

Contenido

Prefacio	xvii
Acerca del autor	xxiii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Aplicaciones de la electrónica de potencia	2
1.2 Historia de la electrónica de potencia	4
1.3 Tipos de circuitos electrónicos de potencia	6
1.4 Diseño de equipo electrónico de potencia	10
1.5 Determinación de valores de la media cuadrática de formas de onda	11
1.6 Efectos periféricos	12
1.7 Características y especificaciones de conmutadores	15
1.7.1 Características ideales	15
1.7.2 Características de los dispositivos prácticos	16
1.7.3 Especificaciones de un conmutador	18
1.8 Dispositivos semiconductores de potencia	19
1.9 Características de control de dispositivos de potencia	25
1.10 Opciones de dispositivos	25
1.11 Módulos de potencia	29
1.12 Módulos inteligentes	29
1.13 Diarios y conferencias sobre electrónica de potencia	31
Resumen	32
Referencias	32
Preguntas de repaso	33
Problemas	33
PARTE I Diodos de potencia y rectificadores	35
Capítulo 2 Diodos de potencia y circuitos <i>RLC</i> conmutados	35
2.1 Introducción	36
2.2 Lo básico de los semiconductores	36
2.3 Características del diodo	38
2.4 Características de recuperación inversa	41
2.5 Tipos de diodos de potencia	44
2.5.1 Diodos de uso general	44
2.5.2 Diodos de recuperación rápida	45
2.5.3 Diodos Schottky	46

2.6	Diodos de carburo de silicio	46
2.7	Diodos Schottky de carburo de silicio	47
2.8	Modelo SPICE de diodo	48
2.9	Diodos conectados en serie	49
2.10	Diodos conectados en paralelo	53
2.11	Carga RC conmutada por diodo	54
2.12	Carga RL conmutada por diodo	56
2.13	Carga LC conmutada por diodo	58
2.14	Carga RLC conmutada por diodo	61
2.15	Diodos de conducción libre con carga RL conmutada	65
2.16	Recuperación de la energía atrapada con un diodo	68
	Resumen	72
	Referencias	72
	Preguntas de repaso	73
	Problemas	73
Capítulo 3	Diodos rectificadores	79
3.1	Introducción	80
3.2	Parámetros de desempeño	80
3.3	Rectificadores monofásicos de media onda	82
3.4	Rectificador monofásico de onda completa con carga RL	85
3.5	Rectificador monofásico de onda completa con una carga altamente inductiva	92
3.6	Rectificadores multifásicos en estrella	94
3.7	Rectificadores trifásicos	98
3.8	Rectificador trifásico conectado a una carga RL	102
3.9	Rectificador trifásico con carga altamente inductiva	106
3.10	Comparaciones de diodos rectificadores	108
3.11	Diseño de un circuito rectificador	108
3.12	Voltaje de salida con filtro LC	120
3.13	Efectos de las inductancias de la fuente y la carga	124
3.14	Consideraciones prácticas para seleccionar inductores y capacitores	127
3.14.1	Capacitores de película de ca	127
3.14.2	Capacitores de cerámica	128
3.14.3	Capacitores electrolíticos de aluminio	128
3.14.4	Capacitores de tantalio sólido	129
3.14.5	Supercapacitores	129
	Resumen	129
	Referencias	129
	Preguntas de repaso	130
	Problemas	130
PARTE II	Transistores de potencia y convertidores de CD a CD	134
Capítulo 4	Transistores de potencia	134
4.1	Introducción	135
4.2	Transistores de carburo de silicio	136
4.3	MOSFETs de potencia	137

