

Inhalt

Vorwort zur fünften Auflage	V
1 Einführung	1
1.1 Vorbemerkung.....	1
1.2 Stromversorgungen	3
1.3 PFC Power-Factor-Corrector.....	4
1.3.1 Problemstellung.....	4
1.3.2 Definition des Leistungsfaktors.....	4
1.3.3 Geltende Norm	6
1.3.4 Lösung durch PFC.....	6
1.3.5 Betriebsarten zur Leistungsfaktorkorrektur.....	7
1.4 Die Ladungspumpe	9
1.4.1 Schaltungsbeispiele	9
1.4.2 Wirkungsgrad und Ausgangsleistung einer Ladungspumpe	10
1.5 Idealisierung	11
2 Der Abwärtswandler.....	13
2.1 Der Abwärtswandler mit nicht lückendem Strom	13
2.1.1 Berechnung der Ausgangsspannung.....	15
2.1.2 Berechnung der Induktivität L	15
2.1.3 Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb	16
2.1.4 Die Größe des Ausgangskondensators	17
2.1.5 Analytische Berechnung des Effektivwertes.....	19
2.1.6 Numerische Bestimmung des Effektivwertes.....	20
2.2 Der Abwärtswandler mit lückendem Strom	22
2.2.1 Der Eingangsstrom	23
2.2.2 Der Ausgangsstrom	23
2.2.3 Die Ausgangsspannung	23
2.2.4 Grenze zum nicht lückenden Betrieb	24
2.2.5 Tastverhältnis in Abhängigkeit des Ausgangsstroms	25
2.3 Der Abwärtswandler mit Umschwingkondensator.....	26
2.3.1 Vorbemerkung.....	26
2.3.2 Schaltung beim Abwärtswandler.....	27

3 Der Aufwärtswandler	29
3.1 Der Aufwärtswandler mit nicht lückendem Strom	29
3.1.1 Berechnung der Ausgangsspannung.....	30
3.1.2 Der Eingangsstrom	31
3.1.3 Berechnung des Ausgangsstromes	32
3.1.4 Berechnung der Induktivität L	32
3.1.5 Die Größe der Ausgangskapazität	33
3.1.6 Die Grenze des nicht lückenden Betriebs.....	33
3.2 Der Aufwärtswandler mit lückendem Strom	34
3.2.1 Die Stromverläufe	34
3.2.2 Berechnung der Ausgangsspannung.....	35
3.2.3 Normierung	35
3.2.4 Die Grenze zum nicht lückenden Betrieb.....	36
3.3 Bidirektionaler Energiefluss	38
 4 Der Multi-Parallel-Wandler.....	 41
4.1 Der Einfach-Synchronwandler	41
4.1.1 Das Schaltbild	41
4.1.2 Die Stromverläufe	42
4.1.3 Berechnung der Stromeffektivwerte.....	43
4.2 Der Zweifach-Synchronwandler.....	45
4.2.1 Das Schaltbild	46
4.2.2 Die Stromverläufe	46
4.2.3 Berechnung der Effektivwerte.....	47
4.2.4 Die Stromverläufe für $vT < 0,5$	48
4.3 Vierfach-Synchronwandler.....	49
4.3.1 Das Schaltbild	50
4.3.2 Die Stromverläufe für $vT \geq 0,75$	50
4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse	51
4.5 Synchronisation von Mehrfachwandlern	53
4.5.1 I-I-Messung	54
4.5.2 I-T-Control	54
4.5.3 PWM-gesteuert.....	56
4.6 Vergleich der Synchronisationsverfahren.....	58

