

Inhalt

Vorwort zur sechsten 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	16
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	42
4.2	Der Zweifach-Synchronwandler	45
4.2.1	Das Schaltbild	45
4.2.2	Die Stromverläufe	45
4.2.3	Berechnung der Effektivwerte	46
4.2.4	Die Stromverläufe für $v_T < 0,5$	48
4.3	Vierfach-Synchronwandler	49
4.3.1	Das Schaltbild	49
4.3.2	Die Stromverläufe für $v_T \geq 0,75$	49
4.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse	50
4.5	Synchronisation von Mehrfachwandlern	52
4.5.1	I-I-Messung	53
4.5.2	I-T-Control	53
4.5.3	PWM-gesteuert	55
4.6	Vergleich der Synchronisationsverfahren	57
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 Dioden und T_1 75

7.1.7 Zusammenfassung der Eigenschaften des Ćuk-Wandlers..... 76

7.2 Ćuk-Wandler mit Potentialtrennung..... 77

7.2.1 Schaltbild 77

7.2.2 Beziehungen..... 77

7.3 Dimensionierung als PFC-Wandler..... 80

7.3.1 Vorbemerkung 80

7.3.2 Daten des Wandlers 80

7.3.3 Festlegung von $\ddot{u}$ 80

7.3.4 Dimensionierung des Trafos 81

7.3.5 Verluste des Trafos 81

7.3.6 Dimensionierung der Spulen..... 81

7.3.7 Verluste..... 82

7.3.8 Dimensionierung weiterer Bauteile..... 82

8 Der Sperrwandler..... 83

8.1 Der Sperrwandler mit nicht lückendem Strom 83

8.1.1 Die Ausgangsspannung..... 84

8.1.2 Berechnung der Induktivität L 85

8.1.3 Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb 86

8.2 Der Sperrwandler mit lückendem Strom 87

8.2.1 Berechnung der Ausgangskennlinien..... 88

8.3 Beispiel: Sperrwandler mit zwei Ausgangsspannungen..... 91

8.4 Dimensionierungsbeispiel 92

8.4.1 Die quantitativen Strom- und Spannungsverläufe..... 92

8.4.2 Berechnung der Effektivwerte 93

8.4.3 Dimensionierung des Trafos 94

8.4.4 Gegenüberstellung der Verluste 96

9 Der Eintaktflusswandler	97
9.1 Der Eintaktflusswandler mit nicht lückendem Strom	97
9.1.1 Die Ausgangsspannung	98
9.1.2 Die Primärseite	99
9.1.3 Die Induktivität L	100
9.1.4 Grenze des nicht lückenden Betriebs	101
9.2 Der Eintaktflusswandler mit lückendem Strom	102
9.2.1 Die Strom- und Spannungsverläufe	102
9.2.2 Normierte Ausgangsgrößen	103
9.2.3 Die Grenze des lückenden Betriebs	104
9.2.4 Die Ausgangsdiagramme	104
9.3 Praktische Ausführung der Primärbrücke	106
10 Gegentaktflusswandler	107
10.1 Die Standardtopologie	107
10.1.2 Schaltung und Kurvenverläufe	107
10.1.3 Die Ausgangsspannung	108
10.1.4 Ansteuerung des Gegentaktwandlers	109
10.2 Brücken	112
10.2.1 Primärseite	112
10.2.2 Sekundärseite	113
10.3 Dimensionierungsbeispiel für die Standardtopologie	114
10.4 Der asymmetrische Halbbrückenwandler	118
10.4.1 Schaltung und Kurvenverläufe	118
10.4.2 Die Ausgangsspannung	119
10.4.3 Der Trafostrom	120
11 Der Gegentaktwandler mit Current Doubler am Ausgang	121
11.1 Schaltung und Kurvenverläufe	121
11.2 Berechnung der Strombelastungen der Leistungsbauteile	123
11.2.1 Ströme durch D_1 und D_2	123
11.2.2 Arithmetischer Mittelwert $\overline{i_{D1}}$	124
11.2.3 Effektivwert I_{D1}	124
11.2.4 Verlustleistung in D_1	128
11.2.5 Strom durch die Sekundärwicklung I_S	128
11.2.6 Strom durch die Primärwicklung I_P	128
11.2.7 Strom durch T_2 und T_4	128
11.2.8 Strom durch T_1 und T_3	128
11.2.9 Strom durch die Ausgangsdrosseln	128
11.3 Die CD-Topologie mit Synchrongleichrichter am Ausgang	129
11.4 Zero Voltage Switching	130
11.4.1 Ausschalten von T_1	130
11.4.2 Ausschalten von T_2	130

