquina síncrona de polos salientes	118
4.11	Método gráfico para la determinación del ángulo Ψ y la predeterminación de la regulación en las máquinas síncronas de polos salientes	119
4.12	Diagrama de Doherty y Nickel en valores p.u.	120
4.13	Determinación gráfica de la reactancia longitudinal en p.u.	123
4.14	Variación de la reluctancia del circuito magnético de reacción de inducido en las máquinas de polos salientes	124
4.15	Determinación experimental de las reactancias X_d y X_q	125
4.16	Oscilograma de tensiones y de la corriente de inducido en el ensayo de deslizamiento	125
4.17	Diagrama de Blondel aplicado a un motor síncrono	127
5.01	Diagrama vectorial de tensiones de la máquina síncrona de Behn-Eschenburg	148
5.02	Variación de la potencia de una máquina síncrona, conectada a una red de potencia constante, en función del ángulo de par, θ	151
5.03	Desplazamiento angular en carga del sistema inductor respecto al campo del inducido en las máquinas síncronas	153

Fig.		Pág.
5.04	Variación del ángulo de par al incrementarse el par resistente, M_r	153
5.05	Diagrama de Doherty y Nickel con $R = 0$	155
5.06	Característica $P = f(\theta)$, en la máquina síncrona de polos salientes	158
5.07	Características exteriores del generador síncrono, con distintos $\cos \varphi$	159
5.08	Diagrama vectorial del generador síncrono con carga puramente resistiva ($\cos \varphi = 1$)	159
5.09	Diagrama vectorial de tensiones de la máquina síncrona de rotor cilíndrico con carga capacitiva. I_d e I_q componentes de la corriente I según el eje directo y según el eje transversal	160
5.10	Características de regulación del generador síncrono, con distintos $\cos \varphi$: $I_c = f(I)$; $\cos \varphi = \text{cte.}$	161
5.11	Características de regulación del generador síncrono: $I = f(I_c)$, $\cos \varphi = \text{cte.}$	162
5.12	Curvas en V de Mordey: $I_c = f(I)$, $P = \text{cte.}$	163
5.13	Autoexcitación de una máquina síncrona	164
5.14	Diagrama de Behn-Eschenburg con carga capacitiva	164
5.15	Características exteriores de la máquina síncrona capacitiva y de un condensador	166
5.16	Diagrama vectorial de la máquina síncrona con carga muy capacitiva	167
5.17	Curvas de variación de la potencia P en función de U^2	169
6.01	Esquema de conexiones y diagrama de tensiones de la red y de la máquina síncrona	181
6.02	Oscilaciones de la tensión resultante «red-máquina síncrona», cuando las frecuencias no son iguales	182
6.03	Esquema de conexiones del acoplamiento en paralelo	182
6.04	Esquema de conexiones del acoplamiento en paralelo por sincronoscopio de lámparas	184
6.05	Esquema de conexiones de una columna de sincronización	184
6.06	Esquema unipolar de dos máquinas síncronas que funcionan en paralelo y circuito equivalente	187
6.07	Diagrama de tensiones al ser $E_{o1} > E_{o2}$, admitiendo $R = 0$	187
6.08	Diagrama de tensiones cuando $E_{o1} > E_{o2}$, $R \neq 0$	188
6.09	Diagrama de tensiones al incrementarse el par motor de un alternador, siendo $E_{o1} = E_{o2}$	189
6.10	Diagrama vectorial de tensiones de dos alternadores acoplados en paralelo, cuando $E_{o1} \neq E_{o2}$	191
6.11	Diagrama simple de tensiones de la máquina síncrona como generador	193
6.12	Diagrama de tensiones del generador síncrono subexcitado	195
6.13	Lugar geométrico del afijo del vector E_o , al variar la excitación y mantener la potencia constante	196
6.14	Diagrama vectorial de la máquina síncrona sobreexcitada en vacío $E_o > U$. Ángulo de par $\theta = 0$	197
6.15	Diagrama vectorial de tensiones de la máquina síncrona como motor sobreexcitado. Convenio G	198
6.16	Diagrama vectorial de tensiones de la máquina síncrona con motor sobre y subexcitado. Convenio M	199
6.17	Lugar geométrico del afijo del vector E_o , al variar la potencia y mantener la excitación constante	201
6.18	Diagrama circular de corriente de la máquina síncrona como generador	203

Fig.		Pág.
6.19	Diagrama del círculo de la máquina síncrona como motor. Convenio G	204
6.20	Diagrama circular del motor síncrono. Convenio M	204
6.21	Diagrama de potencias activa y reactiva de la máquina síncrona como generador	206
6.22	Diagrama de tensiones reducidas de la máquina síncrona de polos salientes	208
6.23	Diagrama de corrientes de la máquina síncrona de polos salientes	209
6.24	Diagrama de potencias de la máquina síncrona de polos salientes	210
6.25	Esquema simple de la acción del regulador centrífugo	211
6.26	Característica $\Omega = f(P)$ de un regulador de velocidad	212
6.27	Banda de insensibilidad de la característica $N = f(P)$ de un regulador centrífugo	213
6.28	Familia de características $N = f(P)$ al variar el tarado del resorte, la posición de los contrapesos o la posición del punto de articulación de la transmisión de un regulador centrífugo	214
6.29	Determinación gráfica del reparto de potencias entre alternadores acoplados	215
6.30	Reparto de la potencia activa entre dos alternadores acoplados en paralelo	216
6.31	Esquema de conexiones de una máquina síncrona con excitatriz principal y auxiliar y regulador de tensión	217
6.32	Característica externa $U = f(I)$, de un alternador $I_e = \text{cte.}$ y $\cos \varphi = \text{cte.}$	217
6.33	Determinación gráfica del reparto de las potencias reactivas entre dos alternadores acoplados, a partir de sus características externas con carga puramente reactiva	218
7.01	Arranque por motor auxiliar de corriente continua	232
7.02	Arranque por mediación de la dinamo de excitación	233
7.03	Arranque por motor auxiliar de inducción	233
7.04	Arranque como motor asíncrono, con autotransformador	235
7.05	Motor asíncrono-sincronizado	236
7.06	Esquema del devanado rotórico del motor asíncrono-sincronizado con la tercera fase en c.c. al funcionar como síncrono	237
7.07	Diagrama vectorial de tensiones del motor asíncrono en vacío sobreexcitado	239
7.08	Determinación gráfica de la componente reactiva que debe compensar el condensador síncrono	240
7.09	Determinación de la máxima corriente reactiva que puede absorber de la red un condensador síncrono	241
7.10	Características a tensión constante del motor síncrono, $I = f(I_e)$ y $\cos \varphi = \text{cte.}$	244
7.11	Características a tensión constante y potencia motriz constante (curvas V) del motor síncrono $I = f(I_e)$, $P = \text{cte.}$, $P = \text{potencia nominal}$	246
7.12	Motor autosíncrono o de reluctancia	248
7.13	Característica par-deslizamiento $M = f(S)$ del motor de reluctancia	249
7.14	Motor de histéresis; decalado en el espacio de las ondas fundamentales de f.m.m. resultante \mathcal{F}_r y flujo estatórico Φ	251
7.15	Característica mecánica $M = f(n)$ del motor de histéresis	251
8.01	Tipos fundamentales de cortocircuitos	265

Fig.		Pág.
8.02	Determinación gráfica de la corriente de cortocircuito permanente I_{ccp} , a partir de la característica en vacío en p.u.	269
8.03	Circuitos componentes de un sistema trifásico desequilibrado	272
8.04	Cortocircuito fase-neutro: $I_a = I_{ccN}$, $I_b = 0$, $I_c = 0$, $U_a = 0$	273
8.05	Esquema de conexiones para determinación de Z_o	274
8.06	Cortocircuito entre dos fases: $I_b = -I_c$, $I_a = 0$, $U_b = U_c$	275
8.07	Cortocircuito entre dos fases y neutro: $I_a = 0$, $U_b = U_c = 0$	276
8.08	Esquema de conexiones para la determinación de Z_2	277
8.09	Método experimental directo para la determinación de X_o	278
8.10	Esquema de conexiones para hallar X_o	279
8.11	Cortocircuito brusco de un alternador	281
8.12	Transitorio de cierre de un circuito $R-L$, cuando la tensión aplicada es senoidal	282
8.13	Corriente de cortocircuito brusco cuando en el instante de cierre la tensión senoidal aplicada pasa por cero	283
8.14	Componente alternativa transitoria de la corriente de cortocircuito brusco	284
8.15	Oscilograma de un cortocircuito brusco trifásico	286
8.16	Componente alterna simétrica, igual en las tres fases	286
8.17	Determinación de las corrientes subtransitoria y transitoria a partir del oscilograma de la corriente simétrica de cortocircuito brusco	287
8.18	Ensayo de cortocircuito inverso	291
8.19	Oscilación de la componente alterna en el ensayo de cortocircuito trifásico brusco, con tensión de vacío reducida	291
8.20	Curvas representativas de la relación entre el factor k_i y las reactancias subtransitorias, o transitorias, en p.u.	294
8.21	Aplicación del teorema de Thevenin en la determinación de la corriente alternativa de cortocircuito brusco en una máquina síncrona en carga	296
8.22	Cortocircuito brusco asimétrico	299
8.23	Oscilogramas de la corriente del inducido y de excitación en el cortocircuito brusco monofásico	300
8.24	Determinación de las constantes de tiempo subtransitoria T''_d y transitoria T'_d , a partir del oscilograma de la corriente eficaz simétrica de cortocircuito brusco	303
9.01	Curvas características en régimen permanente	323
9.02	Variación del desvío angular al producirse una perturbación	323
9.03	Variación del par electromagnético al incrementarse el ángulo de desvío en θ	324
9.04	Diagrama de pares motores M_m , de un motor Diesel de 4 cilindros, 4 tiempos, sin desigualdades cíclicas	331
9.05	Oscilación de la velocidad angular instantánea alrededor de la velocidad angular sincrónica Ω_1	332
9.06	Característica: $P = f(\theta)$	337
9.07	Oscilaciones del momento electromagnético M_e , del desvío angular θ , y de la velocidad angular Ω , al aumentar bruscamente el par motor de M_{m1} a M_{m2}	338
9.08	Método gráfico de la igualdad de áreas, $S_1 = S_2$ para determinar la estabilidad del sistema	341
9.09	Ejemplo de sistema inestable, al ser $S_1 > S_2$	342

