



# *Contenido*

## **CAPITULO 1 INTRODUCCION 1**

- 1-1 Aplicaciones de la electrónica de potencia, 1
- 1-2 Historia de la electrónica de potencia, 2
- 1-3 Dispositivos semiconductores de potencia, 5
- 1-4 Características de control de los dispositivos de potencia, 10
- 1-5 Tipos de circuitos electrónicos de potencia, 12
- 1-6 Diseño de equipo de electrónica de potencia, 15
- 1-7 Efectos periféricos, 15
- 1-8 Módulos de potencia, 16
- 1-9 Módulos inteligentes, 17
- 1-10 Publicaciones periódicas y conferencias sobre electrónica de potencia, 17
  - Resumen, 18
  - Referencias, 18
  - Preguntas de repaso, 19

## CAPITULO 2 DIODOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

20

- 2-1 Introducción, 20
- 2-2 Características de diodos, 20
- 2-3 Características de la recuperación inversa, 23
- 2-4 Tipos de diodos de potencia, 25
  - 2-4.1 Diodos de uso general, 25
  - 2-4.2 Diodos de recuperación rápida, 25
  - 2-4.3 Diodos Schottky, 26
- 2-5 Efectos del tiempo de recuperación directa e inversa, 27
- 2-6 Diodos conectados en serie, 29
- 2-7 Diodos conectados en paralelo, 31
- 2-8 Modelo SPice de diodo, 32
  - Resumen, 34
  - Referencias, 35
  - Preguntas de repaso, 35
  - Problemas, 35

## CAPITULO 3 CIRCUITOS CON DIODOS Y CIRCUITOS RECTIFICADORES

37

- 3-1 Introducción, 37
- 3-2 Diodos con cargas  $RC$  y  $RL$ , 37
- 3-3 Diodos con cargas  $LC$  y  $RLC$ , 40
- 3-4 Diodos de marcha libre, 46
- 3-5 Recuperación de la energía atrapada con un diodo, 48
- 3-6 Rectificadores monofásicos de media onda, 51
- 3-7 Parámetros de rendimiento, 52
- 3-8 Rectificadores monofásicos de onda completa, 59
- 3-9 Rectificador monofásico de onda completa con carga  $RL$ , 63
- 3-10 Rectificadores multifase en estrella, 67
- 3-11 Rectificadores trifásicos en puente, 71
- 3-12 Rectificador trifásico con carga  $RL$ , 74
- 3-13 Diseño de circuitos rectificadores, 76
- 3-14 Voltaje de salida con filtro  $LC$ , 85
- 3-15 Efectos de las inductancias de la fuente y de la carga, 88
  - Resumen, 90
  - Referencias, 91
  - Preguntas de repaso, 91
  - Problemas, 91

## CAPITULO 4 TIRISTORES

96

- 4-1 Introducción, 96
- 4-2 Características de los tiristores, 96

- 4-3 Modelo de tiristor de dos transistores, 98
- 4-4 Activación del tiristor, 100
- 4-5 Protección contra  $di/dt$ , 102
- 4-6 Protección contra  $dv/dt$ , 103
- 4-7 Desactivación del tiristor, 105
- 4-8 Tipos de tiristores, 106
  - 4-8.1 Tiristores de control de fase, 107
  - 4-8.2 Tiristores de conmutación rápida, 107
  - 4-8.3 Tiristores de desactivado por compuerta, 108
  - 4-8.4 Tiristores de triodo bidireccional, 109
  - 4-8.5 Tiristores de conducción inversa, 110
  - 4-8.6 Tiristores de inducción estática, 111
  - 4-8.7 Rectificadores controlados de silicio fotoactivados por luz, 111
  - 4-8.8 Tiristores controlados por FET, 112
  - 4-8.9 Tiristor controlados por MOS, 112
- 4-9 Operación en serie de tiristores, 114
- 4-10 Operación en paralelo de tiristores, 117
- 4-11 Circuitos de disparo de tiristor, 118
- 4-12 Transistor monounión, 120
- 4-13 Transistor monounión programable, 123
- 4-14 Modelo SPice para el tiristor, 124
  - Resumen, 126
  - Referencias, 127
  - Preguntas de repaso, 128
  - Problemas, 128

