

Inhaltsverzeichnis

1	Was ist Leistungselektronik ?.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Die elektrische Leitfähigkeit.....	3
2.1.1	Eigenleitung.....	5
2.1.2	Störstellenleitung.....	6
2.2	Der pn-Übergang.....	7
2.2.1	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung.....	9
2.2.2	Der pn-Übergang im Durchlassbetrieb.....	9
2.2.3	Der pn-Übergang in Sperrrichtung beansprucht.....	11
2.2.4	Die Durchbruchmechanismen des pn-Überganges.....	12
2.2.5	Die optimale Gestaltung des pn-Übergangs.....	13
3	Dioden.....	15
3.1	pn-Diode.....	15
3.1.1	Modellbildung einer realen pn-Diode.....	16
3.1.2	Die Verlustleistungsberechnung.....	17
3.2	pin-Diode.....	18
3.2.1	Das Sperrverhalten.....	19
3.2.2	Das Durchlassverhalten.....	19
3.2.3	Das Schaltverhalten.....	21
3.2.3.1	Einschalten.....	22
3.2.3.2	Ausschalten.....	22
3.2.3.3	Schaltverluste.....	24
3.2.4	Reihenschaltung.....	26
3.2.5	Parallelschaltung.....	27
3.2.6	Einsatzkriterien für Dioden.....	29
3.3	Solarzelle.....	30
4	Transistoren.....	33
4.1	Bipolartransistor.....	33
4.1.1	Aufbau.....	33
4.1.2	Wirkungsweise.....	34
4.1.3	Schaltverluste.....	36

- 4.1.4 Der bipolare Leistungstransistor.....38
 - 4.1.5 Die Arbeitspunkte des bipolaren Transistorschalters.....39
 - 4.1.6 Nichtsättigungsbetrieb (aktiver Bereich, $u_{BC} < 0$).....39
 - 4.1.7 Quasisättigungsbetrieb ($u_{BC} > 0$)..... 40
 - 4.1.8 Übersättigungsbetrieb.....40
 - 4.1.9 Darlington-Transistoren.....42
 - 4.1.10 Vergleich Bipolartransistor – Schalter 43
- 4.2 Betriebsarten 44
 - 4.2.1 Schalten einer ohmsch-induktiven Last.....45
 - 4.2.2 Schalten eines eingepprägten Stromes..... 48
 - 4.2.2.1 Weiches Schalten.....48
 - 4.2.2.2 Hartes Schalten.....49
 - 4.2.3 RCD-Beschaltung.....50
- 4.3 Der IG-Feldeffekttransistor (MOSFET)..... 51
 - 4.3.1 Aufbau..... 51
 - 4.3.2 Die Kennlinie.....55
 - 4.3.3 Die Gatekapazität..... 56
 - 4.3.4 Neuere Entwicklungsrichtungen..... 57
- 4.4 Der IG-Bipolar Transistor (IGBT)..... 58
 - 4.4.1 Aufbau..... 58
 - 4.4.2 Durchlasseigenschaften..... 59
 - 4.4.3 Das Schaltverhalten..... 60
 - 4.4.3.1 Einschalten..... 60
 - 4.4.3.2 Ausschalten.....62
 - 4.4.4 Sperr- und Blockierverhalten.....64
 - 4.4.5 Neuere Entwicklungsrichtungen..... 65
- 4.5 Treiberschaltungen66
 - 4.5.1 Gateanschluss..... 69
 - 4.5.2 Ausführung einer IGBT-Ansteuerung 70
 - 4.5.2.1 Ansteuerung eines Halbbrückenmoduls..... 71
 - 4.5.2.2 Impulslogik.....72
 - 4.5.2.3 Ventilbelastung..... 74
- 4.6 Aufbau- und Verbindungstechnik..... 75
 - 4.6.1 Problematik.....75
 - 4.6.2 Gehäuseformen.....76
 - 4.6.2.1 Diskrete Bauelemente.....76
 - 4.6.2.2 IGBT-Leistungsmodule..... 77