Fig.		Pág.
9.10	Límite de estabilidad dinámico. Area S_2 , comprendida entre $\pi - \theta_1$ y θ_2 , igual área S_1	342
10.01	Representación esquemática de un grupo convertidor «Máquina síncrona de inductor fijo-Máquina de corriente continua»	350
10.02	Representación esquemática de una «conmutatriz»	351
10.03	Dibujo simplista de una conmutatriz	352
10.04	Esquema del inducido en anillo de la conmutatriz	359
10.05	Corrientes alterna i'_a , continua i'_c y corriente resultante i' en la espira media, $\gamma = 0$ de una fase del inducido de una conmutatriz	360
10.06	Corriente alterna i'_a , continua i'_c y corriente resultante i' , en la espira situada en el ángulo γ , de una fase del inducido de la conmutatriz	361
10.07	Representación esquemática de una conmutatriz exafásica y diagrama vectorial de tensiones	365
10.08	Esquema de conexiones de una conmutatriz cuya puesta en marcha se realiza por el lado de alterna como motor síncrono	369
10.09	Esquema de conexiones de una conmutatriz trifásica con inductancia de regulación	371
10.10	Diagramas vectoriales de tensiones y corrientes con inductancia de regulación	372
11.01	Chapas magnéticas estatóricas de motor monofásico serie	378
11.02	Chapas magnéticas estatóricas de motores de pequeña potencia universales	378
11.03	Onda senoidal de inducción alrededor del entrehierro	379
11.04	Devanado inducido uniformemente distribuido bajo la acción de un campo alternativo senoidal; $E_{rt} =$ F.e.m. de transformación	380
11.05	Devanado inducido uniformemente distribuido girando en un campo de distribución senoidal; $E_{rt} =$ F.e.m. de rotación	383
11.06	F.e.m.s. de transformación en un instante, en los diversos conductores del inducido	383
11.07	Curva del par electromagnético alrededor del entrehierro	385
11.08	Representación esquemática del motor serie monofásico	388
11.09	Esquema de conexiones del motor serie compensado	389
11.10	Chapa estatórica del motor serie con hendidura radial para aumentar la reluctancia del campo transversal	390
11.11	Espiras en cortocircuito en función de devanado de compensación	390
11.12	Esquema de conexiones del motor serie, no compensado	391
11.13	Diagrama vectorial del motor serie, no compensado	392
11.14	Esquema de conexiones del motor serie compensado con indicación del sentido de la corriente en un instante dado	392
11.15	Motor serie compensado con un solo devanado en el estator	393
11.16	Diagrama vectorial del motor serie compensado	393
11.17	Composición vectorial de las f.e.m.s. de transformación e_t , de reactancia e_x y de conmutación e_c inducidos en las bobinas en conmutación	396
11.18	«Shunt» resistivo con la bobina de conmutación y diagrama vectorial de corrientes	397
11.19	Mejora de la conmutación mediante resistencias adicionales entre delgas y bobinas del devanado	398
11.20	Características mecánicas $n = f(M)$ del motor serie monofásico a tensión constante	399

Fig.		Pág.
11.21	Característica de par $M = f(I)$ del motor serie monofásico a tensión constante	399
11.22	Esquema de conexiones fundamental del motor serie compensado alimentado por un transformador de tomas, utilizado en los servicios de tracción eléctrica	400
11.23	Características mecánicas del motor universal con corriente continua y corriente alterna	401
11.24	Motor universal regulado en velocidad por un «Triac»	402
11.25	Esquema de conexiones elemental del motor de repulsión	403
11.26	Motor de repulsión, tipo Thomson	404
11.27	Motor de repulsión Thomson en posición de trabajo	404
11.28	Curva de par (M) del motor de repulsión en función del ángulo de desplazamiento de las escobillas (α)	405
11.29	Curvas características del motor de repulsión	406
11.30	Característica mecánica $M = f(m)$ del motor de repulsión-inducción	407
11.31	Característica mecánica $M = f(n)$ del motor de repulsión-inducción, con un devanado adicional en jaula de ardilla	407
11.32	Diagramas vectoriales del motor de inducción y del motor polifásico de colector	409
11.33	Esquemas de conexiones de los motores polifásicos de colector	410
11.34	Características mecánicas, $M = f(n)$, en valores p.u., del motor serie trifásico de colector con distintos ángulos de decalado de las escobillas	412
11.35	Características mecánicas, $M = f(n)$ del motor derivación trifásico de colector	413

INDICE DE SIMBOLOS

a	pares de circuitos derivados operador.
A	capa de corriente por unidad de desarrollo del entrehierro.
B_a	inducción del entrehierro.
\hat{B}_a	inducción máxima.
C	capacidad.
C_r	capacidad de resonancia.
e_o	f.e.m. inducida en vacío, en p. u.
E_o	f.e.m. inducida en vacío, valor eficaz.
\hat{E}_o	f.e.m. inducida en vacío, valor máximo.
E_{oc}	f.e.m. compuesta.
E_{oc}	f.e.m. medida sobre la característica lineal del entrehierro.
E_r	f.e.m. resultante.
E_{rc}	f.e.m. resultante medida sobre la característica lineal.
E_{rt}	f.e.m. total de rotación.
E_{tt}	f.e.m. total de transformación.
E_r	f.e.m. interna.
E_{id}	f.e.m. interna inducida por el flujo del inducido longitudinal.
E_{iq}	f.e.m. interna inducida por el flujo del inducido transversal.
E_σ	f.e.m. de autoinducción o de reactancia de dispersión.
E_σ	f.e.m. de reactancia de dispersión.
f_f	frecuencia de oscilación forzada.
f_p	frecuencia propia de oscilación.
f_r	frecuencia de rotación.
f_s	desvío de frecuencia.
f_i	frecuencia.
\mathcal{F}_d	f.m.m. de reacción de inducido longitudinal.
\mathcal{F}_c	f.m.m. de excitación.
\mathcal{F}_e	f.m.m. del inductor.
$\hat{\mathcal{F}}_{c1}$	amplitud de la onda fundamental de f.m.m. de excitación.
\mathcal{F}_i	f.m.m. de reacción de inducido.
\mathcal{F}_q	f.m.m. de reacción de inducido transversal.
\mathcal{F}_r	f.m.m. resultante.

g_i	relación del ancho polar ideal al paso polar.
h	orden de un armónico.
H	inercia específica.
i_{ccp}	corriente de cortocircuito en tanto por uno.
I	corriente.
I	corriente.
I_a	corriente activa.
I_B	corriente de base.
I_d	componente longitudinal de la corriente.
I'_d	corriente transitoria.
I''_d	corriente subtransitoria.
I_{eo}	corriente de excitación en vacío.
I_e	corriente de excitación en carga.
I_e	corriente inductora.
I'_i e I'_r	corrientes de reacción de inducido y resultante, referidas al inductor.
I_n	corriente nominal.
I_q	componente transversal de la corriente.
I_r	componente reactiva de la corriente.
I_{ch}	corriente de impulso o de choque.
I_{cc}	corriente de excitación en cortocircuito.
I_{ccP}	corriente de cortocircuito entre dos fases.
I_{ccN}	corriente de cortocircuito fase-neutro.
I_{ccp}	corriente de cortocircuito permanente.
I_{cc2N}	corriente de cortocircuito dos fases y neutro.
I_{it}	corriente de excitación o magnetizante.
J	momento de inercia.
k	factor de saturación.
k	número de dientes o de ranuras.
k_e	relación de tensiones.
k_i	relación de corriente.
k_p	relación de pérdidas por efecto Joule.
K_s	par sincronizante específico.
L	longitud axial del entrehierro.
\mathcal{L}_s	inductancia síncrona.
\mathcal{L}_{ss}	inductancia síncrona saturada.
\mathcal{L}_σ	inductancia total de dispersión.
m	número de fases.
M	par.
M_a	par de amortiguación.
\hat{M}_a	par asíncrono máximo.
M_e	par electromagnético.
M_i	par electromagnético interno.
M_j	par de inercia.
M_i	par total.
M_{11}	par electromagnético fundamental.
M_{1r}	par de reluctancia.
M_m	par mecánico.

