

Inhaltsverzeichnis

Liste der Beispiele und Abbildungen zur Simulation und Hardwareimplementierung	<i>xv</i>
Vorwort des Übersetzers	<i>xvii</i>
Spezieller Dank	<i>xix</i>
Vorwort	<i>xxi</i>
Dank	<i>xxiii</i>
Über die begleitende Website	<i>xxv</i>
Der Übersetzer	<i>xxvii</i>

1	Leistungselektronik: Eine Basistechnologie	1
1.1	Einführung in die Leistungselektronik	1
1.2	Anwendungen und die Rolle der Leistungselektronik	2
1.2.1	Stromversorgungen in der Informationstechnologie	2
1.2.2	Robotik und flexible Produktion	3
1.3	Leistungselektronik und erneuerbare Energien	4
1.3.1	Energiesparmaßnahmen	4
1.3.1.1	Elektromotorisch betriebene Systeme	5
1.3.1.2	Beleuchtung mit LEDs	5
1.3.1.3	Transport und Verkehr	5
1.3.2	Erneuerbare Energien	6
1.3.3	Leistungselektronik in der Energieversorgung	7
1.3.4	Raumfahrt- und militärische Anwendungen	8
1.4	Effizienz und Leistungsdichte	8
1.5	Struktur von Wandler-Systemen	9
1.5.1	Spannungszwischenkreise	10
1.5.2	Stromzwischenkreise	10
1.5.3	Direktwandler	11
1.6	Der DC-Spannungszwischenkreis	12
1.6.1	Schaltwandler: Der Leistungsschalter als Grundbaustein	13
1.6.2	Pulsweitenmodulation (PWM)	14

1.6.3	Der Leistungsschalter im DC-DC-Abwärtswandler: Ein Beispiel	15
1.6.3.1	Realisierung des bistabilen Schalters in einem Abwärtswandler	16
1.7	Neueste Entwicklungen bei Wide Bandgap-Halbleiterbauelementen	17
1.8	Simulation und Hardware-Prototyping	18
	Literatur	19
	Übungsbeispiele	19
2	Design des Leistungsschalters	25
2.1	Leistungstransistoren und Leistungsdioden	25
2.2	Wahl der Leistungstransistoren	26
2.2.1	MOSFETs	26
2.2.2	IGBTs	28
2.2.3	Integrierte und intelligente Leistungsmodule	28
2.2.4	Kosten von MOSFETs und IGBTs	29
2.3	Wahl der Leistungsdioden	29
2.4	Schaltcharakteristika und Leistungsverluste in Leistungsschaltern	30
2.4.1	Einschaltverhalten	31
2.4.2	Ausschaltverhalten	33
2.4.3	Leistungsverluste im MOSFET	34
2.4.3.1	Leitverluste	34
2.4.3.2	Schaltverluste	34
2.4.4	Integrierte Gate-Treiber mit eingebauter Schutzschaltung	35
2.5	Rechtfertigung der Annahme von idealen Schaltern und Dioden	36
2.6	Dimensionierungskriterien	37
2.6.1	Schaltfrequenz	37
2.6.2	Auswahl von Transistoren und Dioden	38
2.6.3	Magnetische Komponenten	38
2.6.4	Kondensatoren	38
2.6.5	Thermisches Design	39
2.6.6	Designkompromisse	40
2.7	Der PWM-IC	40
2.8	Hardware-Prototyping	41
	Literatur	42
	Übungsbeispiele	43
3	DC-DC-Schaltwandler: Schaltanalyse, Topologieauswahl und Design	47
3.1	DC-DC-Wandler	47
3.2	Der Leistungsschalter im stationären Gleichstrombetrieb	48
3.3	Vereinfachende Annahmen	51
3.4	Allgemeines Betriebsprinzip	52
3.5	Abwärtswandler im stationären DC-Betrieb	52
3.5.1	Simulation und Hardware-Prototyping	56