4.3.1	Características en estado estable	140
4.3.2	Características de conmutación	143
4.3.3	MOSFETs de carburo de silicio	145
4.4	COOLMOS	147
4.5	Transistores de efecto de campo de unión (JFETs)	149
4.5.1	Funcionamiento y características de los JFETs	149
4.5.2	Estructuras de JFET de carburo de silicio	153
4.6	Transistores bipolares de unión	156
4.6.1	Características de estado estable	157
4.6.2	Características de conmutación	161
4.6.3	Límites de conmutación	168
4.6.4	BJTs de carburo de silicio	169
4.7	IGBTs	170
4.7.1	IGBTs de carburo de silicio	173
4.8	SITs	174
4.9	Comparaciones de transistores	175
4.10	Reducción de potencia de transistores de potencia	175
4.11	Limitaciones de di/dt y dv/dt	179
4.12	Funcionamiento en serie y en paralelo	182
4.13	Modelos SPICE	184
4.13.1	Modelo SPICE de un BJT	184
4.13.2	Modelo SPICE de MOSFET	186
4.13.3	Modelo SPICE de IGBT	187
4.14	Control de compuerta de MOSFET	189
4.15	Control de compuerta de JFET	191
4.16	Excitación de base de BJT	192
4.17	Aislamiento de compuerta y excitadores de base	197
4.17.1	Transformadores de pulsos	199
4.17.2	Optoacopladores	199
4.18	Circuitos integrados de excitación de compuerta	200
	Resumen	202
	Referencias	203
	Preguntas de repaso	206
	Problemas	208

Capítulo 5 Convertidores CD-CD 210

5.1	Introducción	211
5.2	Parámetros de desempeño de convertidores CD-CD	211
5.3	Principio de la operación de reducción	212
5.3.1	Generación del ciclo de trabajo	216
5.4	Convertidor reductor con carga RL	217
5.5	Principio de la operación de elevación	222
5.6	Convertidor elevador con una carga resistiva	225
5.7	Parámetros que limitan la frecuencia	227
5.8	Clasificación de los convertidores	228
5.9	Reguladores en modo de conmutación	232
5.9.1	Reguladores reductores	233
5.9.2	Reguladores elevadores	237
5.9.3	Reguladores reductores-elevadores	241

5.9.4	Reguladores Cúk	245
5.9.5	Limitaciones de la conversión con una sola etapa	251
5.10	Comparación de los reguladores	252
5.11	Convertidor elevador de múltiples salidas	253
5.12	Convertidor elevador alimentado por diodo rectificador	256
5.13	Modelos promediados de convertidores	258
5.14	Análisis de espacio de estados de reguladores	264
5.15	Consideraciones de diseño para filtro de entrada y convertidores	268
5.16	Circuito integrado excitador para convertidores	273
	Resumen	275
	Referencias	277
	Preguntas de repaso	279
	Problemas	279
PARTE III	Inversores	282
Capítulo 6	Convertidores CD-CA	282
6.1	Introducción	283
6.2	Parámetros de desempeño	283
6.3	Principio de funcionamiento	285
6.4	Puentes inversores monofásicos	289
6.5	Inversores trifásicos	295
6.5.1	Conducción de 180 grados	296
6.5.2	Conducción durante 120 grados	303
6.6	Control de voltaje de inversores monofásicos	306
6.6.1	Modulación por ancho de pulsos múltiples	306
6.6.2	Modulación por ancho de pulso senoidal	309
6.6.3	Modulación por ancho de pulso senoidal modificada	312
6.6.4	Control por desplazamiento de fase	315
6.7	Control de voltaje de inversores trifásicos	316
6.7.1	PWM senoidal	317
6.7.2	PWM de 60 grados	320
6.7.3	PWM por terceros armónicos	320
6.7.4	Modulación por vector espacial	323
6.7.5	Comparación de las técnicas de PWM	335
6.8	Reducciones armónicas	335
6.9	Inversores con fuente de corriente	340
6.10	Inversor de enlace de cd variable	342
6.11	Inversor elevador	344
6.12	Diseño del circuito inversor	349
	Resumen	354
	Referencias	354
	Preguntas de repaso	356
	Problemas	357
Capítulo 7	Inversores de pulsos resonantes	361
7.1	Introducción	362
7.2	Inversores resonantes en serie	362