12 Blindleistungskonverter 131

12.1 Vorbemerkung..... 131

12.2 Funktionsprinzip..... 131

12.3 Schaltung zur Realisierung..... 132

12.3.2 Strommessung..... 132

12.3.3 Nachregeln der Spannung U_{ZK} 133

12.3.4 Stromverläufe..... 134

13 Resonanzwandler..... 135

13.1 Die Boucherot-Schaltung 135

13.1.1 Beziehungen..... 135

13.1.2 Ansteuerung mit Rechteckspannung..... 138

13.1.3 Berechnung der dritten Oberwelle 139

13.1.4 Realisierung der Rechteckspannung 140

13.1.5 Ein Ausführungsbeispiel: 12V-Vorschaltgerät für Energiesparlampe 140

13.2 Gegentaktwandler mit Umschwingen des Drosselstroms 142

13.2.1 Grundsaltung 142

13.2.2 Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Schaltzeiten 143

13.2.3 Ausgangskennlinie 144

13.2.4 Periodendauer in Abhängigkeit der Ausgangsspannung 145

13.2.5 Umschwingbedingung..... 146

13.3 Resonanzwandler mit variabler Frequenz 148

13.3.1 Schaltung..... 148

13.3.2 Vereinfachte Schaltung 148

13.3.3 Ersatzschaltung zur Betrachtung von einem Schaltvorgang 149

13.3.4 Spannungs- und Stromverläufe 149

13.3.5 Beziehungen..... 150

13.3.6 Berechnung der Ausgangsspannung 151

13.4 Vergleich „hartes“ Schalten – Umschwingen..... 152

13.4.1 Beispielschaltung 152

13.4.2 Beziehungen..... 152

13.4.3 Auswirkung auf die ohmschen Verluste in der Drossel 155

14 Leistungsschalter..... 157

14.1 Der MOSFET 157

14.1.1 Das Schaltzeichen des MOSFET 157

14.1.2 Die Body-Diode 157

14.1.3 Das Ersatzschaltbild des MOSFET 159

14.1.4 Einschaltvorgang..... 159

14.1.5 Ausschaltvorgang..... 160

14.1.6 Die Gate-Ladung des MOSFET 160

14.1.7 Die Avalanchefestigkeit..... 161

14.2 Der SenseFET 162

14.3 Der TOPFET 164

14.4 Der IGBT 165

14.4.1 Das Schaltzeichen des IGBTs	165
14.4.2 Das Ersatzschaltbild des IGBTs.....	165
14.4.3 Schaltverhalten.....	166
14.5 Weitere Leistungsschalter	166
14.5.1 Silizium Carbid (SiC).....	166
14.5.2 GaN Transistoren	167
14.6 Schaltverluste	169
14.6.1 Abschaltvorgang mit ohmscher Last.....	169
14.6.2 Abschaltvorgang mit induktiver Last.....	170
14.6.3 Abschaltvorgang ohne Schaltverluste	171
14.7 Verbesserte Freilaufdiode.....	173
14.8 Verpolschutzdiode (Kfz)	174
14.9 Sperrverzugszeit von Dioden	175
14.9.1 Problemstellung	175
14.9.2 Messschaltung.....	175
14.9.3 Auswirkung auf den Schaltvorgang	176
14.9.4 Abhilfe	177
 15 Treiberschaltungen für MOSFETs und IGBTs.....	179
15.1 Einfache Treiberschaltungen.....	179
15.1.1 Ansteuerung mit CMOS-Gattern	180
15.1.2 Treiber mit Push-Pull-Stufe	180
15.1.3 Aktives Abschaltnetzwerk am Gate	181
15.1.4 Treiber-ICs	182
15.2 Treiberschaltungen mit Potentialtrennung.....	183
15.2.1 Treiberschaltung mit einstellbaren Schaltzeiten.....	183
15.2.2 Treiber mit Impulsübertrager	184
15.2.3 Primärseitige Treiber für den Impulsübertrager	188
15.2.4 Differenzier- und Multiplexlogik	189
15.2.5 Dimensionierung des Impulsübertragers	191
15.2.6 Sekundärseitige Treiberschaltung	192
15.2.7 Ansteuerung mit verzögertem Einschalten.....	194
15.3 Treiberschaltungen für DC-Motoren.....	196
15.3.1 High-Side-Schalter mit Ladungspumpe	196
15.4 DC-Motoren	199
15.4.1 Ersatzschaltbild eines DC-Motors.....	199
15.4.2 Belastungskurven	199
15.4.3 Drehzahlvorsteuerung	200
 16 Regelung der Wandler	201
16.1 PWM-Erzeugung.....	201
16.2 Regelung der Ausgangsspannung.....	202
16.3 Analoger PI-Regler	203
16.3.1 PI-Regler mit OP-Schaltung	203
16.3.2 Passiver PI-Regler.....	204