3.6	Aufwärtswandler im stationären DC-Betrieb	57
3.6.1	Simulation und Hardware-Prototyping	62
3.7	Inverswandler im stationären DC-Betrieb	64
3.7.1	Simulation und Hardware-Prototyping	68
3.7.2	Andere Inverswandler-Topologien	70
3.7.2.1	SEPIC-Wandler (Single-Ended Primary Inductor Converters)	70
3.7.2.2	Ćuk-Wandler	71
3.8	Topologieauswahl	72
3.9	Worst-Case-Design	73
3.10	Synchron gleichrichtende Abwärtswandler für sehr kleine Spannungen	73
3.10.1	Simulation und Hardware-Prototyping	74
3.11	Verschachtelte Wandler	78
3.12	Regelung von DC-DC-Wandlern durch PWM	78
3.13	Dynamische Mittelwertdarstellung von Wandlern im CCM	79
3.14	Bidirektionale Leistungsschalter	82
3.15	Diskontinuierlicher Strommodus (DCM)	83
3.15.1	Kritischer Lastzustand an der Grenze zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Leitung	84
3.15.2	Abwärtswandler im stationären DCM-Zustand	85
3.15.3	Simulation und Hardware-Prototyping	86
3.15.3.1	Klingeln der Spannung am Leistungsschalter	87
3.15.4	Aufwärtswandler im stationären DCM-Zustand	88
3.15.5	Simulation und Hardware-Prototyping	89
3.15.6	Inverswandler im stationären DCM-Betrieb	91
3.15.7	Simulation und Hardware-Prototyping	92
3.15.8	Mittelwertdarstellung im CCM und DCM für die dynamische Analyse	93
	Literatur	94
	Übungsbeispiele	95
	Anhang 3A: Mittelwertmodell für den diskontinuierlichen Strommodus (DCM)	102
4	Entwurf von Rückkopplungsreglern in Schaltnetzteilen	107
4.1	Einführung und Ziele der Rückkopplungsregelung	107
4.2	Regelungstheorie – Ein Überblick	108
4.2.1	Schleifenübertragungsfunktion $G_L(s)$	109
4.2.2	Die Transitfrequenz f_c	110
4.2.3	Phasen- und Verstärkungsreserve	110
4.3	Linearisierung der verschiedenen Blöcke in der Übertragungsfunktion	111
4.3.1	Linearisierung des Pulsweitenmodulators	111
4.3.2	Linearisierung der Leistungsstufe von DC-DC-Wandlern im CCM	112

- 4.3.2.1 Verwendung von Computersimulation zur Bestimmung von \bar{v}_o/\bar{d} 115
- 4.4 Entwurf eines Rückkopplungsreglers mit Spannungsregelung 117
 - 4.4.1 Das Schritt-für-Schritt-Verfahren 119
 - 4.4.2 Simulation und Hardware-Prototyping 121
- 4.5 Spitzenstromregelung 126
 - 4.5.1 Simulation und Hardware-Prototyping 130
- 4.6 Entwurf von Rückkopplungsreglern im DCM 134
 - Literatur 135
 - Übungsbeispiele 135
 - Anhang 4.A: Bode-Diagramme von Übertragungsfunktionen mit Polen und Nullstellen 137
 - Anhang 4.B: Übertragungsfunktionen im kontinuierlichen Strommodus (CCM) 140
 - Anhang 4.C: Herleitung der Parameter für die Übertragungsfunktionen der Regler 146
- 5 Netzgleichrichter mit Dioden 151**
 - 5.1 Einführung 151
 - 5.2 Verzerrung und Leistungsfaktor 152
 - 5.2.1 Effektivwert von Strömen mit Oberwellen und der Klirrfaktor (THD) 152
 - 5.2.1.1 Bestimmung von harmonischen Komponenten durch Fourier-Analyse 154
 - 5.2.2 Verschiebungsfaktor (DPF) und Leistungsfaktor (PF) 156
 - 5.2.3 Negative Auswirkungen des Klirrfaktors und eines schlechten Leistungsfaktors 158
 - 5.2.3.1 Richtlinien zur Aufrechterhaltung der Stromqualität 158
 - 5.3 Klassifizierung der Schnittstellen zum Stromnetz 160
 - 5.4 Dioden-Brückengleichrichter 160
 - 5.4.1 Einphasen-Brückengleichrichter 161
 - 5.4.1.1 Zwischenkreis-Kondensator zur Reduktion der Welligkeit auf der Gleichspannungsseite 162
 - 5.4.1.2 Auswirkungen von L_s und C_d auf die Signalformen und den Klirrfaktor 164
 - 5.4.2 Simulation mit LTspice 164
 - 5.4.3 Dreiphasen-Brückengleichrichter 165
 - 5.4.3.1 Wirkung des DC-Zwischenkreiskondensators 166
 - 5.4.4 Simulation mit LTspice 168
 - 5.4.5 Vergleich von Einphasen- und Dreiphasengleichrichtern 169
 - 5.5 Maßnahmen zur Vermeidung von Einschaltströmen 169
 - 5.6 Benutzeranwendungen mit bidirektionalem Leistungsfluss 169
 - Literatur 170
 - Übungsbeispiele 170