## **CAPITULO 5 RECTIFICADORES CONTROLADOS 130**

- 5-1 Introducción, 130
- 5-2 Principio de operación del convertidor controlado por fase, 131
- 5-3 Semiconvertidores monofásicos, 133
  - 5-3.I Semiconvertidor monofásico con carga  $RL$ , 136
- 5-4 Convertidores monofásicos completos, 138
  - 5-4.1 Convertidor monofásico completo con carga  $RL$ , 141
- 5-5 Convertidores monofásicos duales, 143
- 5-6 Convertidores monofásicos en serie, 145
- 5-7 Convertidores trifásicos de media onda, 150
- 5-8 Semiconvertidores trifásicos, 153
  - 5-8.1 Semiconvertidores trifásicos con carga  $RL$ , 157
- 5-9 Convertidores trifásicos completos, 158
  - 5-9.1 Convertidor trifásico completo con carga  $RL$ , 164
- 5-10 Convertidores trifásicos duales, 165

- 5-11 Mejoras al factor de potencia, 167
  - 5-11.1 Control del ángulo de extinción, 167
  - 5-11.2 Control del ángulo simétrico, 169
  - 5-11.3 Control por modulación del ancho de pulso, 172
  - 5-11.4 Modulación senoidal del ancho de pulso, 175
- 5-12 Diseño de circuitos convertidores, 176
- 5-13 Efectos de las inductancias de carga y de alimentación, 182
- 5-14 Circuitos de disparo, 184
  - Resumen, 184
  - Referencias, 186
  - Preguntas de repaso, 186
  - Problemas, 187

## **CAPITULO 6 CONTROLADORES DE VOLTAJE CA 190**

- 6-1 Introducción, 190
- 6-2 Principio del control de abrir y cerrar, 191
- 6-3 Principio del control de fase, 193
- 6-4 Controladores bidireccionales monofásicos con cargas resistivas, 195
- 6-5 Controladores monofásico con cargas inductivas, 198
- 6-6 Controladores trifásicos de media onda, 201
- 6-7 Controladores trifásicos de onda completa, 206
- 6-8 Controladores trifásicos bidireccionales conectados en delta, 210
- 6-9 Cambiadores de derivaciones de un transformador monofásico, 214
- 6-10 Cicloconvertidores, 218
  - 6-10.1 Cicloconvertidores monofásicos, 219
  - 6-10.2 Cicloconvertidores trifásicos, 221
  - 6-10.3 Reducción de armónicas de salida, 222
- 6-11 Controladores de voltaje de ca con control PWM, 225
- 6-12 Diseño de circuitos de controladores de voltaje ca, 226
- 6-13 Efectos de las inductancias en alimentación y en la carga, 233
  - Resumen, 234
  - Referencias, 234
  - Preguntas de repaso, 235
  - Problemas, 236

## **CAPITULO 7 TECNICAS DE CONMUTACION DE TIRISTORES 239**

- 7-1 Introducción, 239
- 7-2 Conmutación natural, 240
- 7-3 Conmutación forzada, 240
  - 7-3.1 Autoconmutación, 241
  - 7-3.2 Conmutación por impulso, 243

- 7-3.3 Conmutación por pulso resonante, 246
- 7-3.4 Conmutación complementaria, 250
- 7-3.5 Conmutación por pulso externo, 251
- 7-3.6 Conmutación del lado de la carga, 252
- 7-3.7 Conmutación del lado de la línea, 252
- 7-4 Diseño de circuitos de conmutación, 254
- 7-5 Modelo SPice del tiristor de cd, 256
- 7-6 Capacitores de conmutación, 259
  - Resumen, 259
  - Referencias, 260
  - Preguntas de repaso, 260
  - Problemas, 260