5 Der Inverswandler	59
5.1 Der Inverswandler mit nicht lückendem Strom	59
5.1.1 Die Ausgangsspannung	61
5.1.2 Berechnung der Induktivität L	62
5.1.3 Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb	63
5.2 Der Inverswandler mit lückendem Strom	64
6 Der Sepic-Wandler	67
6.1 Der Sepic-Wandler mit nicht lückendem Strom	67
6.1.1 Berechnung der Ausgangsspannung	67
6.1.2 Die wichtigsten Strom- und Spannungsverläufe	68
6.1.3 Die Stromrippel	69
6.1.4 Die Belastung der Bauelemente	69
6.1.5 Die Grenze zum lückenden Betrieb	70
6.2 Der Sepic-Wandler mit Potentialtrennung	70
7 Der Ćuk-Wandler	71
7.1 Der Ćuk-Wandler mit positiver Ausgangsspannung	71
7.1.1 Dimensionierung auf kleine Änderungen der energietragenden Größen	71
7.1.2 Dimensionierung auf Resonanz von C_S/L_2	71
7.1.3 Strombelastung von L_2	74
7.1.4 Strombelastung von C_S	74
7.1.5 Dimensionierung von C_S und L_2	75
7.1.6 Dimensionierung der Diode	75
7.1.7 Zusammenfassung der Eigenschaften des Ćuk-Wandlers	76
7.2 Der Ćuk-Wandler mit Potentialtrennung	76
8 Der Sperrwandler	77
8.1 Der Sperrwandler mit nicht lückendem Strom	77
8.1.1 Die Ausgangsspannung	78
8.1.2 Berechnung der Induktivität L	79
8.1.3 Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb	80
8.2 Der Sperrwandler mit lückendem Strom	81
8.2.1 Berechnung der Ausgangskennlinien	82
8.3 Beispiel: Sperrwandler mit zwei Ausgangsspannungen	85
8.4 Dimensionierungsbeispiel	86
8.4.1 Die quantitativen Strom- und Spannungsverläufe	86
8.4.2 Berechnung der Effektivwerte	87
8.4.3 Dimensionierung des Trafos	88
8.4.4 Gegenüberstellung der Verluste	90

9 Der Eintaktflusswandler	91
9.1 Der Eintaktflusswandler mit nicht lückendem Strom	91
9.1.1 Die Ausgangsspannung	92
9.1.2 Die Primärseite	93
9.1.3 Die Induktivität L	94
9.1.4 Grenze des nicht lückenden Betriebs	95
9.2 Der Eintaktflusswandler mit lückendem Strom	96
9.2.1 Die Strom- und Spannungsverläufe	96
9.2.2 Normierte Ausgangsgrößen	97
9.2.3 Die Grenze des lückenden Betriebs	98
9.2.4 Die Ausgangsdiagramme	98
 10 Gegentaktflusswandler	 101
10.1 Die Standardtopologie	101
10.1.2 Schaltung und Kurvenverläufe	101
10.1.3 Die Ausgangsspannung	102
10.1.4 Ansteuerung des Gegentaktwandlers	103
10.2 Brücken	106
10.2.1 Primärseite	106
10.2.2 Sekundärseite	107
10.3 Der asymmetrische Halbbrückenwandler	108
10.4 Der Gegentaktwandler mit Current Doubler am Ausgang	110
10.4.2 Schaltung und Kurvenverläufe	110
10.4.3 Berechnung der Strombelastungen der Leistungsbauteile	112
10.4.4 Die CD-Topologie mit Synchrongleichrichter am Ausgang	118
10.5 Dimensionierungsbeispiel für die Standardtopologie	119
 11 Resonanzwandler	 123
11.1 Die Boucherot-Schaltung	123
11.1.1 Beziehungen	123
11.1.2 Ansteuerung mit Rechteckspannung	126
11.1.3 Berechnung der dritten Oberwelle	127
11.1.4 Realisierung der Rechteckspannung	128
11.1.5 Ein Ausführungsbeispiel: 12V-Vorschaltgerät für Energiesparlampe	128
11.2 Gegentaktwandler mit Umschwingen des Drosselstroms	130
11.2.1 Grundsaltung	130
11.2.2 Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Schaltzeiten	131
11.2.3 Ausgangskennlinie	132
11.2.4 Periodendauer in Abhängigkeit der Ausgangsspannung	133
11.2.5 Umschwingbedingung	134
11.3 Resonanzwandler mit variabler Frequenz	136
11.3.1 Schaltung	136
11.3.2 Vereinfachte Schaltung	136

11.3.3	Ersatzschaltung zur Betrachtung von einem Schaltvorgang	137
11.3.4	Spannungs- und Stromverläufe	137
11.3.5	Beziehungen	138
11.3.6	Berechnung der Ausgangsspannung	139
11.4	Vergleich „hartes“ Schalten – Umschwingen	140
11.4.1	Beispielschaltung	140
11.4.2	Beziehungen	140
11.4.3	Auswirkung auf die ohmschen Verluste in der Drossel	143
12	Leistungsschalter	145
12.1	Der MOSFET	145
12.1.1	Das Schaltzeichen des MOSFET	145
12.1.2	Die Body-Diode	145
12.1.3	Das Ersatzschaltbild des MOSFET	147
12.1.4	Einschaltvorgang	147
12.1.5	Ausschaltvorgang	148
12.1.6	Die Gate-Ladung des MOSFET	148
12.1.7	Die Avalanche Festigkeit	149
12.2	Der SenseFET	150
12.3	Der TOPFET	152
12.4	Der IGBT	153
12.4.1	Das Schaltzeichen des IGBTs	153
12.4.2	Das Ersatzschaltbild des IGBTs	153
12.4.3	Schaltverhalten	154
12.5	Brückenbausteine	154
12.6	Schaltverluste	155
12.6.1	Abschaltvorgang mit ohmscher Last	156
12.6.2	Abschaltvorgang mit induktiver Last	157
12.6.3	Abschaltvorgang ohne Schaltverluste	158
12.7	Verbesserte Freilaufdiode	159
12.8	Verpolschutzdiode (Kfz)	160
12.9	Sperrverzugszeit von Dioden	161
12.9.1	Problemstellung	161
12.9.2	Messschaltung	161
12.9.3	Auswirkung auf den Schaltvorgang	162
12.9.4	Abhilfe	163