16.4 Einsatz von integrierten Schaltkreisen 205

16.5 Verwendung von Mikrocontrollern..... 207

 16.5.1 DA-Wandler..... 207

 16.5.2 Programmierter PWM-Generator..... 210

16.6 Programmierung eines PI-Reglers..... 215

17 Magnetische Bauteile..... 217

 17.1 Grundlagen des magnetischen Kreises 217

 17.1.1 Die Luftspule..... 217

 17.1.2 Der magnetische Kreis mit Ferrit 219

 17.2 Dimensionierung von Spulen 224

 17.2.1 Vorbemerkung 224

 17.2.2 Aussteuerung des magnetischen Kreises..... 225

 17.2.3 Bestimmung des A_L -Wertes 225

 17.2.4 Ersatzschaltbild der realen Spule 226

 17.2.5 Ortskurve der Spule 227

 17.2.6 Kupferverluste in der Wicklung..... 227

 17.2.7 Verlustwinkel und Güte 228

 17.3 Der Transformator..... 229

 17.3.1 Allgemeine Beziehungen für sinusförmige Verläufe 229

 17.3.2 Das Streuersatzschaltbild des Trafos..... 231

 17.3.3 Dimensionierung des Trafos 234

 17.4 Dimensionierung von Wicklungen..... 236

 17.4.1 Die Primärwicklung..... 236

 17.4.2 Skin-Effekt..... 237

 17.4.3 Folienwicklung..... 239

 17.4.4 Der Wicklungsaufbau..... 240

 17.4.5 Luftstrecken und Überschlagsfestigkeit 241

 17.4.6 Streufelder..... 241

 17.5 Stromspitzen bei Transformatoren 243

 17.5.1 Auswirkung der Magnetisierungskurve 243

 17.5.2 Normalbetrieb 244

 17.5.3 Ausfall von Netzhalbwellen..... 244

 17.5.4 Einschalten eines Netztrafos im Nulldurchgang der Spannung 244

 17.6 Der Stromwandler 245

 17.6.1 Anwendungsbereich..... 245

 17.6.2 Die Schaltung..... 245

 17.6.3 Ein Ausführungsbeispiel 246

 17.6.4 Stromwandler mit Gleichrichter..... 246

 17.6.5 Stromwandler in Schaltschränken..... 246

18 Kondensatoren und Filter..... 247

 18.1 Grundsätzliches 247

 18.2 Elektrolytkondensatoren..... 248

18.2.1 Verlustfaktor von Elektrolytkondensatoren	248
18.2.2 Resonanzfrequenz von Elektrolytkondensatoren	249
18.2.3 Wechselstrombelastbarkeit von Elektrolytkondensatoren.....	249
18.3 Folienkondensatoren	252
18.4 CLC-Filter	254
18.4.1 Schaltung.....	254
18.4.2 Zahlenbeispiel für ein CLC-Filter.....	255
19 Strommessung.....	257
19.1 Einführung.....	257
19.2 Strommessverfahren.....	258
19.2.1 Strommessung mit Shunt	258
19.2.2 Der Stromwandler	258
19.2.3 Der direktabbildender Stromwandler	259
19.2.4 Der Kompensationsstromwandler	259
19.2.5 Der Eta Stromwandler.....	260
19.2.6 Rogowsky Spule	260
19.2.7 Magnetische Widerstände	260
19.3 Stromwandler	261
19.3.1 Funktionsprinzip	261
19.3.2 Einfluss der realen Trafoeigenschaften.....	262
19.3.3 Schaltungsbeispiel.....	263
19.4 Shunt	264
19.4.1 Widerstand oder R_{DSon}	264
19.4.2 Grenzen des Messprinzips.....	265
19.5 Isolierschaltungen.....	267
19.5.1 Problemstellung	267
19.5.2 Induktive Hilfsspannungserzeugung	267
19.5.3 Kapazitive Hilfsspannungsversorgung.....	269
19.5.4 Spannungs-Frequenzwandler	269
19.5.5 Trennverstärker	269
19.5.6 Level Shifting mit Stromquelle.....	270
19.6 Stromerfassung für PFC-Wandler	271
19.6.1 Aufgabenstellung	271
19.6.2 Der Nullstromdetektor	271
19.6.3 Berechnung von t_{aus}	272
20 Die Kopplungsarten.....	273
20.1 Allgemeines.....	273
20.1.1 Verkopplungen erkennen	274
20.2 Die Widerstandskopplung	276
20.2.1 Prinzip der Widerstandskopplung	276
20.2.2 Abhilfemaßnahmen.....	277
20.2.3 Beispiele.....	278
20.2.4 Widerstandsberechnung.....	282
20.3 Die kapazitive Kopplung.....	284