7.2.1	Inversores resonantes con interruptores unidireccionales	363
7.2.2	Inversores resonantes en serie con interruptores bidireccionales	372
7.3	Respuesta a la frecuencia de inversores resonantes en serie	378
7.3.1	Respuesta de frecuencia para carga en serie	378
7.3.2	Respuesta de frecuencia para carga en paralelo	381
7.3.3	Respuesta de frecuencia para carga en serie-paralelo	383
7.4	Inversores resonantes en paralelo	384
7.5	Control de voltaje de inversores resonantes	388
7.6	Inversor resonante clase E	390
7.7	Rectificador resonante clase E	394
7.8	Convertidores resonantes de conmutación por corriente cero	398
7.8.1	Convertidor resonante ZCS tipo <i>L</i>	399
7.8.2	Convertidor resonante ZCS tipo <i>M</i>	402
7.9	Convertidores resonantes de conmutación por voltaje cero	402
7.10	Comparaciones entre convertidores ZCS y convertidores resonantes ZVS	406
7.11	Convertidores resonantes ZVS de dos cuadrantes	407
7.12	Inversores resonantes de enlace de CD	409
	Resumen	413
	Referencias	414
	Preguntas de repaso	414
	Problemas	415

Capítulo 8 Inversores multinivel 417

8.1	Introducción	417
8.2	Concepto multinivel	418
8.3	Tipos de inversores multinivel	420
8.4	Inversor multinivel con diodo fijador	420
8.4.1	Principio de funcionamiento	421
8.4.2	Características del inversor con diodo fijador	422
8.4.3	Inversor con diodo fijador mejorado	424
8.5	Inversor multinivel con capacitores volantes	426
8.5.1	Principio de funcionamiento	426
8.5.2	Características del inversor con capacitores volantes	428
8.6	Inversor multinivel en cascada	429
8.6.1	Principio de funcionamiento	429
8.6.2	Características del inversor en cascada	431
8.7	Aplicaciones	433
8.7.1	Compensación de potencia reactiva	433
8.7.2	Interconexión espalda con espalda	435
8.7.3	Excitadores de velocidad ajustable	435
8.8	Corrientes de dispositivo de conmutación	436
8.9	Balaceo del voltaje de capacitor de enlace de CD	437
8.10	Características de los inversores multinivel	438
8.11	Comparaciones de convertidores multinivel	439
	Resumen	440
	Referencias	440

	Preguntas de repaso	441
	Problemas	441
PARTE IV	Tiristores y convertidores tiristorizados	443
Capítulo 9	Tiristores	443
9.1	Introducción	443
9.2	Características del tiristor	444
9.3	Modelo de tiristor de dos transistores	447
9.4	Encendido del tiristor	449
9.5	Apagado del tiristor	451
9.6	Tipos de tiristores	453
9.6.1	Tiristores controlados por fase	453
9.6.2	Tiristores bidireccionales controlados por fase	454
9.6.3	Tiristores asimétricos de conmutación rápida	455
9.6.4	Rectificadores controlados de silicio activados por luz	456
9.6.5	Tiristores de triodo bidireccionales	456
9.6.6	Tiristores de conducción inversa	457
9.6.7	Tiristores apagados por compuerta	457
9.6.8	Tiristores controlados por FET	462
9.6.9	MTOs	463
9.6.10	ETOs	464
9.6.11	IGCTs	465
9.6.12	MCTs	466
9.6.13	SITHs	469
9.6.14	Comparaciones de tiristores	470
9.7	Funcionamiento en serie de tiristores	475
9.8	Funcionamiento en paralelo de tiristores	478
9.9	Protección contra di/dt	479
9.10	Protección contra dv/dt	480
9.11	Modelo SPICE de tiristor	482
9.11.1	Modelo SPICE de tiristor	482
9.11.2	Modelo SPICE de GTO	484
9.11.3	Modelo SPICE de MCT	486
9.11.4	Modelo SPICE de SITH	486
9.12	DIACs	486
9.13	Circuitos de disparo de tiristor	489
9.14	Transistor de una unión	492
9.15	Transistor de una unión programable	494
	Resumen	496
	Referencias	497
	Preguntas de repaso	500
	Problemas	501
Capítulo 10	Rectificadores controlados	503
10.1	Introducción	504
10.2	Convertidores monofásicos completos	504
10.2.1	Convertidor monofásico completo con carga RL	508