13 Treiberschaltungen für MOSFETs und IGBTs	165
13.1 Einfache Treiberschaltungen	165
13.1.1 Ansteuerung mit CMOS-Gattern	166
13.1.2 Treiber mit Push-Pull-Stufe	166
13.1.3 Aktives Abschaltnetzwerk am Gate	167
13.1.4 Treiber-ICs	168
13.2 Treiberschaltungen mit Potentialtrennung	169
13.2.1 Treiberschaltung mit einstellbaren Schaltzeiten	169
13.2.2 Treiber mit Impulsübertrager	170
13.2.3 Primäransteuerung des Impulsübertragers	174
13.2.4 Dimensionierung des Impulsübertragers	175
13.2.5 Potentialfreie Ansteuerung eines Polwenders	176
13.2.6 Ansteuerung mit verzögertem Einschalten	180
13.2.7 Primäransteuerung	181
13.3 Treiberschaltungen für DC-Motoren	182
13.3.1 High-Side-Schalter mit Ladungspumpe	182
13.3.2 Versorgung für den High-Side-Schalter	185
13.4 DC-Motoren	186
13.4.1 Ersatzschaltbild eines DC-Motors	186
13.4.2 Belastungskurven	186
13.4.3 Drehzahlvorsteuerung	187
14 Regelung der Wandler	187
14.1 PWM-Erzeugung	187
14.2 Regelung der Ausgangsspannung	188
14.3 Analoger PI-Regler	189
14.3.1 PI-Regler mit OP-Schaltung	189
14.3.2 Passiver PI-Regler	190
14.4 Einsatz von integrierten Schaltkreisen	191
14.5 Verwendung von Mikrocontrollern	193
14.5.1 DA-Wandler	193
14.5.2 Programmierter PWM-Generator	196
14.6 Programmierung eines PI-Reglers	201
15 Magnetische Bauteile	203
15.1 Grundlagen des magnetischen Kreises	203
15.1.1 Die Luftspule	203
15.1.2 Der magnetische Kreis mit Ferrit	205
15.2 Dimensionierung von Spulen	210
15.2.1 Vorbemerkung	210
15.2.2 Aussteuerung des magnetischen Kreises	211
15.2.3 Bestimmung des A_L -Wertes	211
15.2.4 Ersatzschaltbild der realen Spule	212

15.2.5	Ortskurve der Spule.....	213
15.2.6	Kupferverluste in der Wicklung.....	213
15.2.7	Verlustwinkel und Güte	214
15.3	Der Transformator.....	215
15.3.1	Allgemeine Beziehungen für sinusförmige Verläufe	215
15.3.2	Das Streuersatzschaltbild des Trafos.....	217
15.3.3	Dimensionierung des Trafos	220
15.4	Dimensionierung von Wicklungen.....	222
15.4.1	Die Primärwicklung	222
15.4.2	Skin-Effekt.....	223
15.4.3	Folienwicklung.....	225
15.4.4	Der Wicklungsaufbau.....	226
15.4.5	Luftstrecken und Überschlagsfestigkeit	227
15.4.6	Streifelder.....	227
15.5	Stromspitzen bei Transformatoren	229
15.5.1	Auswirkung der Magnetisierungskurve	229
15.5.2	Normalbetrieb	230
15.5.3	Ausfall von Netzhalbwellen	230
15.5.4	Einschalten eines Netztrafos im Nulldurchgang der Spannung.....	230
15.6	Der Stromwandler	231
15.6.1	Anwendungsbereich.....	231
15.6.2	Die Schaltung	231
15.6.3	Ein Ausführungsbeispiel	232
15.6.4	Stromwandler mit Gleichrichter	232
15.6.5	Stromwandler in Schaltschränken	232
16	Kondensatoren für die Leistungselektronik	233
16.1	Grundsätzliches	233
16.2	Elektrolytkondensatoren.....	234
16.2.1	Verlustfaktor von Elektrolytkondensatoren	234
16.2.2	Resonanzfrequenz von Elektrolytkondensatoren	235
16.2.3	Wechselstrombelastbarkeit von Elektrolytkondensatoren.....	235
16.3	Folienkondensatoren	238
16.4	CLC-Filter	240
17	Die Kopplungsarten	241
17.1	Allgemeines.....	241
17.1.1	Verkopplungen erkennen	242
17.2	Die Widerstandskopplung	244
17.2.1	Prinzip der Widerstandskopplung	244
17.2.2	Abhilfemaßnahmen	245
17.2.3	Beispiele.....	246
17.2.4	Widerstandsberechnung	250
17.3	Die kapazitive Kopplung.....	252