M_{med}	par medio.
M_n	par nominal.
M_s	par sincronizante.
M_t	par total.
M_2	par útil o de salida.
n	revoluciones por minuto.
n_1	revoluciones por minuto.
N	número de espiras por bobina.
N'	conductores activos.
N_e	número de espiras de excitación por polo.
N_f	espiras por fase del devanado.
N'_r	conductores por ranura.
N_s	número de espiras en serie por fase.
p	número de pares de polos.
P	potencia.
P	potencia activa.
\hat{P}	potencia máxima.
P_1	potencia absorbida.
P_2	potencia de salida.
P_i	potencia eléctrica interna.
P_f	potencia activa por fase.
P_{max}	potencia máxima.
P_s	potencia sincronizante.
q	ranuras por polo y fase.
Q	número de ranuras por polo.
Q	potencia reactiva.
Q_f	potencia reactiva por fase.
R	resistencia efectiva por fase del devanado inducido.
R_c	resistencia de carga.
\mathcal{R}_d	reluctancia del circuito magnético longitudinal.
\mathcal{R}_a	reluctancia del circuito magnético transversal.
\mathcal{R}_i	reluctancia.
\hat{S}	potencia aparente compleja.
S_n	potencia aparente nominal.
T	constante de tiempo. Tiempo de conmutación.
T_n	constante de aceleración.
T'_d	constante de tiempo transitoria.
T''_d	constante de tiempo subtransitoria.
T'_{do}	constante de tiempo a circuito abierto.
T_f	período de las oscilaciones forzadas.
T_i	constante de tiempo del inducido en cortocircuito.
T_o	período de oscilación.
T_p	período propio de oscilación.
u	tensión en bornes, en tanto por uno.
\mathbf{U}	tensión en bornes.
$\check{\mathbf{U}}$	vector complejo conjugado de \mathbf{U} .
U_B	tensión de base.

U_m	tensión aplicada al motor = tensión de la red.
U_n	tensión en bornes nominal.
U_o	tensión de vacío.
U	tensión en bornes en carga.
X_d	reactancia síncrona longitudinal, en valor por unidad.
X_q	reactancia síncrona transversal, por unidad.
x_c	reactancia síncrona no saturada, en valor p. u.
x_s	reactancia síncrona saturada, en tanto por uno.
X_σ	reactancia de dispersión, en tanto por uno.
X_B	reactancia base.
X_c	reactancia de carga.
X_d	reactancia síncrona longitudinal no saturada.
X'_d	reactancia transitoria longitudinal.
X''_d	reactancia subtransitoria longitudinal.
X_{ds}	reactancia síncrona longitudinal saturada.
X_i	reactancia de reacción de inducido.
X_{id} y X_{iq}	reactancias de reacción de inducido longitudinal y transversal.
X_{is}	reactancia de reacción de inducido saturada.
X_o	reactancia síncrona homopolar.
X_{po}	reactancia de Potier.
X_q	reactancia síncrona transversal.
X'_q	reactancia transitoria transversal.
X''_q	reactancia subtransitoria transversal.
X_s	reactancia síncrona no saturada.
X_{ss}	reactancia síncrona saturada.
X_{sB}	reactancia síncrona de Behn-Eschenburg.
X_1	reactancia síncrona directa.
X_2	reactancia síncrona inversa.
X_σ	reactancia de dispersión.
Z_c	impedancia de carga.
Z_o	impedancia homopolar.
Z_s	impedancia síncrona no saturada.
Z_{ss}	impedancia síncrona saturada.
α	ángulo.
α_r	ángulo correspondiente al paso de ranura.
β	ángulo.
γ_{cc}	relación de cortocircuito.
γ_t	ángulo eléctrico abarcado por una fase.
δ	entrehierro.
δ	coeficiente de regulación o desvío de regulación.
Δf	desvío relativo de frecuencia.
ϵ	coeficiente de irregularidad.
ϵ_r	regulación.
ϵ_s	estatismo de un regulador.
θ	ángulo.
θ	ángulo de carga.
μ_o	permeabilidad magnética del vacío.
ξ_b	factor de bobinado.

ξ_d	factor de distribución.
ξ_{de}	factor de distribución o de zona del inductor.
ξ_p	factor de paso.
σ_1	coeficiente de dispersión total del inductor.
τ_p	paso polar.
ν	relación.
ϕ	defasado de la tensión en bornes respecto de la corriente.
Φ	flujo útil o principal.
Φ_e	flujo total del inductor.
Φ_o	flujo de un polo en vacío.
Φ_σ	flujo total de dispersión del inducido.
Φ_o	flujo en vacío, campo magnético.
Ψ	ángulo de defasado.
Ψ	flujo total concatenado.
ω	pulsación. Velocidad angular en rad. eléc.
ω_1	pulsación fundamental de una magnitud alterna.
Ω	velocidad angular en rad. mec.
Ω_1	velocidad angular sincrónica en rad. mec.

CAPITULO PRIMERO

GENERALIDADES

1.1. Constitución y clasificación de las máquinas síncronas

Por máquinas síncronas se entienden los convertidores electromecánicos rotativos que, girando a una velocidad constante proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico, transforman la energía mecánica en energía eléctrica, bajo la forma de corrientes alternas, o viceversa, la energía eléctrica de corrientes alternas en energía mecánica.

Señalábamos en el primer tomo (epígs. 1.8 y 1.9) que todas las máquinas eléctricas rotativas responden a una constitución muy parecida, diferenciándose más bien por la naturaleza de la corriente eléctrica generada o utilizada y por su excitación.

A tenor de ello, la máquina síncrona, como la máquina de corriente continua y la de inducción, consta de un devanado inducido y un devanado inductor concatenados por un campo magnético, caracterizándose por tener el devanado inducido en el estator, alojado en ranuras practicadas en la superficie cilíndrica interna del paquete magnético y el devanado inductor, alimentado por corriente continua, en el rotor. En máquinas de reducida potencia, hasta unos 5 kVA, la situación de los devanados es inversa: Inducido en el rotor e inductor en el estator, como en las máquinas de corriente continua.

Al ser la corriente de excitación continua, la velocidad de giro de esta máquina sólo puede ser la *sincrónica*, Ω_1 , impuesta por la pulsación de las corrientes alternas del estator y por el número de pares de polos.

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2 \pi f_1}{p} \quad (\text{rad./seg.}) \quad (1.01)$$

y en revoluciones por minuto:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (\text{r.p.m.}) \quad (1.02)$$

y de aquí la designación de *máquina síncrona*.

Como las demás máquinas rotativas, las máquinas síncronas son reversibles, pudiendo funcionar indistintamente como generadores, monofásicos o polifásicos, de corriente alterna (*alternador*), o como motores de corriente alterna (*motor síncrono*). Es más, sin solución de continuidad un alternador puede pasar a funcionar como motor síncrono, e inversamente, un motor síncrono a alternador; la única diferencia está en el sentido de la conversión de energía. A tenor de esta particularidad, la potencia y el par pasan a tener un signo algébrico.

Como alternador, la máquina síncrona constituye el generador más importante de energía eléctrica. Más del 90 % de la energía eléctrica actualmente se produce en este tipo de máquina.

La frecuencia de la corriente alterna generada por un alternador es la correspondiente a la velocidad síncronica:

$$f_1 = p \frac{n_1}{60} \quad (\text{Hz})$$

lo cual nos dice que para obtener la frecuencia de 50 Hz, normalizada en todos los países de Europa, la velocidad tendrá que ser:

$$n_1 = \frac{3.000}{p} \quad (\text{r.p.m.})$$

si $p = 1$	$n_1 = 3.000$	$p = 5$	$n_1 = 600$
$p = 2$	$n_1 = 1.500$		
$p = 3$	$n_1 = 1.000$		
$p = 4$	$n_1 = 750$	$p = 24$	$n_1 = 125$

Resumiendo, la máquina síncrona es un convertidor electromecánico rotativo de corriente alterna, excitado por corriente continua, o por imanes permanentes en máquinas muy pequeñas, cuyo funcionamiento impone una relación rígida entre la frecuencia de la corriente del inducido, la velocidad de rotación y el número de polos.

Según el número de fases del devanado inducido, las máquinas síncronas pueden clasificarse en:

- monofásicas y
- polifásicas (generalmente trifásicas).

