

CONTENIDO

Prólogo	XV
Al estudiante	XXI
1. Circuitos magnéticos y conversión de energía.	1
1.1. Introducción.	2
1.2. Materiales magnéticos.	3
1.2.1. Diamagnetismo.	5
1.2.2. Paramagnetismo.	6
1.2.3. Ferromagnetismo y ciclo de histéresis.	6
1.3. Leyes de los circuitos magnéticos.	11
1.4. Imanes permanentes.	29
1.4.1. Circuitos magnéticos con imanes permanentes.	31
1.4.2. Imán permanente de volumen mínimo.	34
1.5. Energía y coenergía magnética.	35
1.6. Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos.	39
1.6.1. Pérdidas por histéresis.	40
1.6.2. Pérdidas por corrientes de Foucault.	41
1.6.3. Consecuencias tecnológicas.	44

1.7. Circuitos magnéticos excitados con corriente alterna.	50	2.12. Análisis cualitativo de las principales máquinas eléctricas.	215
1.7.1. Circuito eléctrico equivalente de una bobina con núcleo de hierro alimentada con c.a.	53	2.12.1. Transformadores.	215
1.7.2. Corriente de excitación en una bobina con núcleo de hierro alimentada con c.a.	57	2.12.2. Máquinas síncronas.	216
1.8. Conversión de energía en sistemas magnéticos con movimiento de traslación. Electroimanes.	63	2.12.3. Máquinas de corriente continua.	218
1.9. Conversión de energía en sistemas magnéticos con movimiento de rotación. Máquinas eléctricas rotativas.	82	2.12.4. Máquinas asíncronas o de inducción.	220
1.9.1. Sistemas magnéticos de rotación alimentados con una sola fuente. Motores de reluctancia.	83	2.12.5. Motores de c.a. con conmutador. Motores universales.	223
1.9.2. Sistemas magnéticos de rotación alimentados con dos fuentes.	88	Problemas.	224
Apéndice. Devanados con acoplamiento magnético.	105	Biografías.	231
Problemas.	111	Referencias.	236
Biografías.	120		
Referencias.	127		
2. Principios generales de las máquinas eléctricas.	129	3. Transformadores.	239
2.1. Introducción.	130	3.1. Introducción.	240
2.2. Elementos básicos de las máquinas eléctricas.	132	3.2. Principales aspectos constructivos.	242
2.3. Colector de anillos y colector de delgas.	137	3.3. Principio de funcionamiento de un transformador ideal.	254
2.4. Devanados.	142	3.4. Funcionamiento de un transformador real.	261
2.5. Pérdidas y calentamiento.	146	3.5. Circuito equivalente de un transformador.	265
2.6. Potencia asignada y nominal. Tipos de servicio.	152	3.6. Ensayos del transformador.	272
2.7. Rendimiento.	157	3.6.1. Ensayo de vacío.	273
2.8. F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica. ...	162	3.6.2. Ensayo de cortocircuito.	275
2.8.1. Campo magnético y f.m.m. producida por un devanado concentrado de paso diametral.	162	3.7. Caída de tensión en un transformador.	285
2.8.2. F.m.m. producida por un devanado distribuido.	170	3.8. Pérdidas y rendimiento de un transformador.	293
2.8.3. F.m.m. producida por un devanado trifásico. Campos giratorios. Teorema de Ferraris.	173	3.9. Corriente de excitación o de vacío de un transformador. Armónicos de la corriente de vacío.	296
2.8.3. Relación entre un campo alternativo y un campo giratorio. Teorema de Leblanc.	179	3.10. *Corriente de conexión de un transformador.	297
2.9. F.e.m. inducida en un devanado de una máquina eléctrica.	187	3.11. Transformadores trifásicos.	299
2.9.1. *Factores que afectan a la f.e.m. inducida en un devanado.	191	3.11.1. *Armónicos en las corrientes de excitación de transformadores trifásicos.	307
2.9.2. *Armónicos de f.e.m.: origen y eliminación.	197	3.11.2. *Estudio de los transformadores trifásicos con cargas desequilibradas.	314
2.10. *Par electromagnético en las máquinas eléctricas.	205	3.12. Acoplamiento en paralelo de transformadores.	330
2.11. Clasificación general de las máquinas eléctricas.	212	3.13. Autotransformadores.	341
		3.14. Transformadores con tomas.	343
		3.14.1. Tomas de regulación.	343
		3.14.2. Elementos de conmutación.	346
		3.15. Transformadores de medida.	347
		3.15.1. Transformadores de tensión.	347
		3.15.2. Transformadores de corriente.	350