6	Leistungsfaktorkorrektur und Entwurf des Rückkopplungsreglers	173
6.1	Einführung	173
6.2	Betriebsprinzip von einphasigen PFC-Schaltungen	173
6.3	Regelung von PFCs	177
6.4	Entwurf der inneren Stromregelschleife im Mittelwertmodell	178
6.4.1	Übertragungsfunktion des PWM-Reglers	179
6.4.2	Übertragungsfunktion des Aufwärtswandlers in der Leistungsstufe	179
6.4.3	Entwurf der Übertragungsfunktion des Stromreglers	180
6.5	Entwurf der äußeren Spannungsregelschleife	180
6.6	Beispiel eines Einphasen-PFC-Systems	182
6.6.1	Entwurf der Stromregelschleife	182
6.6.2	Entwurf der Spannungsregelschleife	182
6.6.3	Simulationsergebnisse	183
6.7	Durchleitung der Eingangsspannung	184
6.8	Andere Regelungsmethoden für PFCs	184
	Literatur	185
	Übungsbeispiele	185
	Anhang 6.A	185
	Anhang 6.B	186
7	Magnetische Kreise	189
7.1	Amperewindungszahl und magnetischer Fluss	189
7.2	Induktivität	190
7.2.1	Energiespeicherung in Magnetfeldern	191
7.3	Faradays Gesetz	192
7.4	Streu- und Magnetisierungsinduktivitäten	193
7.4.1	Gegenseitige Induktivitäten	195
7.5	Transformatoren	195
7.5.1	Faradays Gesetz	195
7.5.2	Ampersches Gesetz	196
7.5.3	Transformator Ersatzschaltbild	197
	Literatur	198
	Übungsbeispiele	198
8	DC-Schaltnetzteile	201
8.1	Anwendungen von DC-Schaltnetzteilen	201
8.2	Bedarf an elektrischer Isolation	201
8.3	Klassifizierung von transformatorisierten DC-DC-Wandlern	202
8.4	Sperrwandler	202
8.4.1	Simulation und Hardware-Prototyping: Sperrwandler im CCM ohne Snubber	205
8.4.2	RCD-Snubber	207

8.4.2.1	Stationärer Betrieb des RCD-Snubber	208
8.4.2.2	Design eines RCD-Snubbers	210
8.4.3	Simulation und Hardware-Prototyping: Sperrwandler im CCM mit Snubberschaltung	212
8.4.4	Simulation und Hardware-Prototyping: Sperrwandler im DCM mit Snubberschaltung	214
8.5	Flusswandler	216
8.5.1	Simulation und Hardware-Prototyping	218
8.5.2	Flusswandler mit zwei Schaltern	221
8.6	Vollbrückenwandler	222
8.6.1	PWM-Steuerung	223
8.6.2	PSM-Steuerung	223
8.6.2.1	Intervall DT_s mit eingeschalteten Transistoren T_1, T_2	224
8.6.2.2	Intervall $(1/2 - D)T_s$: Alle Transistoren sind ausgeschaltet	224
8.6.3	Simulation und Hardware-Prototyping	226
8.7	Halbbrücken- und Gegentaktwandler	228
8.8	Praktische Überlegungen	229
	Literatur	229
	Übungsbeispiele	229
9	Design von Hochfrequenzinduktivitäten und Transformatoren	233
9.1	Einführung	233
9.2	Grundlagen des magnetischen Designs	233
9.3	Aufbau von Induktivitäten und Transformatoren	234
9.4	Flächenprodukt-Methode	234
9.4.1	Kernfensterfläche	234
9.4.2	Kernquerschnittsfläche	235
9.4.3	Kernflächenprodukt	236
9.4.4	Entwurfsverfahren basierend auf dem Flächenprodukt A_p	237
9.5	Entwurfsbeispiel für eine Spule	238
9.6	Entwurfsbeispiel eines Transformators für einen Vorwärtswandler	239
9.7	Thermische Überlegungen	240
	Literatur	240
	Übungsbeispiele	240
10	Soft switching in DC-DC-Wandlern und Halbbrücken-Resonanzwandlern	243
10.1	Einführung	243
10.2	Harte Schaltvorgänge in Leistungsschaltern	243
10.3	Weiche Schaltvorgänge in Leistungsschaltern	245
10.3.1	Zero-Voltage Switching (ZVS)	245
10.3.2	Synchroner Abwärtswandler mit ZVS	246

- 10.3.3 Phasenmodulierte DC-DC-Wandler 248
- 10.4 Halbbrücken-Resonanzwandler 249
 - Literatur 250
 - Übungsbeispiele 250

- 11 Schaltnetzteile in Motorantrieben, unterbrechungsfreien Stromversorgungen und Energiesystemen 253**
 - 11.1 Einführung 253
 - 11.2 Elektrische Antriebe 253
 - 11.2.1 Gleichstrommotoren 254
 - 11.2.1.1 Anforderungen von Gleichstrommaschinen an die Leistungsaufbereitungseinheit 257
 - 11.2.2 AC-Antriebe mit Permanentmagneten 257
 - 11.2.2.1 Anforderungen von PMAC-Maschinen an die PPU 260
 - 11.2.3 Induktionsmaschinen 261
 - 11.2.3.1 Anforderungen, die von Induktionsmaschinen an die PPU gestellt werden 265
 - 11.3 Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) 266
 - 11.4 Schaltwandler in Versorgungsnetzen 266
 - Literatur 268
 - Übungsbeispiele 268