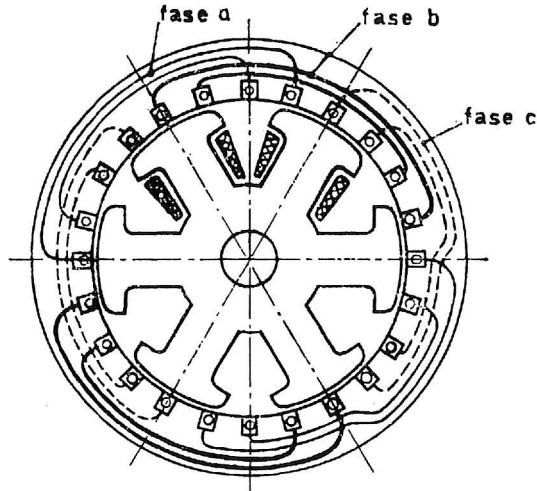


Fig. 1.01 Máquina síncrona trifásica de polos salientes. Circuito magnético.

Por la forma constructiva del sistema inductor las máquinas síncronas cabe clasificarlas en:

- *máquinas de rotor de polos salientes*, disposición constructiva propia de máquinas de baja y media velocidad, hasta 1.000 r.p.m. en las potencias mayores (fig. 1.01) y
- *máquinas de rotor cilíndrico*, exclusivamente empleado en máquinas de alta velocidad y elevada potencia (fig. 1.02).

Cuando actúan como generadores, la primera ejecución es conocida por *alternador hidráulico* y la segunda, acoplada directamente a turbinas de vapor, como *turbo alternador*.

Finalmente, según el tipo de su sistema inductor se clasifican en:

- *Máquinas heteropolares*, en las cuales las bobinas del inducido son concatenadas por flujos alternativamente de sentidos contrarios (polaridades Norte y Sur).
- *Máquinas homopolares*, en las que las bobinas concatenan siempre un flujo del mismo sentido, cuya magnitud fluctúa entre un máximo y un mínimo que puede llegar a ser nulo, pero nunca de sentido opuesto.

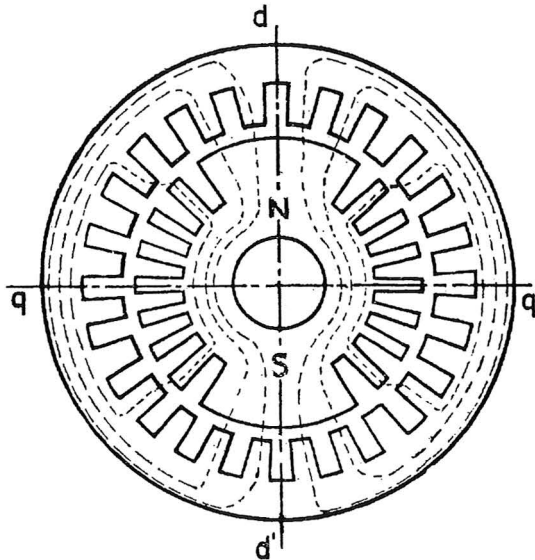


Fig. 1.02 Máquina síncrona de rotor cilíndrico. Circuito magnético.

La primera ejecución es la normal en las máquinas industriales de baja frecuencia (25-50-60 Hz), en tanto que la segunda es una ejecución especial utilizada en alternadores de frecuencias medias (de 400 a 10.000 Hz).

La excitación de la máquina síncrona requiere una fuente de corriente continua independiente, por lo general un generador rotativo acoplado al propio eje de la máquina síncrona, llamado *excitatriz*.

Modernamente, merced a la gran capacidad de trabajo y fiabilidad de los rectificadores secos, se ha introducido la excitación estática de los alternadores, a base de rectificadores de Si.

1.2. Principio de funcionamiento como generador y como motor

a) *Generador (alternador)*

La máquina síncrona, por su constitución, puede definirse simplemente como un convertidor electromecánico de excitación múltiple.

Su principio funcional, en consecuencia, se deduce de los conocidos fenómenos de inducción y de par electromagnético en los sistemas de excitación múltiple, que estudiamos en el epígrafe 4.12 del tomo I.

De la máquina bipolar elemental se pasa a la máquina síncrona elemental monofásica de inductor móvil, excitando el devanado del rotor

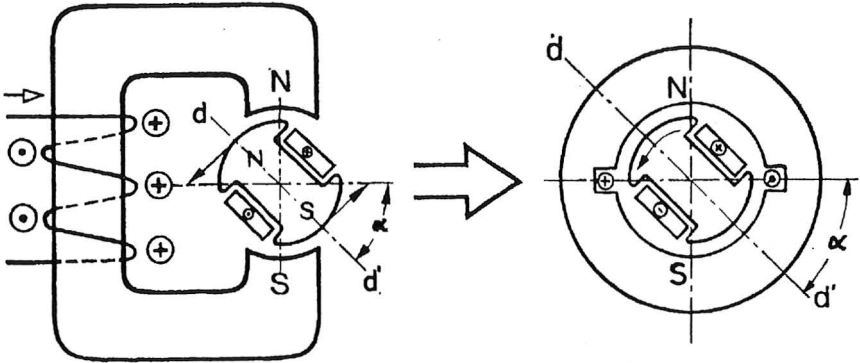


Fig. 1.03 Génesis de la máquina síncrona elemental.

con corriente continua y reemplazando el circuito magnético estático de herradura por una corona magnética con dos ranuras longitudinales diametralmente opuestas en su interior, en las que se aloja una bobina simple de N espiras (fig. 1.03).

El devanado rotórico, alimentado por corriente continua, dará lugar a una f.m.m., \mathcal{F}_e , la cual excitará un campo magnético, Φ_0 , cuya curva de inducción a lo largo del entrehierro admitiremos, en principio, de variación senoidal. Si la intensidad de la corriente de excitación se mantiene constante en el tiempo y por la bobina del estator no circula corriente alguna, es evidente que el campo será, también, constante en el tiempo, como lo será, asimismo, en tanto el rotor esté en reposo, el flujo concatenado con la bobina del estator. En estas condiciones no ha lugar a fenómeno alguno de inducción ni a la manifestación de pares electromagnéticos en dicha bobina.

Pero si mediante un par exterior, hacemos girar el rotor con velocidad angular constante, Ω_1 , el flujo total concatenado con la bobina del estator, Ψ , será una función periódica del ángulo α , que forma el eje de la bobina con el eje polar o eje directo del inductor. Si como origen de tiempos se considera el instante en que el eje de la bobina coincide con el eje directo dd' del rotor, se tiene:

$$\Psi = N \Phi_0 \cos \alpha = N \Phi_0 \cos \Omega_1 t \quad (1.03)$$

Como consecuencia de esta variación en el tiempo del flujo concatenado se inducirá en la bobina una f.e.m. igual a:

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Psi}{dt} = -N \Phi_0 \Omega_1 \sin \Omega_1 t = -\hat{E}_o \sin \Omega_1 t = \\ &= \hat{E}_o \cos \left(\Omega_1 t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (1.04)$$

es decir, tendremos en bornes de la bobina una tensión alterna senoidal defasada de $\frac{\pi}{2}$, en retraso, respecto al flujo concatenado, cuya frecuencia será:

$$f_1 = \frac{\Omega_1}{2\pi} \quad (\text{Hz})$$

f.e.m. que aplicada a un circuito externo nos determinará la circulación de una corriente también alterna. Estaremos, pues, en presencia de un alternador monofásico bipolar.

Si en vez de una sola bobina estatórica se disponen sobre la superficie interna de la corona del estator tres bobinas simples idénticas, aa' - bb' - cc' , de paso diametral, cuyos ejes estén desplazados entre sí $\frac{2\pi}{3}$ radianes (*fig. 1.04*) los flujos concatenados por estas bobinas serán, respectivamente, al cabo del tiempo t contado a partir del instante en que el eje de la bobina aa' coincide con el eje directo:

$$\Psi_a = N \Phi_o \cos \Omega_1 t$$

$$\Psi_b = N \Phi_o \cos \left(\Omega_1 t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\Psi_c = N \Phi_o \cos \left(\Omega_1 t - 2 \frac{2\pi}{3} \right)$$

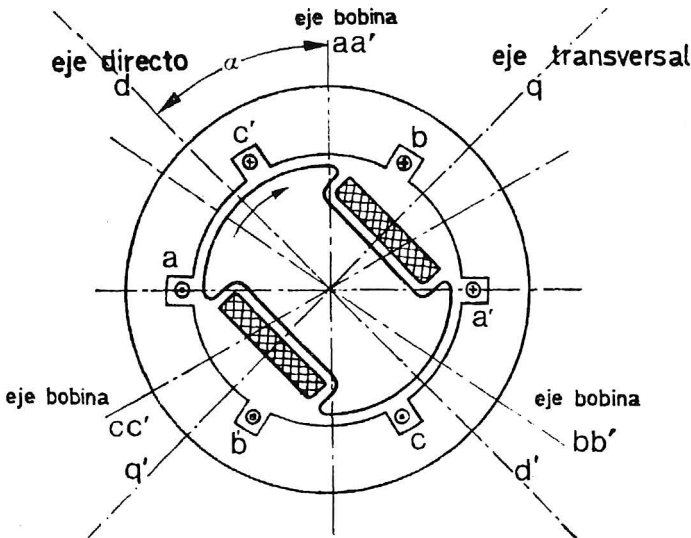


Fig. 1.04 Máquina síncrona elemental trifásica.

determinando la inducción en las respectivas bobinas de las f.e.ms. siguientes:

$$e_a = -\hat{E}_o \operatorname{sen} \Omega_1 t = \hat{E}_o \cos \left(\Omega_1 t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_b = -\hat{E}_o \operatorname{sen} \left(\Omega_1 t - \frac{2\pi}{3} \right) = \hat{E}_o \cos \left(\Omega_1 t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_c = -\hat{E}_o \operatorname{sen} \left(\Omega_1 t - 2 \frac{2\pi}{3} \right) = \hat{E}_o \cos \left(\Omega_1 t - 2 \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} \right)$$

las cuales constituyen un sistema trifásico equilibrado.