4.6.3	Eigenschaften von Leistungsmodulen.....	78
4.6.3.1	Lastwechselfestigkeit	78
4.6.3.2	Verhalten bei Moduldefekt	80
4.6.3.3	Parasitäre Induktivitäten.....	80
4.6.3.4	EMV-Verhalten.....	80
5	Thyristoren.....	81
5.1	Aufbau und Wirkungsweise.....	81
5.2	Kennlinie.....	83
5.3	Das Einschaltverhalten.....	83
5.3.1	Überschreiten der zulässigen Blockierspannung.....	83
5.3.2	Überschreiten der zulässigen Spannungssteilheit	84
5.3.3	Gatestromzündung.....	84
5.4	Ausschalten.....	87
5.4.1	Netzgeführter Betrieb.....	87
5.4.2	Selbstgeführter Betrieb.....	87
5.5	Ausführungsformen.....	90
5.5.1	Amplifying Gate-Struktur.....	90
5.5.2	Zweirichtungs-Thyristoren.....	90
5.5.3	Der asymmetrisch sperrende Thyristor.....	91
5.5.4	Der lichtzündbare Thyristor.....	91
5.6	Abschaltbarer Thyristor (GTO).....	91
5.6.1	Der asymmetrisch sperrende GTO.....	91
5.6.2	Ansteuerung.....	92
5.6.2.1	Einschalten.....	92
5.6.2.2	Ausschalten.....	92
5.6.3	Betriebsbedingungen für einen GTO.....	93
5.6.4	Der IGCT.....	94
5.7	Auswahl von Leistungsbauelementen.....	94
6	Wärme-Management.....	95
6.1	Die Verlustleistung.....	95
6.2	Das thermische Ersatzschaltbild.....	97
6.2.1	Der innere Wärmewiderstand $R_{th,JC}$	98
6.2.2	Der äußere Wärmewiderstand $R_{th,CA}$	98
6.2.3	Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers.....	99
6.2.4	Die Wärmekapazität C_{th}	100

6.3	Kühlmedien.....	104
6.3.1	Luftkühlung.....	104
6.3.2	Wasserkühlung.....	105
6.3.3	Siedekühlung.....	105
7	Stromrichterschaltungen.....	107
7.1	Grundfunktionen.....	107
7.2	Kennzeichnung von Stromrichterschaltungen.....	107
7.3	Einteilung nach der inneren Wirkungsweise.....	108
7.4	Leistungssteuerverfahren.....	109
7.5	Mittelpunktschaltung M1.....	109
7.5.1	Bauleistung des Transformators.....	113
7.5.2	Kapazitive Last.....	114
7.5.3	Ohmsch-induktive Last.....	116
7.5.4	Ohmsch-induktive Last mit Freilaufdiode.....	117
7.6	Wechselwegschaltung W1.....	118
7.6.1	Stellerbetrieb mit ohmscher Last.....	119
7.6.2	Stellerbetrieb mit ohmsch-induktiver Last	121
7.6.3	Schaltbetrieb mit ohmsch-induktiver Last.....	122
8	Wechselstromschaltungen.....	123
8.1	Die Mittelpunktschaltung M2U.....	123
8.2	Die gesteuerte Mittelpunktschaltung M2C.....	124
8.2.1	Die Wirkungsweise des Steuergenerators.....	124
8.2.2	Gleichspannungsbildung.....	125
8.2.2.1	Ohmsche Last.....	125
8.2.2.2	Ohmsch-induktive Last	126
8.2.2.3	Aktive Last	128
8.2.3	Ventilbelastung	131
8.2.4	Trafo- und Netzgrößen.....	132
8.2.5	Bemessung einer Glättungsinduktivität.....	133
8.2.6	Die Kommutierung.....	135
8.2.6.1	Überlappung.....	136
8.2.6.2	Die induktive Gleichspannungsänderung.....	139
8.3	Die Brückenschaltung B2.....	141
8.3.1	Die halbgesteuerte Brückenschaltung B2H.....	142
8.3.2	Ventilbelastung.....	144
8.3.3	Bauleistung des Transformators.....	144

