

Inhaltsverzeichnis

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

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 Wandlersystemen	9
1.5.1	Spannung zwischenkreise	10
1.5.2	Stromzwischenkreise	10
1.5.3	Direktwandler	11
1.6	Der DC-Spannung zwischenkreis	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 Leistungsdiode	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 Leistungsdiode	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	Cuk-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 \tilde{v}_o/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

x | **Inhaltsverzeichnis**

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	Leistungsbauelemente 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