Numerando los extremos de entrada de las bobinas en el mismo orden en que son vistos por un observador que gira con el eje polar, las tres f.e.ms. inducidas formarán un sistema simétrico directo (fig. 1.05).

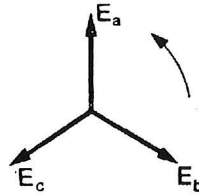


Fig. 1.05 Sistema trifásico simétrico directo, de f.e.ms.

Si ahora conectamos estas bobinas, en estrella o en triángulo, habremos constituido un alternador trifásico de un par de polos. Señalemos de paso que en estas máquinas la conexión en estrella es la más frecuentemente utilizada.

Si el devanado del estator está distribuido en q ranuras por polo y fase, la expresión del valor eficaz de la f.e.m. inducida en cada fase, según vimos en el primer tomo (epíg. 5.13), es:

$$E_o = 4,44 \xi_b f_1 N_s \Phi_o \quad (\text{V}) \quad (1.05)$$

siendo:

Φ_o el flujo de un polo en Wb;

ξ_b el factor de bobinado;

f_1 la frecuencia de rotación correspondiente a la velocidad angular:

$$f_1 = \frac{\Omega_1}{2\pi} = \frac{n_1}{60}$$

y N_s el número de espiras en serie por fase.

Si el sistema inductor consta de p pares de polos y a su vez el devanado trifásico del estator se organiza para este mismo número de pares de polos (desplazamiento en el espacio de los ejes de bobinas de $\frac{120}{p}$ grados geométricos, equivalentes a 120° eléctricos) seguiremos obteniendo un sistema trifásico de tensiones.

La frecuencia f_1 , en el alternador multipolar será:

$$f_1 = p \frac{\Omega_1}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{p n_1}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (1.06)$$

La conexión del devanado inducido a un circuito de carga trifásico equilibrado originará la circulación, por cada una de las fases, de una corriente que en conjunto formará, también, un sistema trifásico equilibrado, o sistema directo. Este sistema de corrientes trifásico determinará en el entrehierro del alternador una onda de f.m.m. giratoria en el mismo sentido e idéntica velocidad angular que el rotor. Recuérdese a este propósito que la velocidad angular de la de onda f.m.m. viene dada por:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (\text{r.p.m.})$$

Al girar la onda de f.m.m. del inducido a la misma velocidad que la onda de f.m.m. excitada por el inductor se podrán combinar, y su resultante determinará el flujo giratorio de la máquina en carga Φ_r , en general distinto del que se tenía en vacío, Φ_o , cuando sólo actuaba la excitación del inductor. Recordemos que este efecto de los amperivoltios del inducido sobre el flujo del entrehierro constituye el fenómeno conocido como *reacción de inducido*.

A parte de este fenómeno, complejo e importante del que trataremos más adelante, ocurre que entre el campo magnético inductor y las corrientes que circulan por los devanados del inducido se origina un par electromagnético. Admitiendo que tanto la onda de flujo del rotor Φ_o , producido por la f.m.m. del inductor \mathcal{F}_e , como la onda de f.m.m. del inducido \mathcal{F}_i son senoidales y defasadas en el espacio el ángulo θ_{oi} , dado en grados eléctricos, el mencionado par tiene por expresión, según [5.115] Tomo I:

$$M = -\frac{\pi}{2} p^2 \Phi_o \mathcal{F}_i \text{ sen } \theta_{oi} \quad (\text{N.m.}) \quad (1.07)$$

o

$$M = -\frac{\pi}{2} p^2 \Phi_o \mathcal{F}_r \text{ sen } \theta_{or} \quad (\text{N.m.}) \quad (1.08)$$

siendo \mathcal{F}_r la f.m.m. resultante máxima en el entrehierro y θ_{or} el ángulo en el espacio, expresado en grados eléctricos, que forman los ejes del campo inductor y la f.m.m. resultante \mathcal{F}_r , según determinamos en el primer tomo, epígrafe 5.17.

El ángulo θ_{or} se considera positivo cuando la onda de Φ_0 está decaída en avance, según el sentido de giro, respecto a la onda de \mathcal{F}_r .

La acción de este par, conforme a ley de Lenz, será la de oponerse al movimiento del rotor, es decir, en un generador será un *par resistente*; de aquí el signo algebraico menos que afecta a esta fórmula.

Y de conformidad, también, con el principio general de conservación de energía a mayor potencia eléctrica generada, mayor deberá ser la aportación de potencia mecánica al sistema a través del eje del rotor.

b) *Motor síncrono*

El principio de funcionamiento de la máquina síncrona como motor es, asimismo, fácilmente deducible de la teoría general de convertidor electromecánico elemental.

Al conectar el devanado trifásico del estator a una red exterior de alimentación, las corrientes trifásicas que circularán por las bobinas del estator, darán origen a una onda de f.m.m. giratoria, \mathcal{F}_i , de velocidad angular, en radianes eléctricos por segundo, $\omega_1 = 2\pi f_1$, determinante a su vez de un campo giratorio de igual velocidad. La magnitud de este campo deberá ser tal que determine la inducción en cada una de las fases del estator de una f.e.m. igual y opuesta (en primera aproximación, despreciando la resistencia y reactancia de dispersión del devanado estático) a la tensión alterna de fase de la red. Si ésta, como sucede de ordinario, tiene un valor eficaz constante, tanto el valor eficaz de la f.e.m. alterna inducida como el valor del flujo giratorio serán, también, constantes. La intensidad de las corrientes que el estator tomará de la red será la que exija la excitación de este flujo, a lo largo del circuito magnético del estator y rotor, excitación que en el caso de que el rotor de la máquina sea de polos salientes, variará periódicamente entre dos límites; el valor mínimo corresponderá a la coincidencia del eje del flujo giratorio con el eje directo o polar (reluctancia del circuito mínima), y el valor máximo con la perpendicularidad entre estos dos ejes (reluctancia máxima) (*figura 1.06 a y b*).

En tanto el rotor se halle en reposo, ningún par motor efectivo desarrollará la máquina, aun cuando el inductor esté excitado, pues la interacción entre la onda de f.m.m. giratoria del estator, \mathcal{F}_i , y la onda de f.m.m., \mathcal{F}_e , del inductor, determinan un par alternativamente variable, cuyo valor medio durante un período es nulo.

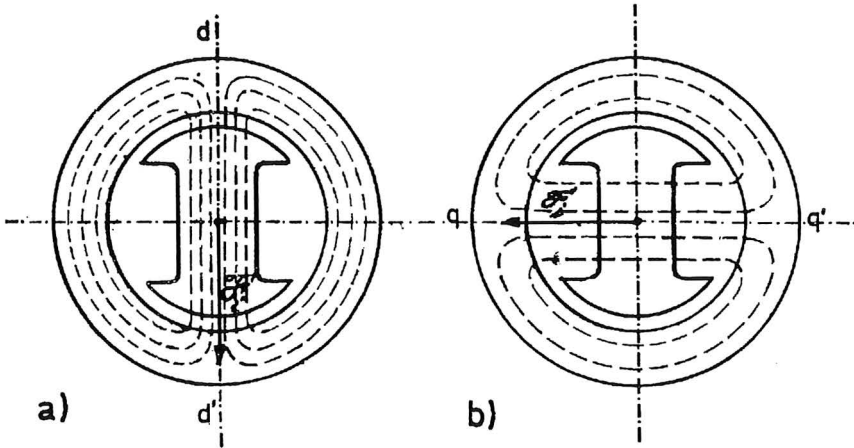


Fig. 1.06 Variación de la reluctancia del circuito magnético del campo excitado por el inducido (f.m.m. \mathcal{F}_i).

a) Reluctancia mínima, \mathcal{F}_i mínimo. b) Reluctancia máxima, \mathcal{F}_i máximo.