10.3	Convertidores monofásicos duales	511
10.4	Convertidores trifásicos completos	514
10.4.1	Convertidor trifásico completo con carga <i>RL</i>	518
10.5	Convertidores trifásicos duales	520
10.6	Control de modulación por ancho de pulso	523
10.6.1	Control de PWM	524
10.6.2	PWM senoidal monofásica	526
10.6.3	Rectificador trifásico de PWM	527
10.7	Convertidores monofásicos en serie	531
10.8	Convertidores de doce pulsos	534
10.9	Diseño de circuitos de convertidor	536
10.10	Efectos de las inductancias de carga y fuente	542
	Resumen	544
	Referencias	544
	Preguntas de repaso	546
	Problemas	546

Capítulo 11 Controladores de voltaje de CA 552

11.1	Introducción	553
11.2	Parámetros de desempeño de controladores de voltaje de CA	554
11.3	Controladores monofásicos de onda completa con cargas resistivas	555
11.4	Controladores monofásicos de onda completa con cargas inductivas	559
11.5	Controladores trifásicos de onda completa	563
11.6	Controladores trifásicos de onda completa conectados en delta	568
11.7	Cambiadores de conexión de transformador monofásico	572
11.8	Cicloconvertidores	577
11.8.1	Cicloconvertidores monofásicos	577
11.8.2	Cicloconvertidores trifásicos	580
11.8.3	Reducción de los armónicos de salida	581
11.9	Controladores de voltaje de ca con control de PWM	584
11.10	Convertidor matricial	586
11.11	Diseño de circuitos de controlador de voltaje de CA	588
11.12	Efectos de las inductancias de fuente y carga	596
	Resumen	597
	Referencias	597
	Preguntas de repaso	598
	Problemas	598

Los capítulos 12 a 15 se encuentran en español en el sitio Web del libro

PARTE V Electrónica de potencia: aplicaciones y protecciones 602

Capítulo 12 Sistemas flexibles de transmisión de ca 602

12.1	Introducción	603
12.2	Principio de transmisión de potencia	604
12.3	Principio de compensación en derivación	606

12.4	Compensadores en derivación	608
12.4.1	Reactor controlado por tiristor	608
12.4.2	Capacitor conmutado por tiristor	609
12.4.3	Compensador de VAR estático	612
12.4.4	Compensador de VAR estático avanzado	613
12.5	Principio de compensación en serie	615
12.6	Compensadores en serie	617
12.6.1	Capacitor en serie conmutado por tiristor	617
12.6.2	Capacitor en serie controlado por tiristor	619
12.6.3	Capacitor en serie controlado por conmutación forzada	620
12.6.4	Compensador de VAR estático en serie	621
12.6.5	SSVC avanzado	621
12.7	Principio de compensación por ángulo de fase	624
12.8	Compensador de ángulo de fase	627
12.9	Controlador de flujo de potencia unificado	628
12.10	Comparaciones de compensadores	629
	Resumen	631
	Referencias	631
	Preguntas de repaso	632
	Problemas	632

Capítulo 13 Fuentes de alimentación 634

13.1	Introducción	635
13.2	Fuentes de alimentación de cd	635
13.2.1	Fuentes de alimentación de cd en modo conmutado	636
13.2.2	Convertidor de retorno	636
13.2.3	Convertidor directo	640
13.2.4	Convertidor balanceado	645
13.2.5	Convertidor de medio puente	647
13.2.6	Convertidor de puente completo	650
13.2.7	Fuentes de alimentación de cd resonantes	653
13.2.8	Fuentes de alimentación bidireccionales	655
13.3	Fuentes de alimentación de ca	655
13.3.1	Fuentes de alimentación de ca en modo conmutado	657
13.3.2	Fuentes de alimentación de ca resonantes	657
13.3.3	Fuentes de alimentación de ca bidireccionales	658
13.4	Conversiones en múltiples etapas	659
13.5	Circuitos de control	660
13.6	Consideraciones de diseño magnético	664
13.6.1	Diseño del transformador	664
13.6.2	Inductor de cd	668
13.6.3	Saturación magnética	669
	Resumen	670
	Referencias	670
	Preguntas de repaso	671
	Problemas	671