Apéndice. Transformadores especiales.....	353
A.1. Transformación trifásica a bifásica y viceversa. Conexión Scott.....	353
A.2. Transformación trifásica a hexafásica.....	356
Problemas.....	357
Biografías.....	373
Referencias.....	379
4. Máquinas asíncronas.....	381
4.1. Introducción.....	382
4.2. Aspectos constructivos.....	385
4.3. Principio de funcionamiento.....	390
4.4. Circuito equivalente del motor asíncrono.....	400
4.5. Ensayos del motor asíncrono.....	409
4.5.1. Ensayo de vacío o de rotor libre.....	409
4.5.2. Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado.....	412
4.6. Balance de potencias.....	419
4.7. Par de rotación.....	428
4.7.1. Determinación del par electromagnético de la máquina asíncrona.....	428
4.7.2. Tipos de funcionamiento de la máquina asíncrona.....	434
4.8. *Diagrama del círculo.....	461
4.8.1. Dedución del diagrama circular.....	461
4.8.2. Elección de escalas en el diagrama del círculo.....	467
4.9. Arranque.....	468
4.9.1. Arranque de los motores en jaula de ardilla.....	470
4.9.2. Arranque de los motores de rotor bobinado.....	474
4.10. Motores de doble jaula de ardilla.....	486
4.11. Regulación de la velocidad.....	490
4.11.1. Regulación de velocidad por control de la tensión de línea aplicada al estátor.....	491
4.11.2. Regulación por variación del número de polos.....	493
4.11.3. Regulación por variación de la frecuencia.....	496
4.11.4. Regulación por variación del deslizamiento.....	497
4.12. Dinámica del motor asíncrono.....	500
4.12.1. Tiempo de arranque de un motor asíncrono.....	502
4.12.2. Pérdidas de energía en régimen dinámico.....	503

4.13. Motor de inducción monofásico.....	507
4.13.1. Circuito equivalente.....	509
4.13.2. Arranque de los motores de inducción monofásicos.....	512
4.14. *Funcionamiento del motor asíncrono trifásico alimentado con tensiones desequilibradas.....	522
4.15. *Máquinas asíncronas especiales.....	535
4.15.1. Regulador de inducción.....	535
4.15.2. <i>Selsyns</i>	537
4.15.3. Motor de inducción lineal.....	538
*Apéndice 4.1. El par de rotación de un motor asíncrono desde el punto de vista físico.....	540
*Apéndice 4.2. La conversión de energía en la máquina asíncrona con doble alimentación.....	546
A.4.2.1. Circuito equivalente en régimen permanente de la máquina asíncrona con doble alimentación.....	546
A.4.2.2. Tipos de funcionamiento de la máquina asíncrona con doble alimentación.....	550
A.4.2.3. Efecto de la tensión externa en el comportamiento de la máquina asíncrona con doble alimentación. Potencias activas y reactivas en estátor y rotor.....	553
Problemas.....	576
Biografías.....	589
Referencias.....	594
5. Máquinas síncronas.....	597
5.1. Introducción.....	598
5.2. Aspectos constructivos.....	600
5.3. Sistemas de excitación.....	603
5.4. Principio de funcionamiento de un alternador.....	606
5.4.1. Funcionamiento en vacío.....	606
5.4.2. Funcionamiento en carga. Reacción del inducido.....	609
5.5. Diagrama fasorial de un alternador. Regulación de tensión.....	613
5.6. Análisis lineal de la máquina síncrona. El circuito equivalente.....	618
5.6.1. Método de Behn-Eschenburg. Impedancia síncrona.....	619
5.6.2. Características de vacío y cortocircuito de la máquina síncrona. Determinación de la impedancia síncrona.....	623
5.7. Análisis no lineal de la máquina síncrona. Método de Potier o del f.d.p. nulo. Cálculo de la regulación.....	633
5.8. *Regulación de tensión en las máquinas síncronas de polos salientes. Teoría de las dos reacciones.....	639