Pero, si mediante un motor auxiliar o por otros medios, como más tarde veremos, llevamos el rotor a la misma velocidad y en su mismo sentido que el campo giratorio, o sea, a la *velocidad síncrona*, $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}$, estas dos ondas de f.m.m., \mathcal{F}_i y \mathcal{F}_e , estacionarias entre sí, podrán combinarse y dar lugar a un par que tenderá a mantener al rotor a la velocidad de sincronismo (fig. 1.07).

La máquina síncrona actúa, ahora, como motor. La expresión del par motor, a base de considerar sólo las ondas senoidales fundamentales de la f.m.m. resultante, \mathcal{F}_r , y del flujo del rotor, Φ_o , según (1.08), será:

$$M = -\frac{\pi}{2} p^2 \Phi_o \mathcal{F}_r \sin(-\theta_{or}) = \frac{\pi}{2} p^2 \Phi_o \mathcal{F}_r \sin \theta_{or} \quad (1.09)$$

El signo del ángulo θ_{or} es ahora negativo y consiguientemente el par es positivo, *par motor*, porque en este funcionamiento la onda del flujo Φ_o excitado por la f.m.m. del inductor, está decaída en *retraso* respecto a la onda de f.m.m. resultante, \mathcal{F}_r , en tanto que en el funcionamiento como generador es al revés, la onda de Φ_o precede a la de \mathcal{F}_r .

Si como consecuencia de un incremento del par resistente aplicado al motor (par de carga) el ángulo θ_{or} excediera de los 90° eléctricos, el par motor, en razón del factor $\sin \theta_{or}$, en lugar de aumentar para igualarse al par resistente se reducirá, y como resultado de este desequi-

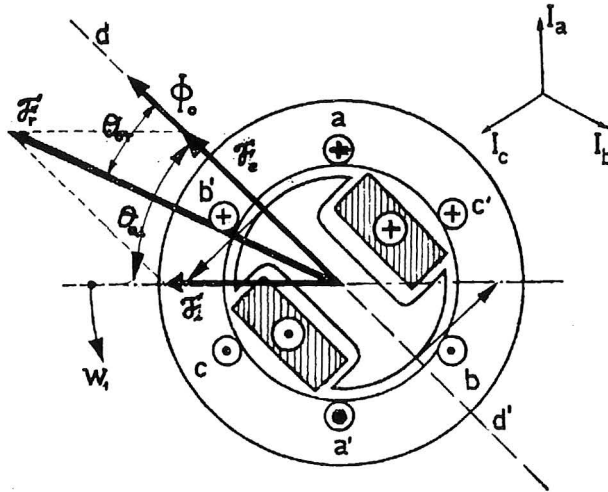


Fig. 1.07 Composición de las f.m.ms. y par motor en la máquina síncrona.

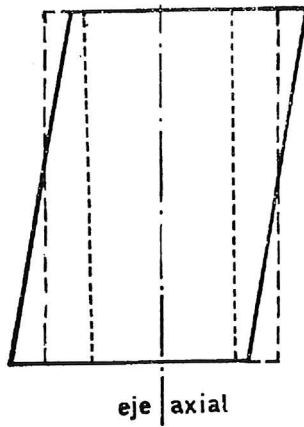
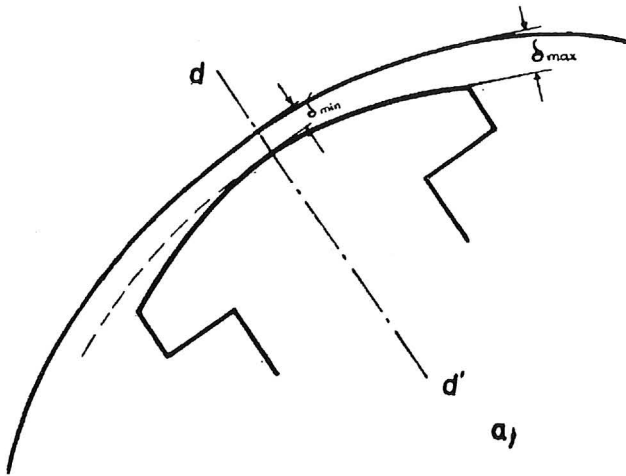
librio de pares, el motor pierde el sincronismo, el par motor se anula y el sistema «motor síncrono-carga» termina por pararse. El valor del par motor máximo corresponde al valor máximo de $\sin \theta_{or}$, o sea, a θ_{or} igual a 90° eléctricos, designándose esta posición como *límite de estabilidad estática del motor síncrono*.

En resumen, la máquina síncrona es perfectamente reversible, como las restantes máquinas eléctricas rotativas, pero, a diferencia de ellas, requiere que su velocidad sea constante y en su funcionamiento como motor plantea el problema de que no tiene par de arranque. Tal circunstancia determina el que en la construcción específica de esta máquina como motor se recurra a diversos expedientes, que en su momento examinaremos, para lograr su puesta en servicio sin recurrir a motores auxiliares que llevan previamente la velocidad del motor a la del sincronismo.

1.3. El sistema inductor y su excitación

Antes de entrar en un análisis más profundo de la máquina síncrona estimamos conveniente, dado el importante papel que juega en la conversión energética, ampliar los aspectos constructivos de mayor interés de la misma.

A este respecto veamos en primer lugar su sistema inductor entendiendo por tal el conjunto del circuito magnético rotórico y el devanado inductor.



b)

Fig. 1.08 Variación del entrehierro en la máquina síncrona de polos salientes:
 a) Por aumento radial. b) Por inclinación de las piezas polares.

El sistema inductor de la máquina síncrona de polos salientes es semejante al de la máquina de corriente continua, con la particularidad de que al estar localizado en el rotor, el arco polar es convexo y las masas de los polos convergen sobre un núcleo o corona central giratoria.

La fijación de los polos debe ser lo suficientemente sólida y resistente para equilibrar los efectos de las fuerzas centrífugas y de las fuerzas atractivas magnéticas a que están solicitados.

Los tipos de rotores de polos salientes son muy variados, según sus dimensiones, número de polos y velocidad de giro.

En el diseño de las expansiones polares es importante conseguir que la onda de inducción, a lo largo del entrehierro, sea lo más senoidal posible al objeto de reducir al mínimo el contenido y la amplitud de los armónicos de la f.e.m. inducida. A este propósito se recurre a dar al entrehierro un valor variable aumentándolo gradualmente desde el centro del polo hacia los extremos (*fig. 1.08 a*) o a inclinar las piezas polares respecto al eje (*fig. 1.08 b*).

Otra particularidad de los alternadores de polos salientes es que éstos, cuando son de planchas de acero empiladas, casi siempre están provistas del denominado *devanado amortiguador* constituido por barras de cobre, algunas veces de bronce, alojadas en ranuras circulares semiabiertas practicadas en las expansiones polares, lo más próximas posible al entrehierro (*fig. 1.09*). Estas barras van remachadas por sus dos extremos a unos segmentos o a anillos del mismo metal formando fracciones de un devanado de jaula de ardilla, o una jaula de ardilla completa, similar a la de un motor de inducción, de ahí que sea designado por «devanado amortiguador en jaula de ardilla».

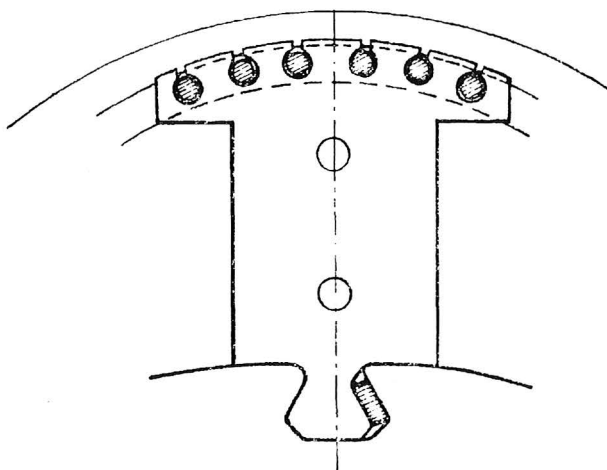


Fig. 1.09 Devanado amortiguador tipo jaula de ardilla.

La misión del devanado amortiguador, como más adelante se pondrá de manifiesto, es múltiple:

- 1.° Tiende a oponerse a la presencia de todo campo excitado por el inducido que no gire en sincronismo con el inductor. En este sentido reduce la amplitud de los armónicos de la tensión debidos a los armónicos de la corriente de inducido.
- 2.° Se opone a toda acción que pueda alterar el sincronismo entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo. Introduce, en consecuencia, un par que tiene por efecto amortiguar las oscilaciones pendulares que pueden presentarse en la marcha en paralelo de alternadores, o en el funcionamiento como motor síncrono.
- 3.° Se opone, finalmente, a toda variación brusca de amplitud del campo principal del inducido en los regímenes transitorios. En particular demora notablemente el establecimiento del campo de reacción de inducido desmagnetizante en los primeros instantes de producirse un cortocircuito.