Capítulo 14	Propulsores de cd	675
14.1	Introducción	676
14.2	Características básicas de los motores de cd	677
14.2.1	Motor de cd de excitación independiente	677
14.2.2	Motor de cd de excitación en serie	680
14.2.3	Relación de engranes	682
14.3	Modos de funcionamiento	684
14.4	Propulsores monofásicos	686
14.4.1	Propulsores monofásicos de semiconvertidor	688
14.4.2	Propulsores monofásicos de convertidor completo	689
14.4.3	Propulsores monofásicos de convertidor dual	690
14.5	Propulsores trifásicos	694
14.5.1	Propulsores trifásicos de semiconvertidor	694
14.5.2	Propulsores trifásicos de convertidor completo	694
14.5.3	Propulsores trifásicos de convertidor dual	695
14.6	Propulsores de convertidor cd-cd	698
14.6.1	Principio del control de potencia	698
14.6.2	Principio del control de freno regenerativo	700
14.6.3	Principio del control de freno reostático	703
14.6.4	Principio del control de frenado combinado regenerativo y reostático	704
14.6.5	Propulsores de convertidor cd-cd de dos y cuatro cuadrantes	705
14.6.6	Convertidores cd-cd multifásicos	706
14.7	Control de lazo cerrado de propulsores de cd	709
14.7.1	Función de transferencia de lazo abierto	709
14.7.2	Función de transferencia de lazo abierto de motores de excitación independiente	710
14.7.3	Función de transferencia de lazo abierto de motores excitados en serie	713
14.7.4	Modelos de control de convertidor	715
14.7.5	Función de transferencia de lazo cerrado	717
14.7.6	Control de corriente de lazo cerrado	720
14.7.7	Diseño de un controlador de corriente	724
14.7.8	Diseño de un controlador de velocidad	725
14.7.9	Propulsor alimentado por convertidor cd-cd	729
14.7.10	Control de lazo de fase sincronizada	730
14.7.11	Control de propulsores de cd por microcomputadora	732
	Resumen	734
	Referencias	734
	Preguntas de repaso	735
	Problemas	736
Capítulo 15	Propulsores de ca	740
15.1	Introducción	741
15.2	Propulsores de motores de inducción	741
15.2.1	Características de desempeño	743
15.2.2	Características de par motor-velocidad	745

15.2.3	Control por voltaje del estator	750
15.2.4	Control por voltaje del rotor	754
15.2.5	Control por frecuencia	763
15.2.6	Control por voltaje y frecuencia	765
15.2.7	Control por corriente	770
15.2.8	Control por velocidad de deslizamiento constante	775
15.2.9	Control por voltaje, corriente y frecuencia	776
15.3	Control de lazo cerrado de motores de inducción	778
15.4	Dimensionamiento de las variables de control	782
15.5	Controles vectoriales	784
15.5.1	Principio básico del control vectorial	784
15.5.2	Transformación directa y del eje de cuadratura	786
15.5.3	Control vectorial indirecto	791
15.5.4	Control vectorial directo	795
15.6	Propulsores de motor sincrónico	797
15.6.1	Motores de rotor cilíndrico	798
15.6.2	Motores de polos salientes	801
15.6.3	Motores de reluctancia	802
15.6.4	Motores de reluctancia conmutados	803
15.6.5	Motores de imán permanente	805
15.6.6	Control de lazo cerrado de motores sincrónicos	808
15.6.7	Propulsores de motor de cd y ca sin escobillas	810
15.7	Diseño de un controlador de velocidad para propulsores de motores sincrónicos de imán permanente (PMSM)	812
15.7.1	Diagrama de bloques del sistema	812
15.7.2	Lazo de corriente	814
15.7.3	Controlador de velocidad	815
15.8	Control de un motor de pasos	818
15.8.1	Motores de pasos de reluctancia variable	818
15.8.2	Motores de pasos de imán permanente	821
15.9	Motores de inducción lineal	825
15.10	Circuito integrado de alto voltaje para propulsores de motor	828
	Resumen	833
	Referencias	834
	Preguntas de repaso	835
	Problemas	836