5.9. Funcionamiento de un alternador en una red aislada.	646
5.9.1. Funcionamiento del regulador de velocidad.	648
5.10. Acoplamiento de un alternador a la red.	656
5.11. Potencias activas y reactivas desarrolladas por una máquina síncrona acoplada a una red de potencia infinita.	661
5.12. Funcionamiento de una máquina síncrona conectada a una red de potencia infinita.	665
5.12.1. Efectos de la variación de excitación.	665
5.12.2. Efectos de la variación del par mecánico (regulador de velocidad).	667
5.13. Funcionamiento en paralelo de alternadores de potencias similares.	675
5.14. Motor síncrono. Características y aplicaciones.	685
5.15. *Diagrama de límites de funcionamiento de una máquina síncrona.	691
5.16. *Transitorio de cortocircuito de una máquina síncrona.	699
*Apéndice. Los sistemas eléctricos de potencia.	706
A.1. Balance de potencias en un sistema eléctrico.	706
A.2. Desarrollo histórico de los sistemas eléctricos. Tipos de regulación.	710
A.3. La electrónica de potencia y los sistemas eléctricos.	713
A.4. El sistema eléctrico del futuro: la red eléctrica inteligente (<i>Smart Grid</i>).	714
Problemas.	718
Biografías.	728
Referencias.	734
6. Máquinas de corriente continua.	737
6.1. Introducción.	738
6.2. Aspectos constructivos.	740
6.3. Principio de funcionamiento.	743
6.4. Reacción de inducido.	749
6.5. Conmutación.	758
6.6. Generadores de c.c. Aspectos generales.	764
6.7. Generadores de c.c. Características de servicio.	768
6.8. Motores de c.c. Aspectos generales.	779
6.9. Motores de c.c. Características de servicio.	784
6.9.1. Motores de c.c. con excitación independiente y derivación. Sistema de regulación Ward-Leonard.	788
6.9.2. Motor de c.c. con excitación serie.	795
6.9.3. Motor de c.c. con excitación compuesta.	799

6.10. *Motor de c.c. Métodos de frenado.	804
6.11. *Funcionamiento de una máquina de c.c. en cuatro cuadrantes.	810
6.12. Motor monofásico de c.a. con colector de delgas.	813
6.13. Motores de c.c. sin escobillas (<i>brushless motors</i>).	815
Problemas.	818
Biografías.	823
Referencias.	828
Apéndice 1. Repaso de la teoría del electromagnetismo.	831
A.1.1. Tipos de campos electromagnéticos.	832
A.1.2. Ecuaciones de Maxwell.	836
A.1.3. Significado físico de las ecuaciones de Maxwell.	837
A.1.3.1. Ecuación $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$. Ley de Gauss eléctrica.	837
A.1.3.2. Ecuación $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$. Ley de Gauss magnética.	838
A.1.3.3. Ecuación $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t$. Ley de Ampère-Maxwell.	839
A.1.3.4. Ecuación $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$. Ley de inducción de Faraday.	841
A.1.4. La máquina eléctrica lineal.	852
A.1.4.1. Funcionamiento del generador lineal.	853
A.1.4.2. Funcionamiento del motor lineal.	856
Apéndice 2. Repaso de series de Fourier.	859
A.2.1. Introducción.	860
A.2.2. Función periódica.	860
A.2.3. Series trigonométricas de Fourier.	861
A.2.4. Ortogonalidad del sistema trigonométrico.	862
A.2.5. Evaluación de los coeficientes de Fourier.	863
A.2.6. Simetría de la función $f(t)$	864
A.2.7. Coeficientes de Fourier de ondas simétricas.	865
Apéndice 3. El sistema por unidad.	873
A.3.1. Magnitudes normalizadas. El sistema por unidad.	874
A.3.2. Cambio de base.	877
A.3.3. Sistemas trifásicos. Análisis por unidad.	881
Índice alfabético.	885