En los motores síncronos de polos salientes hallamos también, a menudo, un devanado amortiguador de jaula de ardilla, cuya misión principal no es amortiguar las oscilaciones pendulares que una carga variable pueda ocasionar, sino principalmente actuar como arrollamiento de arranque del motor, y en este sentido para obtener un más alto par de arranque se construye con barras de aleaciones de cobre de mayor resistividad eléctrica que este metal.

El devanado inductor en los alternadores de polos salientes está constituido por hilo o pletina de cobre, aislados por esmaltes, bobinados sobre un carrete aislante o sobre un núcleo de sección idéntica a los polos y luego de ser retiradas del núcleo encintadas. La disposición divergente de los polos obliga a dar a estas bobinas inductoras una sección transversal escalonada o achaflanada (*fig. 1.10*).

El conjunto de las bobinas inductoras, conectadas en serie, es alimentado por una fuente de corriente continua, de baja tensión, a través de dos anillos calados sobre el eje, aislados eléctricamente, y una o más escobillas por anillo apoyadas en ellos (contactos deslizantes).

Los rotores de los alternadores de alta velocidad, accionados por turbinas de vapor, de dos polos y en unidades muy grandes de cuatro polos, por causa del elevado valor que alcanzan las fuerzas centrífugas no admiten la ejecución de polos salientes por lo que se construyen a partir de un cilindro de acero de alta resistencia mecánica (aceros al cro-

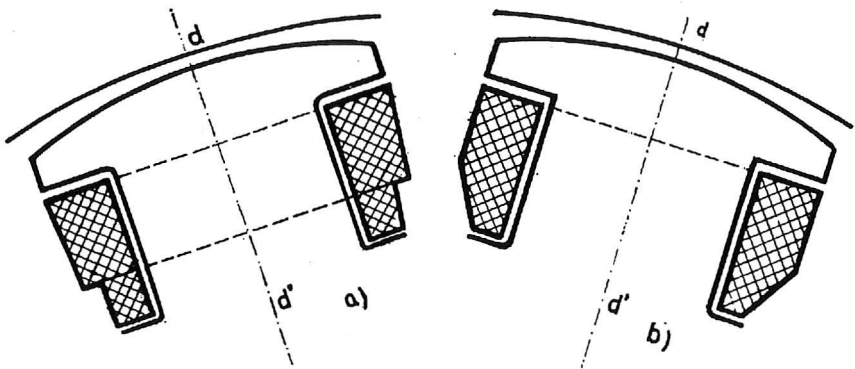


Fig. 1.10 Bobinas inductoras de la máquina síncrona de polos salientes:

a) Escalonadas. b) Achaflanadas.

mo-níquel-molibdeno) en cuya parte central, destinada a recibir el devanado inductor, van fresadas unas ranuras, radiales o paralelas de sección apropiada, en las que se alojan los lados axiales de las bobinas, distribuidas en Q ranuras por polo, como en un devanado monofásico de bobinas monopolares concéntricas (fig. 1.11). Fuertes cuñas de bronce fosforoso, o de acero amagnético, aseguran la sujeción de los lados de bobina dentro de las ranuras, así como unos anillos, o zunchos, de elevada resistencia sujetan fuertemente las conexiones frontales de las bobinas, contrarrestando la acción de la fuerza centrífuga y la de las fuerzas, aún mayores,

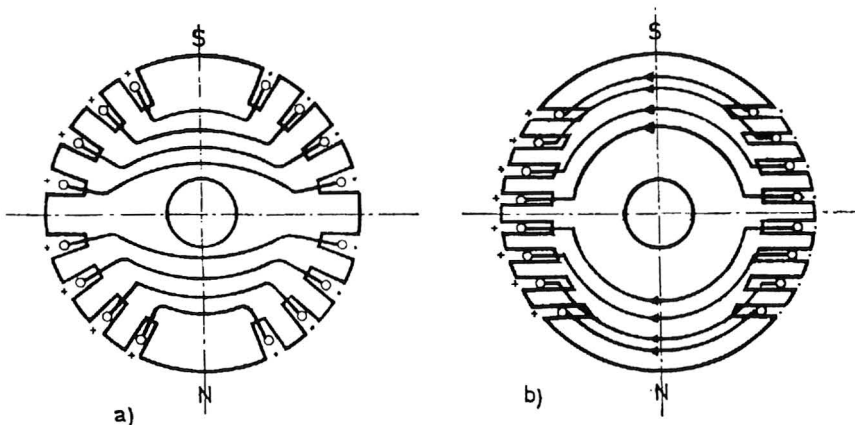


Fig. 1.11 Rotores de máquinas síncronas de alta velocidad:

a) Ranuras axiales. b) Ranuras paralelas.

que se desarrollan en las bobinas al producirse un cortocircuito brusco en la red de carga del alternador.

Señalemos a este propósito que así como en las máquinas de corriente continua son las sollicitaciones eléctricas, en especial la conmutación, las que limitan su potencia máxima unitaria, en las máquinas síncronas son las sollicitaciones mecánicas las determinantes de la potencia unitaria máxima. A tenor de las posibilidades actuales esta potencia ha rebasado ya los 1.000 MVA por unidad. El entrehierro de los turbo-alternadores es bastante mayor que el de las máquinas síncronas de polos salientes, alcanzando en las grandes unidades valores del orden de los 75 mm. Un gran entrehierro exige una mayor f.m.m. para obtener una inducción máxima determinada en la onda de campo, pero en cambio reduce la reactancia de dispersión del arrollamiento inducido y mejora la regulación de la tensión y la estabilidad, como nos será dado comprobar al estudiar estos problemas. Es ventajoso, también, para facilitar la refrigeración.

Hasta hace pocos años la corriente de excitación I_e , que requiere el sistema inductor era aportada por una fuente de corriente continua independiente del alternador, por lo general una dinamo excitatriz, directamente acoplada al eje de la máquina síncrona, sistema conocido como «excitación propia». Esta dinamo excitatriz puede ser, a su vez, autoexcitada (derivación o compuesta) o de excitación independiente, en cuyo caso se precisa de una segunda excitatriz, de potencia muy inferior, llamada «excitatriz piloto», solución exigida por las grandes unidades generatrices de las centrales eléctricas para lograr una regulación fina y amplia de la excitación (fig. 1.12).

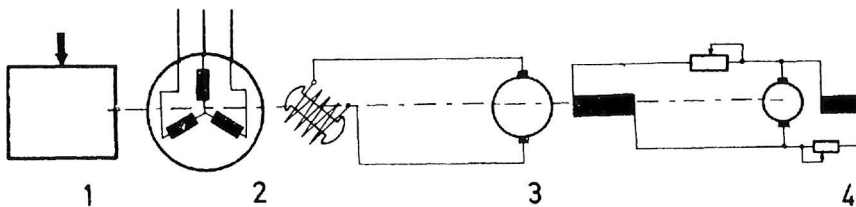


Fig. 1.12 Excitación de una máquina síncrona generatriz de gran potencia:

1. Motor primario.
2. Máquina síncrona.
3. Excitatriz independiente principal.
4. Excitatriz piloto autoexcitada.

El desarrollo y progresivo perfeccionamiento de los rectificadores de silicio ha modificado profundamente el sistema de excitación de las máquinas síncronas. Una primera solución ha sido sustituir la dinamo por un alternador de inducido móvil y un puente rectificador montado sobre

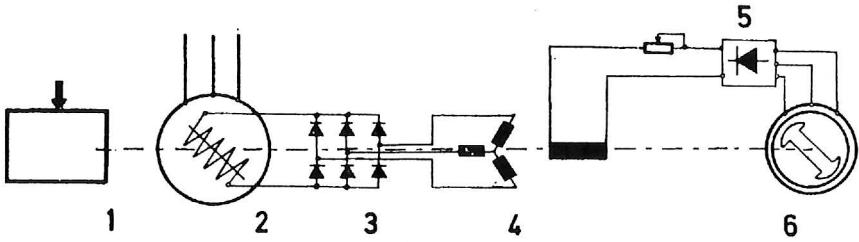


Fig. 1.13 Excitación «sin escobillas» de un generador síncrono:

1. Motor primario.
2. Máquina síncrona.
3. Puente trifásico rectificador a diodos de Si.
4. Excitatriz principal de corriente alterna, de inducido móvil.
5. Puente rectificador.
6. Excitatriz piloto trifásica, de imanes permanentes.

el propio rotor, eliminándose con ello el contacto móvil anillos-escobillas, excitación denominada «sin escobillas» (fig. 1.13).

Otra innovación de gran interés es la posibilidad de lograr la autoexcitación del alternador, una vez la máquina ha sido excitada por una fuente exterior de corriente continua. La autoexcitación estática se funda en la presencia del magnetismo remanente, exactamente igual que en las máquinas de corriente continua.

La figura 1.14 muestra el esquema de principio de este sistema que, si bien inicialmente fue aplicado a generadores de reducida potencia, en la actualidad es utilizado en grandes unidades de potencias superiores a los 100.000 kVA.