Los capítulos 16 y 17 se encuentran en inglés en el sitio Web del libro

Chapter 16	Introduction to Renewable Energy	840
16.1	Introduction	841
16.2	Energy and Power	842
16.3	Renewable Energy Generation System	843
16.3.1	Turbine	844
16.3.2	Thermal Cycle	845

16.4	Solar Energy Systems	847
16.4.1	Solar Energy	847
16.4.2	Photovoltaic	850
16.4.3	Photovoltaic Cells	850
16.4.4	PV Models	851
16.4.5	Photovoltaic Systems	857
16.5	Wind Energy	860
16.5.1	Wind Turbines	860
16.5.2	Turbine Power	861
16.5.3	Speed and Pitch Control	864
16.5.4	Power Curve	865
16.5.5	Wind Energy Systems	866
16.5.6	Doubly Fed Induction Generators	869
16.5.7	Squirrel-Cage Induction Generators	870
16.5.8	Synchronous Generators	871
16.5.9	Permanent-Magnet Synchronous Generators	872
16.5.10	Switched Reluctance Generator	873
16.5.11	Comparisons of the Wind Turbine Power Configurations	873
16.6	Ocean Energy	874
16.6.1	Wave Energy	874
16.6.2	Mechanism of Wave Generation	875
16.6.3	Wave Power	876
16.6.4	Tidal Energy	879
16.6.5	Ocean Thermal Energy Conversion	881
16.7	Hydropower Energy	882
16.7.1	Large-Scale Hydropower	882
16.7.2	Small-Scale Hydropower	883
16.8	Fuel Cells	886
16.8.1	Hydrogen Generation and Fuel Cells	887
16.8.2	Types of Fuel Cells	888
16.8.3	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)	889
16.8.4	Direct-Methanol Fuel Cells (DMFC)	890
16.8.5	Alkaline Fuel Cells (AFC)	892
16.8.6	Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)	893
16.8.7	Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)	894
16.8.8	Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)	895
16.8.9	Thermal and Electrical Processes of Fuel Cells	896
16.9	Geothermal Energy	900
16.10	Biomass Energy	900
	Summary	901
	References	901
	Review Questions	902
	Problems	903
Chapter 17	Protections of Devices and Circuits	907
17.1	Introduction	907
17.2	Cooling and Heat Sinks	908

17.3	Thermal Modeling of Power Switching Devices	913
17.3.1	Electrical Equivalent Thermal Model	914
17.3.2	Mathematical Thermal Equivalent Circuit	916
17.3.3	Coupling of Electrical and Thermal Components	917
17.4	Snubber Circuits	919
17.5	Reverse Recovery Transients	920
17.6	Supply- and Load-Side Transients	926
17.7	Voltage Protection by Selenium Diodes and Metaloxide Varistors	929
17.8	Current Protections	931
17.8.1	Fusing	931
17.8.2	Fault Current with Ac Source	934
17.8.3	Fault Current with Dc Source	936
17.9	Electromagnetic Interference	939
17.9.1	Sources of EMI	940
17.9.2	Minimizing EMI Generation	940
17.9.3	EMI Shielding	941
17.9.4	EMI Standards	941
	Summary	942
	References	943
	Review Questions	943
	Problems	944
Apéndice A	Circuitos trifásicos	A-1
Apéndice B	Circuitos magnéticos	A-5
Apéndice C	Funciones de conmutación de convertidores	A-13
Apéndice D	Análisis transitorio de CD	A-19
Apéndice E	Análisis de Fourier	A-23
Apéndice F	Transformación en un marco de referencia	A-26
Bibliografía		B-1
Respuestas a problemas seleccionados		R-1
Índice		I-1