20.3.1 Prinzip der kapazitiven Kopplung..... 284

20.3.2 Vermeidung und Abhilfemaßnahmen 285

20.3.3 Beispiele..... 286

20.3.4 Einfacher Nachweis elektrischer Felder im Labor 288

20.4 Die magnetische Kopplung 289

20.4.1 Prinzipdarstellung der magnetischen Kopplung..... 289

20.4.2 Abhilfemaßnahmen bei magnetischer Einkopplung 289

20.4.3 Beispiele..... 290

20.4.4 Einfaches Messen von magnetischen Störungen im Labor..... 292

20.5 Strahlungskopplung..... 293

20.5.1 Allgemeines 293

20.5.2 Prinzip der Strahlungskopplung 293

20.5.3 Abhilfemaßnahmen 294

20.5.4 Messung am Kraftfahrzeug 295

20.6 Beispiele aus der Leistungselektronik 296

20.6.1 Kommutierungsvorgang an den Leistungsschaltern 296

20.6.2 Ankopplung des Treibers an den Leistungsschalter 296

21 Störquellen 297

21.1 Zeitbereich – Frequenzbereich 297

21.1.1 Bandbreite 297

21.1.2 Störempfindlichkeit..... 298

21.1.3 Messprinzip 298

21.2 Fourierreihen 299

21.3 Der Rechteckimpuls 300

21.4 Der Trapezverlauf 306

21.5 Störungen in einem konventionellen Netzteil..... 309

22 Symmetrie 311

22.1 Prinzip der Symmetrie..... 311

22.2 Wie erreichen wir die Symmetrie? 312

22.3 Definition der Masse 313

22.4 Einfluss von leitenden Flächen..... 315

22.5 Verdrillte Leitungen 316

22.6 Symmetrische Datenübertragung 316

22.6.1 Prinzip..... 316

22.6.2 Eigenschaften 317

22.6.3 Grenzen des Verfahrens 317

22.6.4 Symmetrierung mittels Trafo 318

22.6.5 Beispiele..... 318

23 EMV in der Schaltungstechnik 319

 23.1 Bauelemente und Schaltungen unter EMV-Aspekten 319

 23.1.1 Widerstände 319

 23.1.2 Kondensatoren 319

 23.1.3 Induktivitäten 320

 23.1.4 Der Operationsverstärker 321

 23.1.5 Komparatoren..... 323

 23.1.6 Subtrahierverstärker 325

 23.1.7 Digitalschaltungen und Prozessoren 327

 23.1.8 Die Leiterplatte 328

 23.2 Übergang von analog auf digital 330

 23.2.1 Schaltzeiten von analogen und von digitalen Schaltkreisen..... 330

 23.2.2 Digitalschaltungen mit Schmitttrigger-Verhalten 331

 23.2.3 Flipflop als Schnittstelle..... 331

 23.2.4 Anschluss an AD-Wandler..... 331

 23.3 Überspannungsschutz..... 332

 23.3.1 Schutzelemente 332

 23.3.2 Prüfschaltung „Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe“ 334

 23.4 EMV-gerechte Eingangsschaltung 335

 23.4.1 Tipps für den Aufbau 335

 23.5 Maßnahmen in der Software 336

 23.5.1 Nichtbeschaltete Interrupteingänge..... 336

 23.5.2 Illegale Op-Codes 336

 23.5.3 Watchdogs..... 336

 23.5.4 Plausibilitätsabfragen 336

 23.5.5 Programme testen..... 337

 23.5.6 Wie störfest ist eine Schaltung? 337

 23.6 Spezifische EMV-Aspekte bei Schaltreglern 338

 23.6.1 Der Synchronabwärtswandler als Beispiel..... 338

 23.6.2 Eingangs- und Ausgangsfilter 338

 23.6.3 Masseverdrahtung 339

 23.6.4 Anschluss der Treiber 340

 23.6.5 Messen der Ausgangsspannung 340

 23.6.6 Aufgespannte Fläche..... 340

Literaturverzeichnis..... 341

Sachwortverzeichnis..... 343