

Prefacio	xxi
Capítulo 1 Introducción a los principios de las máquinas	1
1.1 Las máquinas eléctricas, los transformadores y la vida diaria	1
1.2 Nota referente a las unidades y notación	2
<i>Notación</i>	2
1.3 Movimiento rotatorio, ley de Newton y relaciones de potencia	3
<i>Posición angular (θ)</i>	3
<i>Velocidad angular (ω)</i>	3
<i>Aceleración angular (α)</i>	4
<i>Par (τ)</i>	4
<i>Ley de rotación de Newton</i>	6
<i>Trabajo (W)</i>	7
<i>Potencia (P)</i>	7
1.4 El campo magnético	8
<i>Producción de un campo magnético</i>	8
<i>Circuitos magnéticos</i>	11
<i>Comportamiento magnético de los materiales ferromagnéticos</i>	21
<i>Pérdidas de energía en un núcleo ferromagnético</i>	26
1.5 Ley de Faraday: voltaje inducido por un campo magnético variable	28
1.6 Producción de fuerza inducida en un alambre	32
1.7 Voltaje inducido en un conductor que se mueve en un campo magnético	34
1.8 Ejemplo sencillo de una máquina lineal de corriente directa	36
<i>Arranque de la máquina lineal de corriente directa</i>	37
<i>La máquina lineal de corriente directa como motor</i>	39
<i>La máquina lineal de corriente directa como generador</i>	41
<i>Problemas con el arranque en la máquina de corriente directa lineal</i>	42
1.9 Potencias real, reactiva y aparente en los circuitos de corriente alterna	47
<i>Formas alternativas de las ecuaciones de potencia</i>	50
<i>Potencia compleja</i>	50

	<i>Las relaciones entre el ángulo de impedancia, el ángulo de la corriente y la potencia</i>	51
	<i>El triángulo de potencia</i>	51
1.10	Resumen	53
	Preguntas	54
	Problemas	55
	Bibliografía	64
Capítulo 2	Transformadores	65
2.1	Por qué son importantes los transformadores en la vida moderna	66
2.2	Tipos y construcción de transformadores	66
2.3	El transformador ideal	68
	<i>Potencia en el transformador ideal</i>	70
	<i>Transformación de impedancia a través de un transformador</i>	71
	<i>Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales</i>	72
2.4	Teoría de operación de los transformadores monofásicos reales	76
	<i>Relación de voltaje en el transformador</i>	78
	<i>Corriente de magnetización en un transformador real</i>	80
	<i>Relación de corriente en un transformador y la convención de puntos</i>	84
2.5	El circuito equivalente de un transformador	86
	<i>Circuito equivalente exacto de un transformador real</i>	86
	<i>Circuitos equivalentes aproximados de un transformador</i>	89
	<i>Determinación de los valores de los componentes en el modelo de transformador</i>	90
2.6	Sistema de medidas por unidad	94
2.7	Regulación de voltaje y eficiencia en un transformador	100
	<i>Diagrama fasorial del transformador</i>	100
	<i>Eficiencia del transformador</i>	102
2.8	Tomas (taps) y regulación de voltaje en los transformadores	108
2.9	El autotransformador	109
	<i>Relaciones entre el voltaje y la corriente en un autotransformador</i>	111
	<i>La ventaja del valor nominal de la potencia aparente de los autotransformadores</i>	112
	<i>La impedancia interna de un autotransformador</i>	115
2.10	Transformadores trifásicos	116
	<i>Conexiones de transformadores trifásicos</i>	118
	<i>El sistema por unidad para los transformadores trifásicos</i>	123
2.11	Transformación trifásica utilizando dos transformadores	126
	<i>La conexión Δ abierta (o V-V)</i>	126
	<i>La conexión ye abierta-delta abierta</i>	130
	<i>La conexión Scott-T</i>	131
	<i>La conexión T trifásica</i>	131
2.12	Valores nominales y problemas relacionados con los transformadores	134
	<i>Valores nominales de voltaje y frecuencia de un transformador</i>	134
	<i>El valor nominal de la potencia aparente de un transformador</i>	138