## **CAPITULO 8 TRANSISTORES DE POTENCIA 262**

- 8-1 Introducción, 262
- 8-2 Transistores de unión bipolar, 263
  - 8-2.1 Características en régimen permanente, 263
  - 8-2.2 Características de conmutación, 267
  - 8-2.3 Límites de conmutación, 274
  - 8-2.4 Control de la excitación de la base, 276
- 8-3 MOSFET de potencia, 280
  - 8-3.1 Características en régimen permanente, 280
  - 8-3.2 Características de conmutación, 284
  - 8-3.3 Excitación de compuerta, 285
- 8-4 SIT, 286
- 8-5 IGBT, 287
- 8-6 Operación en serie y en paralelo, 289
- 8-7 Limitaciones por  $di/dt$  y  $dv/dt$ , 291
- 8-8 Aislamiento de las excitaciones de compuerta y de base, 294
  - 8-8.1 Transformadores de pulso, 295
  - 8-8.2 Acopladores ópticos, 295
- 8-9 Modelos SPice, 296
  - Resumen, 299
  - Referencias, 299
  - Preguntas de repaso, 300
  - Problemas, 301

## **CAPITULO 9 PULSADORES DE CD 303**

- 9-1 Introducción, 303
- 9-2 Principio de la operación reductora, 303
- 9-3 Pulsador reductor con carga  $RL$ , 306

- 9-4 Principio de operación elevadora, 309
- 9-5 Parámetros de rendimiento, 312
- 9-6 Clasificación de pulsadores, 312
- 9-7 Reguladores en modo conmutado, 316
  - 9-7.1 Reguladores reductores, 317
  - 9-7.2 Reguladores elevadores, 320
  - 9-7.3 Reguladores reductores-elevadores, 323
  - 9-7.4 Reguladores Cúk, 326
  - 9-7.5 Limitaciones de la conversión en un paso, 330
- 9-8 Circuitos pulsadores con tiristores, 331
  - 9-8.1 Pulsadores conmutados por impulso, 331
  - 9-8.2 Efectos de las inductancias de la alimentación y de la carga, 336
  - 9-8.3 Pulsadores de tres tiristores conmutados por impulso, 337
  - 9-8.4 Pulsadores de pulso resonante, 338
- 9-9 Diseño de un circuito pulsador, 342
- 9-10 Consideraciones magnéticas, 350
  - Resumen, 351
  - Referencias, 351
  - Preguntas de repaso, 352
  - Problemas, 353

## **CAPITULO 10 INVERSORES DE MODULACION DE ANCHO DE PULSO**

**356**

- 10-1 Introducción, 356
- 10-2 Principio de operación, 357
- 10-3 Parámetros de rendimiento, 359
- 10-4 Inversores monofásicos en puente, 360
- 10-5 Inversores trifásicos, 364
  - 10-5.1 Conducción a 180°, 364
  - 10-5.2 Conducción a 120°, 370
- 10-6 Control de voltaje de inversores monofásicos, 372
  - 10-6.1 Modulación de un solo ancho de pulso, 372
  - 10-6.2 Modulación varios anchos de pulso, 374
  - 10-6.3 Modulación senoidal del ancho de pulso, 376
  - 10-6.4 Modulación senoidal modificada del ancho de pulso, 378
  - 10-6.5 Control por desplazamiento de fase, 380
- 10-7 Control de voltaje en inversores trifásicos, 381
- 10-8 Técnicas avanzadas de modulación, 382
- 10-9 Reducción de armónicas, 387
- 10-10 Inversores con tiristor por conmutación forzada, 390
  - 10-10.1 Inversores con conmutación auxiliar, 391
  - 10-10.2 Inversores de conmutación complementaria, 393

- 10-11 Inversores de fuente de corriente, 400
- 10-12 Inversor de enlace de cd variable, 402
- 10-13 Diseño de circuitos inversores, 404
- 10-14 Consideraciones magnéticas, 410
  - Resumen, 410
  - Referencias, 410
  - Preguntas de repaso, 411
  - Problemas, 412