9	Drehstromschaltungen.....	145
9.1	Die Mittelpunktschaltung M3.....	145
9.1.1	Gleichspannungsbildung.....	146
9.1.1.1	Ohmsche Last	147
9.1.1.2	Aktive Last.....	149
9.1.2	Ventilbelastung.....	150
9.1.2.1	Spannung.....	150
9.1.2.2	Strom.....	152
9.1.3	Netzstrom.....	153
9.1.4	Die Kommutierung	154
9.1.4.1	Einfluss auf die Gleichspannung.....	155
9.1.4.2	Berechnung des induktiven Gleichspannungsabfalls.....	157
9.1.4.3	Einfluss auf die Ventilspannung.....	159
9.2	Die Brückenschaltung B6.....	160
9.2.1	Gleichspannungsbildung.....	160
9.2.2	Leitzustände der Ventile.....	161
9.2.3	Steuerkennlinie.....	163
9.2.4	Stromrichtereingangsstrom.....	164
9.2.5	Netzstrom.....	164
9.2.6	Bauleistung des Transformators.....	165
9.3	Zündimpulse.....	166
9.3.1	Gleichspannungsbildung.....	168
9.3.2	Einfluss der Kommutierungen.....	171
9.3.3	Auswirkungen nicht idealer Glättung auf die Gleichspannung.....	174
9.4	12-pulsige Schaltungen	176
9.4.1	Stromrichter-Reihenschaltung.....	177
9.4.2	Stromrichter-Parallelschaltung.....	178
9.5	Höherpulsige Schaltungen.....	180
10	Netzurückwirkungen.....	181
10.1	Blindleistungsverhalten.....	181
10.1.1	Die Kennlinie der Steuerblindleistung.....	182
10.1.2	Oberschwingungsblindleistung.....	183
10.2	Stromoberschwingungen.....	184
10.2.1	Stromglättung.....	184
10.2.2	Spannungsglättung.....	187

10.2.2.1	Passive PFC-Schaltung.....	189
10.2.2.2	Aktive PFC-Schaltung.....	190
10.2.2.3	Vier Quadranten Steller.....	192
10.3	Spannungsüberschwingungen.....	195
10.3.1	B2-Schaltung.....	195
10.3.2	B6-Schaltung	197
11	Lastgeführte Stromrichter.....	203
11.1	Schwingkreiswechselrichter.....	203
11.1.1	Betrieb mit eingepprägter Gleichspannung	203
11.1.2	Betrieb mit eingepprägtem Gleichstrom	206
11.2	Vergleich der Wechselrichtertypen.....	208
11.3	Schwingkreiswechselrichter mit abschaltbaren Ventilen.....	208
11.3.1	Strom- und spannungsloses Schalten.....	210
11.3.2	Anwendungsbeispiel zum stromlosen Schalten (ZCS).....	211
12	Selbstgeführte Stromrichter.....	213
12.1	Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (UWR).....	213
12.1.1	Mittelpunktschaltung mit AC-seitigem Mittelpunkt	214
12.1.2	Ausführungsbeispiel mit Thyristorschalter.....	215
12.1.3	3-phasige Brückenschaltungen.....	218
12.1.3.1	Betrieb mit passiver Last	220
12.1.3.2	Betrieb mit einer Drehfeldmaschine.....	220
12.1.3.3	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung.....	222
12.2	Wechselrichter mit eingepprägtem Strom (IWR).....	224
12.2.1	Prinzip.....	224
12.2.2	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung.....	227
12.2.2.1	Die Wechselrichtervorladung	230
12.2.2.2	Anfahrverhalten	231
13	Die Wirkungsweise selbstgeführter UWR.....	233
13.1	Schaltungen in Zweipunkttechnik (2-level-inverter).....	234
13.1.1	Schaltfunktionen.....	235
13.1.2	Kurzzeit-Mittelwert.....	236
13.1.3	Der Modulator.....	237
13.1.4	Modulationsfunktion	238
13.1.5	Aussteuerung.....	239