	<i>El problema de la corriente de irrupción</i>	139
	<i>Placa de características del transformador</i>	140
2.13	Transformadores para instrumentos	140
2.14	Resumen	142
	Preguntas	143
	Problemas	144
	Bibliografía	151
Capítulo 3	Introducción a la electrónica de potencia	152
3.1	Componentes de electrónica de potencia	152
	<i>El diodo</i>	153
	<i>El tiristor de dos hilos o diodo PNP</i>	154
	<i>El tiristor de tres hilos o SCR</i>	155
	<i>El tiristor de interrupción por puerta</i>	157
	<i>El DIAC</i>	158
	<i>El TRIAC</i>	158
	<i>El transistor de potencia</i>	160
	<i>El transistor bipolar de puerta aislada</i>	161
	<i>Comparación de potencia y velocidad de los componentes de potencia electrónica</i>	162
3.2	Circuitos rectificadores básicos	163
	<i>El rectificador de media onda</i>	163
	<i>El rectificador de onda completa</i>	167
	<i>El rectificador trifásico de media onda</i>	168
	<i>El rectificador trifásico de onda completa</i>	169
	<i>Filtrado de la salida del rectificador</i>	170
3.3	Circuitos de pulso	171
	<i>Oscilador de relajación con un diodo PNP</i>	172
	<i>Sincronización de pulsos</i>	177
3.4	Variaciones de voltaje mediante control de fase de ca	177
	<i>Control de fase de ca para una carga de cd alimentada por una fuente de ca</i>	177
	<i>Control de ángulo de fase de ca para una carga de ca</i>	180
	<i>El efecto de las cargas inductivas en el control de ángulo de fase</i>	184
3.5	Control de potencia de cd a cd: recortadores	186
	<i>Conmutación forzada en los circuitos recortadores</i>	188
	<i>Circuitos de conmutación con capacitor en serie</i>	189
	<i>Circuitos de conmutación con capacitor en paralelo</i>	191
3.6	Inversores	193
	<i>El rectificador</i>	193
	<i>Inversores de conmutación externa</i>	194
	<i>Inversores de autoconmutación</i>	195
	<i>Inversor monofásico de fuente de corriente</i>	195
	<i>Inversor trifásico de fuente de corriente</i>	197

	<i>Inversor trifásico de fuente de voltaje</i>	199
	<i>Inversor de modulación de ancho de pulso</i>	202
3.7	Cicloconvertidores	209
	<i>Conceptos básicos</i>	209
	<i>Cicloconvertidor de corriente no circulante</i>	214
	<i>Cicloconvertidor de corriente circulante</i>	215
3.8	Problemas de armónicas	218
3.9	Resumen	221
	Preguntas	223
	Problemas	223
	Bibliografía	229

Capítulo 4 Principios básicos de las máquinas de corriente alterna (ca) 230

4.1	Espira sencilla en un campo magnético uniforme	230
	<i>Voltaje inducido en una espira rotativa sencilla</i>	231
	<i>Par inducido en una espira que porta corriente</i>	234
4.2	Campo magnético giratorio	238
	<i>Demostración del concepto de campo magnético giratorio</i>	241
	<i>Relación entre la frecuencia eléctrica y la velocidad de rotación del campo magnético</i>	242
	<i>Inversión de la dirección de rotación del campo magnético</i>	244
4.3	Fuerza magnetomotriz y distribución de flujo en máquinas de ca	246
4.4	Voltaje inducido en máquinas de ca	250
	<i>Voltaje inducido en la bobina de un estator bipolar</i>	250
	<i>Voltaje inducido en un grupo de bobinas trifásico</i>	253
	<i>Voltaje rms en un estator trifásico</i>	254
4.5	Par inducido en una máquina de ca	255
4.6	Aislamiento del devanado en una máquina de ca	258
4.7	Flujo de potencia y pérdidas en máquinas de ca	261
	<i>Pérdidas en máquinas de ca</i>	261
	<i>Diagrama de flujo de potencia</i>	262
4.8	Regulación de voltaje y regulación de velocidad	262
4.9	Resumen	264
	Preguntas	265
	Problemas	265
	Bibliografía	266

Capítulo 5 Generadores síncronos 267

5.1	Construcción de generadores síncronos	267
5.2	La velocidad de rotación de un generador síncrono	272
5.3	El voltaje interno generado por un generador síncrono	273
5.4	Circuito equivalente de un generador síncrono	274