 - 12 Synthese von Gleichspannungen und niederfrequenten Wechselspannungen für Motoren, USV- und Energiesysteme 271**
 - 12.1 Einführung 271
 - 12.2 Bidirektionale Leistungsschalter 272
 - 12.2.1 Pulsweitenmodulation (PWM) mit einem bidirektionalen Schaltermodul 273
 - 12.3 Wandler für Gleichstrommotoren 276
 - 12.3.1 Schaltspannungssignale in einem Wandler für Gleichstromantriebe 278
 - 12.4 Synthese von Niederfrequenz-Wechselstrom 281
 - 12.5 Einphasige Wechselrichter 282
 - 12.5.1 Schaltsignalformen in einem einphasigen Wechselrichter 284
 - 12.5.2 Simulation und Hardware-Prototyping 285
 - 12.6 Dreiphasige Wechselrichter 287
 - 12.6.1 Sinus-PWM 289
 - 12.6.2 Schaltsignalformen in einem dreiphasigen Wechselrichter mit Sinus-PWM 290
 - 12.6.3 Simulation und Hardware-Prototyping 291
 - 12.6.4 Raumzeiger-PWM 293
 - 12.6.5 Definition von Raumzeigern 294
 - 12.6.6 Raumzeiger-PWM 296

- 12.6.7 Amplitudenlimit des Statorraumzeigers 298
- 12.6.8 Simulation und Hardware-Prototyping 299
- 12.6.9 Übermodulation und Rechtecksignal-Betriebsmodus 301
- 12.7 Mehrstufige Schaltwandler 303
- 12.7.1 Wandler für bidirektionalen Leistungsfluss 304
- 12.7.2 Direktwandler 305
 - Literatur 306
 - Übungsbeispiele 307

13 Thyristorwandler 311

- 13.1 Einführung 311
- 13.2 Thyristoren 311
- 13.2.1 Einfache Thyristor-Gleichrichterschaltungen 312
- 13.3 Einphasige Thyristorwandler 313
- 13.3.1 Oberwellen im Strom und Blindleistungsbedarf 316
- 13.3.2 Einfluss der Serieninduktivität auf die Stromkommutierung 316
- 13.4 Dreiphasige Vollbrücken-Thyristorwandler 318
- 13.4.1 Oberwellen im Strom und Blindleistungsbedarf 320
- 13.4.2 Einfluss der Serieninduktivität 321
- 13.5 Stromübertragungssysteme 324
 - Literatur 325
 - Übungsbeispiele 325

14 Anwendungen der Leistungselektronik in der Netzversorgung 327

- 14.1 Einführung 327
- 14.2 Leistungsbaulemente und ihre Fähigkeiten 328
- 14.3 Kategorisierung von leistungselektronischen Systemen 329
- 14.3.1 Halbleiterschalter 329
- 14.3.2 Wandler als Schnittstelle zur Netzversorgung 329
- 14.3.2.1 Spannungsübertragung 329
- 14.3.2.2 Stromübertragung 330
- 14.4 Dezentrale Energieerzeugung 330
- 14.4.1 Windelektrische Systeme 331
- 14.4.1.1 Induktionsgeneratoren, direkt am Netz 332
- 14.4.1.2 Doppeltgespeiste Schleifringläufer-Asynchrongeneratoren 332
- 14.4.1.3 Einspeisung über eine Leistungselektronik 332
- 14.4.2 Photovoltaiksysteme 333
- 14.4.3 Brennstoffzellen 334
- 14.4.4 Mikroturbinen 334
- 14.4.5 Energiespeichersysteme 335
- 14.5 Elektronische Lasten 336
- 14.6 Lösungen für die Netzqualität 336
- 14.6.1 Doppelte Zuleitungen 336

14.6.2	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen	337
14.6.3	Dynamische Spannungsregler	337
14.7	Anwendungen in Übertragungs- und Verteilungsnetzen	337
14.7.1	Hochspannungs-Gleichstromübertragung	338
14.7.1.1	Thyristorbasierte Stromübertragung	338
14.7.1.2	HVDC-Übertragungssystem mit spannungsgesteuerten Wandlern auf IGBT-Basis	339
14.7.2	Flexible Wechselstrom-Übertragungssysteme	339
14.7.2.1	Parallelgeschaltete Bauelemente zur Spannungsregelung	340
14.7.2.2	In Reihe geschaltete Bauelemente zur Steuerung der effektiven Serienreaktanz X	340
14.7.2.3	Statische Phasenwinkelsteuerung und vereinheitlichter Leistungsflussregler	341
	Literatur	342
	Übungsbeispiele	342
	Index	345