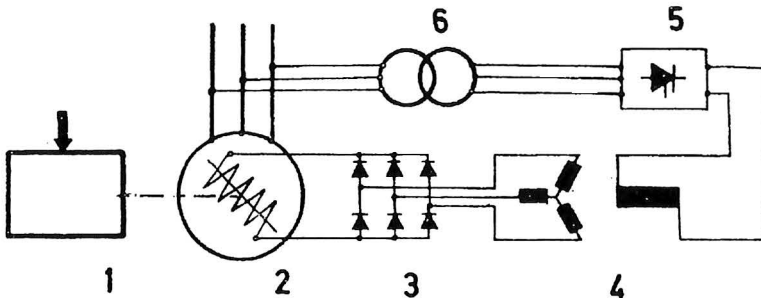


Fig. 1.14 Autoexcitación de un generador síncrono:

1. Motor primario.
2. Máquina síncrona.
3. Puente rectificador.
4. Excitatriz principal de corriente alterna.
5. Puente rectificador.
6. Transformador.

1.4. Devanados de inducido

Los devanados de inducido de las máquinas eléctricas en general fueron estudiados en el tomo I (Capítulo III), al cual remitimos a nuestros lectores, limitándonos aquí a presentar los tipos de devanados de inducido de mayor utilización en las máquinas síncronas.

En la elección del devanado más apropiado se debe atender principalmente a las siguientes consideraciones:

- máxima separación posible entre las cabezas de bobina para su mejor aislamiento y refrigeración, y mínima longitud de las mismas y de las conexiones frontales entre bobinas, para reducir el peso de cobre y las pérdidas por efecto Joule;
- ejecución lo más económica posible, reduciendo al mínimo la mano de obra;
- eliminación o limitación, cuanto menos, del número y amplitud de los armónicos de la f.e.m. inducida.

A tenor de estas consideraciones y teniendo en cuenta, por otra parte, que las ranuras del paquete magnético inducido de las máquinas síncronas, por razón del mayor entrehierro y la conveniencia de construir las bobinas aparte, son, en general, abiertas y de sección rectangular, los tipos de devanados más empleados son:

a) Alternadores de baja tensión (de menos de 1.000 V).

Devanados de doble capa, imbricados en potencias pequeñas y medias y ondulados (de barras) para potencias elevadas, todos ellos con bobinas de paso acortado y un número q , de ranuras por polo y fase «fraccionario», cuando este número es igual o inferior a 4.

b) Alternadores de alta tensión (superiores a 1.000 V).

Las exigencias de un mayor aislamiento de las bobinas y una clara separación entre cabezas recomiendan el empleo de devanados imbricados de bobinas concéntricas y ondulados de simple capa, sin que ello signifique que no se empleen también los de doble capa de bobinas imbricadas o los ondulados, hasta tensiones del orden de los 10.000 V.

Como la gran mayoría de las máquinas síncronas son trifásicas, el estator comportará tres arrollamientos idénticos, decalados entre sí 120°

eléctricos, cuya conexión prácticamente siempre es en estrella, la cual a la vez que nos elimina el tercer armónico en la onda de la tensión compuesta no da origen a corrientes de circulación interna en caso de desequilibrio de las tres fases y nos permite, además, obtener un punto neutro.

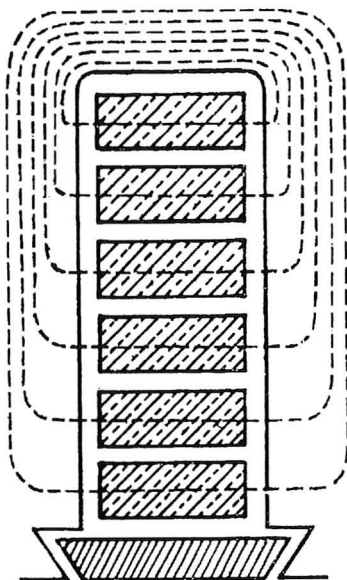


Fig. 1.15 Limitación del efecto de concentración de corriente por subdivisión del conductor.

En las máquinas de gran potencia, con intensidades de corriente de miles de amperios por fase, los conductores son barras de cobre rectangulares de elevada sección. Tal circunstancia conduce, como señalamos en el epígrafe 6.17 del tomo I, a elevadas pérdidas adicionales en el cobre por el efecto de concentración de corriente cuando son recorridos por corrientes alternas. Este inconveniente se reduce considerablemente subdividiendo el conductor en varias láminas aisladas entre sí, colocadas paralelamente al fondo de la ranura (*fig. 1.15*) y, además, regularmente traspuestas, trasposición que si bien ha llegado a realizarse dentro de la propia ranura, de forma que cada lámina llegue a ocupar sucesivamente todas las posiciones posibles (*fig. 1.16*), las dificultades que tal realización entraña recomiendan llevar a cabo la trasposición en las cabezas de bobina.

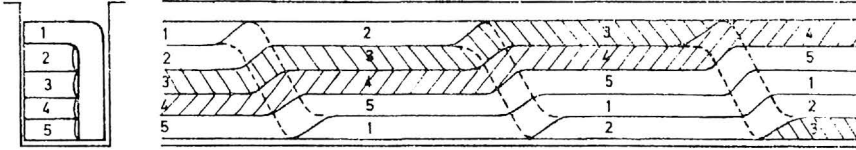


Fig. 1.16 Trasposición de los conductores estáticos dentro de las ranuras.

1.5. Refrigeración de las grandes unidades

Los alternadores están normalmente definidos, en cuanto a su potencia, por la *potencia aparente* máxima en kVA o en MVA, que bajo una tensión especificada, *tensión nominal*, y un factor de potencia dado (en las modernas unidades de gran potencia, 0,85 e incluso 0,90) pueden ceder continuamente sin un sobrecalentamiento.

Para no rebasar los límites de temperatura que la clase de los aislantes fija, deben emplearse adecuados medios de refrigeración.

El problema de la refrigeración de las máquinas eléctricas en general fue ya tratado en el primer tomo, epígrafe 6.25, por lo que nos limitaremos aquí a poner de manifiesto las soluciones que en las máquinas síncronas de gran potencia se aplican para que su calentamiento no exceda de los límites que señalan las normas vigentes.

A medida que aumenta el tamaño de la máquina, recordando la ecuación del estado de equilibrio térmico:

$$Q = K S \theta_M$$

y que, en primera aproximación, podemos admitir que las pérdidas de energía, transformadas en calor, Q , son proporcionales al volumen de la máquina, V , en tanto que las calorías evacuadas al ambiente son proporcionales a la superficie en contacto con el medio ambiente, S , el aumento de temperatura de la máquina sobre la del ambiente, θ_M , se incrementa con la dimensión lineal de la máquina, por lo que si θ_M no debe rebasar cierto límite se hace forzoso aumentar el coeficiente de emisión calorífica, K .

En alternadores de baja velocidad, de polos salientes, es suficiente la refrigeración natural por el aire ambiente impulsado por el propio movimiento del rotor, o por un ventilador de aletas montado sobre éste.

En las unidades de gran potencia y alta velocidad y en los turboalternadores, la mayor cantidad de calor a disipar por unidad de superficie hace obligado mejorar el medio de evacuación del calor a base de forzar la circulación del aire a través de la máquina y a utilizar otros fluidos refrigerantes de mayor capacidad calorífica, como el hidrógeno,

el aceite y el agua, en circuito cerrado, con intercambiadores de calor recuperando eventualmente una parte de la energía disipada en calor en la máquina.

Las ventajas del hidrógeno sobre el aire fueron puestas ya de manifiesto en el citado epígrafe del tomo I. Resumiéndolas son:

- aumento del rendimiento del alternador, del orden del 1 %, al ser mucho menores las pérdidas por ventilación;
- incremento del coeficiente de transmisión térmica, del orden de un 40 %, por lo que a igualdad de dimensiones la potencia puede ser mayor;
- mayor longevidad de los aislantes y menor peligro de incendio.

Todas ellas justifican que en los EE.UU. a partir de los 25 MVA, en Europa a partir de los 50 y 100 MVA, según los constructores, se haga uso de este gas, el cual para que no llegue a formar una mezcla explosiva con el aire, se mantiene en el interior de la máquina con una ligera sobrepresión de $0,05 \text{ kp/cm}^2$, por lo menos, aun cuando la tendencia actual es ir a presiones de 2 a 3 kp/cm^2 , y en las últimas realizaciones aún mayores, lo cual ha permitido alcanzar aumentos de potencia nominal del 30 al 50 % con relación a la refrigeración por aire. Juntas especiales de aceite entre el eje y la carcasa envolvente, limitan al mínimo las fugas de gas al ambiente.

Para potencias superiores a los 150 MVA no basta este solo expediente sino que se hace necesario, además, recurrir a la refrigeración interna del cobre de los devanados y sobre todo del devanado del rotor, utilizando conductores huecos (figs. 1.17, 1.18 y 1.19).