5.5	Diagrama fasorial de un generador síncrono	279
5.6	Potencia y par en los generadores síncronos	280
5.7	Medición de los parámetros del modelo de generador síncrono	283
	<i>Relación de cortocircuito</i>	287
5.8	Generador síncrono que opera solo	288
	<i>Efecto de los cambios en la carga en un generador síncrono que opera solo</i>	289
	<i>Ejemplos</i>	291
5.9	Operación en paralelo de generadores de ca	299
	<i>Las condiciones requeridas para operar en paralelo</i>	301
	<i>Procedimiento general para conectar generadores en paralelo</i>	303
	<i>Características de frecuencia-potencia y de voltaje-potencia reactiva en un generador síncrono</i>	304
	<i>Operación de generadores en paralelo con grandes sistemas de potencia</i>	308
	<i>Operación de generadores en paralelo con otros generadores del mismo tamaño</i>	312
5.10	Transitorios (oscilaciones momentáneas) en los generadores síncronos	319
	<i>Estabilidad transitoria en los generadores síncronos</i>	320
	<i>Transitorios en cortocircuito en generadores síncronos</i>	321
5.11	Valores nominales en los generadores síncronos	326
	<i>Valores nominales del voltaje, la velocidad y la frecuencia</i>	326
	<i>Valores nominales de la potencia aparente y del factor de potencia</i>	327
	<i>Curvas de capacidad de los generadores síncronos</i>	329
	<i>Operación de corta duración y factor de servicio</i>	335
5.12	Resumen	336
	Preguntas	337
	Problemas	338
	Bibliografía	345
Capítulo 6	Motores síncronos	346
6.1	Principios básicos de la operación de los motores	346
	<i>Circuito equivalente de un motor síncrono</i>	347
	<i>Motores síncronos desde la perspectiva del campo magnético</i>	347
6.2	Operación de motor síncrono en estado estacionario	350
	<i>Curva característica par-velocidad de los motores síncronos</i>	350
	<i>Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos</i>	351
	<i>Efecto de cambios en la corriente de campo en los motores síncronos</i>	355
	<i>Los motores síncronos y la corrección del factor de potencia</i>	360
	<i>Capacitor o condensador síncrono</i>	363
6.3	Arranque de los motores síncronos	364
	<i>Arranque del motor por medio de la reducción de la frecuencia eléctrica</i>	366
	<i>Arranque del motor con un motor primario externo</i>	367
	<i>Arranque del motor con devanados de amortiguamiento</i>	367
	<i>Efecto de los devanados de amortiguación en la estabilidad del motor</i>	371

6.4	Generadores síncronos y motores síncronos	371
6.5	Valores nominales en los motores síncronos	372
6.6	Resumen	373
	Preguntas	374
	Problemas	374
	Bibliografía	379

Capítulo 7	Motores de inducción	380
7.1	Construcción de un motor de inducción	380
7.2	Conceptos básicos de los motores de inducción	384
	<i>Desarrollo del par inducido en un motor de inducción</i>	384
	<i>Concepto de deslizamiento del rotor</i>	386
	<i>Frecuencia eléctrica en el rotor</i>	386
7.3	Circuito equivalente de un motor de inducción	388
	<i>Modelo de transformador de un motor de inducción</i>	389
	<i>Modelo de circuito del rotor</i>	390
	<i>Circuito equivalente final</i>	393
7.4	Potencia y par en los motores de inducción	394
	<i>Pérdidas y diagrama de flujo de potencia</i>	394
	<i>Potencia y par en un motor de inducción</i>	396
	<i>Separación de las pérdidas en el cobre del rotor y la potencia convertida en el circuito equivalente de un motor de inducción</i>	398
7.5	Característica par-velocidad en los motores de inducción	401
	<i>Par inducido desde el punto de vista físico</i>	401
	<i>Deducción de la ecuación del par inducido en el motor de inducción</i>	405
	<i>Comentarios sobre la curva par-velocidad del motor de inducción</i>	408
	<i>Par máximo (par de desviación) en un motor de inducción</i>	410
7.6	Variaciones en las características par-velocidad del motor de inducción	416
	<i>Control de las características del motor mediante el diseño del rotor de jaula de ardilla</i>	417
	<i>Diseños de rotores de barra profunda y de doble jaula</i>	419
	<i>Clases de diseño de los motores de inducción</i>	421
7.7	Tendencias en el diseño de motores de inducción	426
7.8	Arranque de los motores de inducción	430
	<i>Circuitos de arranque de los motores de inducción</i>	432
7.9	Control de velocidad en los motores de inducción	434
	<i>Control de velocidad del motor de inducción mediante el cambio de polos</i>	436
	<i>Control de velocidad mediante el cambio en la frecuencia de la línea</i>	438
	<i>Control de velocidad mediante el cambio en el voltaje de línea</i>	443
	<i>Control de velocidad mediante el cambio de la resistencia del rotor</i>	443
7.10	Controladores de estado sólido para motores de inducción	444
	<i>Ajuste de frecuencia (velocidad)</i>	447
	<i>Selección de patrones de voltaje y de frecuencia</i>	448