17.3.1	Prinzip der kapazitiven Kopplung	252
17.3.2	Vermeidung und Abhilfemaßnahmen	253
17.3.3	Beispiele	254
17.3.4	Einfacher Nachweis elektrischer Felder im Labor	256
17.4	Die magnetische Kopplung	257
17.4.1	Prinzipdarstellung der magnetischen Kopplung	257
17.4.2	Abhilfemaßnahmen bei magnetischer Einkopplung	257
17.4.3	Beispiele	258
17.4.4	Einfaches Messen von magnetischen Störungen im Labor	260
17.5	Strahlungskopplung	261
17.5.1	Allgemeines	261
17.5.2	Prinzip der Strahlungskopplung	261
17.5.3	Abhilfemaßnahmen	262
17.5.4	Messung am Kraftfahrzeug	263
17.6	Beispiele aus der Leistungselektronik	264
17.6.1	Kommutierungsvorgang an den Leistungsschaltern	264
17.6.2	Ankopplung des Treibers an den Leistungsschalter	264
18	Störquellen	265
18.1	Zeitbereich – Frequenzbereich	265
18.1.1	Bandbreite	265
18.1.2	Störempfänglichkeit	266
18.1.3	Messprinzip	266
18.2	Fourierreihen	267
18.3	Der Rechteckimpuls	268
18.4	Der Trapezverlauf	274
18.5	Störungen in einem konventionellen Netzteil	277
19	Symmetrie	279
19.1	Prinzip der Symmetrie	279
19.2	Wie erreichen wir die Symmetrie?	280
19.3	Definition der Masse	281
19.4	Einfluss von leitenden Flächen	283
19.5	Verdrillte Leitungen	284
19.6	Symmetrische Datenübertragung	284
19.6.1	Prinzip	284
19.6.2	Eigenschaften	285
19.6.3	Grenzen des Verfahrens	285
19.6.4	Symmetrierung mittels Trafo	286
19.6.5	Beispiele	286

20 EMV in der Schaltungstechnik	287
20.1 Bauelemente und Schaltungen unter EMV-Aspekten	287
20.1.1 Widerstände.....	287
20.1.2 Kondensatoren.....	287
20.1.3 Induktivitäten	288
20.1.4 Der Operationsverstärker	289
20.1.5 Komparatoren.....	291
20.1.6 Subtrahierverstärker	293
20.1.7 Digitalschaltungen und Prozessoren.....	295
20.1.8 Die Leiterplatte.....	296
20.2 Übergang von analog auf digital	298
20.2.1 Schaltzeiten von analogen und von digitalen Schaltkreisen	298
20.2.2 Digitalschaltungen mit Schmitttrigger-Verhalten	299
20.2.3 Flipflop als Schnittstelle.....	299
20.2.4 Anschluss an AD-Wandler	299
20.3 Überspannungsschutz.....	300
20.3.1 Schutzelemente	300
20.3.2 Prüfschaltung „Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe“.....	302
20.4 EMV-gerechte Eingangsschaltung	303
20.4.1 Tipps für den Aufbau	303
20.5 Maßnahmen in der Software	304
20.5.1 Nichtbeschaltete Interrupteingänge.....	304
20.5.2 Illegale Op-Codes.....	304
20.5.3 Watchdogs.....	304
20.5.4 Plausibilitätsabfragen	304
20.5.5 Programme testen.....	305
20.5.6 Wie störfest ist eine Schaltung?	305
20.6 Spezifische EMV-Aspekte bei Schaltreglern	306
20.6.1 Der Synchronabwärtswandler als Beispiel	306
20.6.2 Eingangs- und Ausgangsfilter	306
20.6.3 Masseverdrahtung	307
20.6.4 Anschluss der Treiber.....	308
20.6.5 Messen der Ausgangsspannung.....	308
20.6.6 Aufgespannte Fläche	308
 Literaturverzeichnis	 309
 Sachwortverzeichnis	 311