## **CAPITULO 11 CONVERTIDORES DE PULSO RESONANTE 414**

- 11-1 Introducción, 414
- 11-2 Inversores resonantes en serie, 415
  - 11-2.1 Inversores resonantes en serie con interruptores unidireccionales, 415
  - 11-2.2 Inversores resonantes en serie con interruptores bidireccionales, 422
  - 11-2.3 Respuesta de frecuencia para cargas en serie, 428
  - 11-2.4 Respuesta de frecuencia para carga en paralelo, 431
  - 11-2.5 Respuesta de frecuencia para cargas en serie-paralelo, 433
- 11-3 Inversores resonantes en paralelo, 434
- 11-4 Inversor resonante de clase E, 439
- 11-5 Rectificador resonante de clase E, 443
- 11-6 Convertidores resonantes de conmutación a corriente cero, 446
  - 11-6.1 Convertidor resonante ZCS de tipo L, 446
  - 11-6.2 Convertidor resonante ZCS de tipo M, 451
- 11-7 Convertidores resonantes de conmutación a voltaje cero, 451
- 11-8 Convertidores resonantes de conmutación a voltaje cero en dos cuadrantes, 454
- 11-9 Inversores resonantes de enlace cd, 457
  - Resumen, 460
  - Referencias, 461
  - Preguntas de repaso, 462
  - Problemas, 462

## **CAPITULO 12 INTERRUPTORES ESTATICOS 464**

- 12-1 Introducción, 464
- 12-2 Interruptores monofásicos de ca, 464
- 12-3 Interruptores trifásicos de ca, 467
- 12-4 Interruptores inversores trifásicos, 469
- 12-5 Interruptores de ca para transferencia de bus, 470
- 12-6 Interruptores de cd, 471
- 12-7 Relevadores de estado sólido, 472
- 12-8 Diseño de interruptores estáticos, 474
  - Resumen, 474

Referencias, 475  
Preguntas de repaso, 475  
Problemas, 475

## **CAPITULO 13 FUENTES DE PODER 477**

- 13-1 Introducción, 477
- 13-2 Fuentes de poder de cd, 478
  - 13-2.1 Fuentes de poder de cd en modo de conmutación, 478
  - 13-2.2 Fuentes de poder de cd resonantes, 481
  - 13-2.3 Fuentes de poder bidireccionales de ca, 481
- 13-3 Fuentes de poder de ca, 483
  - 13-3.1 Fuentes de poder de ca en modo interrumpido, 485
  - 13-3.2 Fuentes de poder de ca resonantes, 486
  - 13-3.3 Fuentes de poder de ca bidireccionales, 486
- 13-4 Conversiones multietapas, 487
- 13-5 Acondicionamiento del factor de potencia, 487
- 13-6 Consideraciones magnéticas, 488
  - Resumen, 490
  - Referencias, 490
  - Preguntas de repaso, 491
  - Problemas, 491

## **CAPITULO 14 PROPULSORES DE CD 493**

- 14-1 Introducción, 493
- 14-2 Características básicas de los motores de cd, 494
- 14-3 Modos de operación, 498
- 14-4 Propulsores monofásicos, 501
  - 14-4.1 Propulsores de convertidor de media onda monofásico, 501
  - 14-4.2 Propulsores de semiconvertidor monofásico, 503
  - 14-4.3 Propulsores de convertidor completo monofásico, 504
  - 14-4.4 Propulsores de convertidor dual monofásico, 505
- 14-5 Propulsores trifásicos, 508
  - 14-5.1 Propulsores de convertidor trifásico de media onda, 509
  - 14-5.2 Propulsores de semiconvertidor trifásico, 509
  - 14-5.3 Propulsores de convertidor trifásico completo, 509
  - 14-5.4 Propulsores de convertidor trifásico dual, 510
- 14-6 Propulsores de pulsador, 513
  - 14-6.1 Principio de control de potencia, 514
  - 14-6.2 Principio de control de freno regenerativo, 515
  - 14-6.3 Principio de control de freno reostático, 518
  - 14-6.4 Principio de control combinado de freno regenerativo y reostático, 519