	<i>Rampas de aceleración y desaceleración ajustables independientemente</i>	448
	<i>Protección del motor</i>	452
7.11	Determinación de los parámetros del modelo del circuito	452
	<i>Prueba en vacío</i>	452
	<i>Prueba de cd para determinar la resistencia del estator</i>	454
	<i>Prueba de rotor bloqueado</i>	455
7.12	El generador de inducción	460
	<i>Generador de inducción aislado</i>	461
	<i>Aplicaciones de los generadores de inducción</i>	464
7.13	Valores nominales de los motores de inducción	464
7.14	Resumen	466
	Preguntas	467
	Problemas	468
	Bibliografía	472

Capítulo 8 Fundamentos de máquinas de corriente directa (cd)

		473
8.1	Espira giratoria sencilla entre caras polares curvas	473
	<i>El voltaje inducido en una espira giratoria</i>	475
	<i>Obtención del voltaje de cd de una espira giratoria</i>	478
	<i>El par inducido en la espira giratoria</i>	480
8.2	Comutación en una máquina de cd sencilla de cuatro espiras	485
8.3	Construcción del sistema de conmutación y del inducido en las máquinas de cd	490
	<i>Bobinas del rotor</i>	490
	<i>Conexiones a los segmentos del conmutador</i>	492
	<i>Devanados imbricados</i>	493
	<i>Devanado ondulado</i>	497
	<i>Devanado de pata de rana</i>	501
8.4	Problemas de conmutación en las máquinas reales	502
	<i>Reacción del inducido</i>	502
	<i>Voltajes $L di/dt$</i>	505
	<i>Soluciones a los problemas de conmutación</i>	508
8.5	Ecuaciones de voltaje interno generado y par inducido en las máquinas de cd reales	514
8.6	Construcción de las máquinas de cd	518
	<i>Construcción de los polos y de la estructura</i>	520
	<i>Construcción del rotor o inducido</i>	521
	<i>El conmutador y las escobillas</i>	521
	<i>Aislamiento de los devanados</i>	523
8.7	Flujo de potencia y pérdidas en las máquinas de cd	524
	<i>Pérdidas en las máquinas de cd</i>	524
	<i>Diagrama de flujo de potencia</i>	525
8.8	Resumen	527

Preguntas	527
Problemas	527
Bibliografía	530
Capítulo 9 Motores y generadores de corriente directa	533
9.1 Introducción a los motores de cd	533
9.2 Circuito equivalente en un motor de cd	535
9.3 Curva de magnetización de una máquina de cd	536
9.4 Motores de cd de excitación separada y en derivación	538
<i>Característica de los terminales de un motor de cd en derivación</i>	539
<i>Análisis no lineal de un motor de cd en derivación</i>	543
<i>Control de velocidad en los motores de cd en derivación</i>	547
<i>Efecto de un circuito de campo abierto</i>	558
9.5 Motor de cd de imán permanente	559
9.6 Motor de cd en serie	562
<i>Par inducido en un motor de cd en serie</i>	562
<i>Característica de los terminales de un motor de cd en serie</i>	563
<i>Control de velocidad en los motores de cd en serie</i>	567
9.7 Motor de cd compuesto	568
<i>Característica par-velocidad de un motor de cd compuesto acumulativo</i>	569
<i>Característica par-velocidad de un motor de cd compuesto diferencial</i>	570
<i>Análisis no lineal en motores de cd compuestos</i>	571
<i>Control de velocidad en un motor de cd compuesto acumulativo</i>	573
9.8 Arrancadores para motores de cd	573
<i>Problemas en el arranque de motores de cd</i>	573
<i>Circuitos de arranque de los motores de cd</i>	578
9.9 El sistema Ward-Leonard y los controladores de velocidad en estado sólido	582
<i>Sección del circuito de protección</i>	589
<i>Sección del circuito de arranque y paro</i>	589
<i>Sección de electrónica de alta potencia</i>	590
<i>Sección de electrónica de baja potencia</i>	590
9.10 Cálculo de la eficiencia de un motor de cd	592
9.11 Introducción a los generadores de cd	594
9.12 Generador de excitación separada	596
<i>Característica en los terminales de un generador de cd de excitación separada</i>	596
<i>Control del voltaje en los terminales</i>	597
<i>Análisis no lineal de un generador de cd de excitación separada</i>	598
9.13 Generador de cd en derivación	602
<i>Incremento de voltaje en un generador en derivación</i>	603
<i>Característica de los terminales de un generador de cd en derivación</i>	605
<i>Control de voltaje en un generador de cd en derivación</i>	606
<i>Análisis de los generadores de cd en derivación</i>	606

9.14	Generador de cd en serie	608
	<i>Característica de los terminales de un generador en serie</i>	609
9.15	Generador de cd compuesto acumulativo	611
	<i>Característica de los terminales de un generador de cd compuesto acumulativo</i>	612
	<i>Control de voltaje en los generadores de cd compuestos acumulativos</i>	614
	<i>Análisis de generadores de cd compuestos acumulativos</i>	614
9.16	Generador de cd compuesto diferencial	615
	<i>Característica de los terminales de un generador de cd compuesto diferencial</i>	617
	<i>Control de voltaje en los generadores de cd compuestos diferenciales</i>	617
	<i>Análisis gráfico de un generador de cd compuesto diferencial</i>	618
9.17	Resumen	619
	Preguntas	620
	Problemas	621
	Bibliografía	631
Capítulo 10	Motores monofásicos y de uso especial	633
10.1	El motor universal	634
	<i>Aplicaciones de los motores universales</i>	635
	<i>Control de velocidad en los motores universales</i>	635
10.2	Introducción a los motores de inducción monofásicos	637
	<i>Teoría del doble campo giratorio de los motores de inducción monofásicos</i>	638
	<i>Teoría de campo cruzado de los motores de inducción monofásicos</i>	643
10.3	Arranque de los motores de inducción monofásicos	646
	<i>Devanados de fase partida</i>	646
	<i>Motores de arranque por capacitor</i>	649
	<i>Motores de capacitor permanente dividido y motores de capacitor de arranque-capacitor de marcha</i>	650
	<i>Motores de polos sombreados</i>	652
	<i>Comparación entre los motores de inducción monofásicos</i>	653
10.4	Control de velocidad de un motor de inducción monofásico	656
10.5	Circuito modelo de un motor de inducción monofásico	658
	<i>Análisis del circuito con un circuito equivalente de un motor de inducción monofásico</i>	659
10.6	Otros tipos de motores	665
	<i>Motores de reluctancia</i>	665
	<i>Motores de histéresis</i>	666
	<i>Motores de avance paso a paso (motores a pasos)</i>	670
	<i>Motores de cd sin escobillas</i>	674
10.7	Resumen	677
	Preguntas	678
	Problemas	679
	Bibliografía	680

Apéndice A	Circuitos trifásicos	681
A.1	Generación de voltajes y corrientes trifásicas	681
A.2	Voltajes y corrientes en un circuito trifásico	685
	<i>Voltajes y corrientes en la conexión en ye (Y)</i>	685
	<i>Voltajes y corrientes en la conexión en delta (Δ)</i>	688
A.3	Relaciones de potencia en los circuitos trifásicos	690
	<i>Ecuaciones de potencia trifásica que involucran cantidades de fase</i>	691
	<i>Ecuaciones de potencia trifásica que involucran cantidades de línea</i>	692
A.4	Análisis de un sistema trifásico balanceado	693
A.5	Diagramas de una línea	700
A.6	Utilización del triángulo de potencia	701
	Preguntas	703
	Problemas	704
	Bibliografía	706
Apéndice B	Paso de bobina y devanados distribuidos	707
B.1	Efecto del paso de bobina en las máquinas de ca	707
	<i>Paso de una bobina</i>	708
	<i>El voltaje inducido de una bobina de paso fraccionado</i>	709
	<i>Problemas con los armónicos y los devanados de paso fraccionado</i>	712
B.2	Devanados distribuidos en las máquinas de ca	716
	<i>Factor de amplitud o de distribución</i>	718
	<i>Voltaje generado que incluye los efectos de distribución</i>	721
	<i>Armónicos de diente o de ranura</i>	722
B.3	Resumen	724
	Preguntas	725
	Problemas	725
	Bibliografía	726
Apéndice C	Teoría de polos salientes de las máquinas síncronas	727
C.1	Desarrollo del circuito equivalente de un generador síncrono con polos salientes	728
C.2	Ecuaciones de par y de potencia para las máquinas con polos salientes	734
	Problemas	735
Apéndice D	Tablas de constantes y factores de conversión	737
Índice		739