- 14-6.5 Propulsores pulsadores de dos y cuatro cuadrantes, 520
- 14-6.6 Pulsadores multifase, 522
- 14-7 Control en lazo cerrado de los propulsores de cd, 524
  - 14-7.1 Función de transferencia en lazo abierto, 524
  - 14-7.2 Función de transferencia en lazo cerrado, 528
  - 14-7.3 Control en lazo por seguimiento de fase, 533
  - 14-7.4 Control por microcomputadora de propulsores de cd, 534
- Resumen, 535
- Referencias, 536
- Preguntas de repaso, 536
- Problemas, 537

## **CAPITULO 15 PROPULSORES DE CA 541**

- 15-1 Introducción, 541
- 15-2 Propulsores de motores de inducción, 542
  - 15-2.1 Características de rendimiento, 543
  - 15-2.2 Control del voltaje del estator, 549
  - 15-2.3 Control del voltaje del rotor, 552
  - 15-2.4 Control por frecuencia, 559
  - 15-2.5 Control de voltaje y de frecuencia, 561
  - 15-2.6 Control de corriente, 563
  - 15-2.7 Control de voltaje, corriente, y frecuencia, 566
  - 15-2.8 Control en lazo cerrado de motores de inducción, 568
- 15-3 Propulsores de motores síncronos, 573
  - 15-3.1 Motores de rotor cilíndrico, 575
  - 15-3.2 Motores de polos salientes, 578
  - 15-3.3 Motores de reluctancia, 579
  - 15-3.4 Motores de imán permanente, 580
  - 15-3.5 Motores de reluctancia conmutada, 581
  - 15-3.6 Control en lazo cerrado de motores síncronos, 582
  - 15-3.7 Propulsores de motor de cd y ca sin escobillas, 582
- Resumen, 586
- Referencias, 587
- Preguntas de repaso, 588
- Problemas, 588

## **CAPITULO 16 PROTECCION DE DISPOSITIVOS Y CIRCUITOS 591**

- 16-1 Introducción, 591
- 16-2 Enfriamiento y disipadores de calor, 591
- 16-3 Circuitos de apoyo, 597
- 16-4 Transitorios de recuperación inversa, 597

- 16-5 Transitorios del lado de alimentación y del lado de carga, 603
- 16-6 Protección de voltaje mediante diodos de selenio y varistores de óxido metálico, 606
- 16-7 Protecciones de corriente, 607
  - 16-7.1 Cómo utilizar los fusibles, 608
  - 16-7.2 Corriente de falla con fuente de ca, 615
  - 16-7.3 Corriente de falla con fuente de cd, 617
- Resumen, 620
- Referencias, 620
- Preguntas de repaso, 620
- Problemas, 621

<b>APENDICE A</b>	<b>CIRCUITOS TRIFASICOS</b>	<b>624</b>
<b>APENDICE B</b>	<b>CIRCUITOS MAGNETICOS</b>	<b>628</b>
<b>APENDICE C</b>	<b>FUNCIONES DE CONMUTACION DE LOS CONVERTIDORES</b>	<b>633</b>
<b>APENDICE D</b>	<b>ANALISIS DE TRANSITORIOS EN CD</b>	<b>639</b>
<b>APENDICE E</b>	<b>ANALISIS DE FOURIER</b>	<b>643</b>
<b>APENDICE F</b>	<b>LISTADO DE PROGRAMAS DE COMPUTO EN IBM-PC BASICA</b>	<b>646</b>
<b>APENDICE G</b>	<b>HOJAS DE DATOS</b>	<b>656</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>695</b>
<b>INDICE</b>		<b>697</b>