13.1.6	1-phasige Brückenschaltung	240
13.1.6.1	Grundfrequenztaktung.....	241
13.1.6.2	Schwenksteuerung.....	242
13.1.6.3	Pulsweitenmodulation.....	243
13.1.7	3-phasige Brückenschaltung.....	244
13.1.7.1	Die Spannungsbildung.....	245
13.1.7.2	Der Zwischenkreisstrom	248
13.2	Schaltungen in Mehrpunkttechnik (Multi-Level-Inverter).....	252
13.2.1	Schaltungen in Dreipunkttechnik (3-level-inverter).....	254
13.2.1.1	1-phasige Brückenschaltung.....	257
13.2.1.2	3-phasige Brückenschaltung.....	258
13.2.2	Schaltungen in Vierpunkttechnik (4-level-inverter).....	261
14	Drehstromgrößen in Raumzeigerdarstellung.....	263
14.1	Raumzeigertransformation.....	263
14.2	Stromrichterspeisung.....	267
15	Steuerverfahren für UWR.....	269
15.1	Begriffe.....	269
15.2	Die Grundfrequenzsteuerung.....	274
15.3	Die Pulsweitenmodulation (PWM).....	275
15.3.1	1-phasige Mittelpunktschaltung.....	276
15.3.2	1-phasige Brückenschaltung.....	279
15.4	Schaltfunktionen für 3-phasige Schaltungen	281
15.4.1	Taktsteuerung.....	281
15.4.2	Pulssteuerung.....	282
15.4.3	Steuerkennlinie.....	284
15.4.4	Off-line optimierte Schaltfunktionen.....	288
15.4.5	Eliminationsmethode	286
15.4.6	Optimierte Pulsmuster.....	287
15.4.7	Raumzeigermodulation.....	288
16	Stromrichter und Maschinen.....	291
16.1	Gleichstrommaschinen.....	291
16.2	Elektronikmotor.....	294
16.3	Der geschaltete Reluktanzmotor.....	295
16.4	Stromrichtermotor.....	298
16.5	Drehfeldmaschinen.....	302

16.6	Zusatzverluste durch Stromrichterspeisung.....	306
16.7	Leistungssteuerung bei konstanter Ständerfrequenz.....	307
16.7.1	Drehstromsteller W3.....	308
16.7.2	Pulsgesteuerter Läuferwiderstand.....	309
16.7.3	Stromrichter­kaskade.....	310
16.7.3.1	Ausführung mit Stromzwischenkreis.....	311
16.7.3.2	Ausführung mit Spannungszwischenkreis.....	312
16.8	Leistungssteuerung bei variabler Ständerfrequenz.....	314
16.8.1	Prinzip des Direktumrichters.....	314
16.8.2	3-phasiger Direktumrichter.....	317
16.8.3	Frequenzumrichter.....	317
16.8.3.1	U/f-Kennliniensteuerung.....	320
16.8.3.2	Feldorientierte Regelung.....	321
16.8.4	Abschätzung der Zwischenkreisgrößen.....	323
16.9	Energieeffizienz von elektrischen Antrieben.....	325
17	Leistungselektronik und EMV.....	329
17.1	Grundbegriffe.....	329
17.2	Störgrößen – Ursachen.....	330
17.2.1	Störgröße Spannungs­teil­heit.....	330
17.2.2	Störgröße Strom­teil­heit.....	332
17.2.3	Auswirkungen parasitärer Elemente.....	334
17.3	Störfestigkeit.....	336
17.4	Störvermögen.....	336
17.4.1	Leitungsgebundene Störungen.....	336
17.4.2	Nicht leitungsgebundene Störungen.....	336
17.4.2.1	Kapazitive Beeinflussungen.....	336
17.4.2.2	Induktive Beeinflussungen.....	337
17.4.2.3	Elektromagnetische Beeinflussungen.....	337
17.4.3	Psophometrischer Störstrom.....	338
17.5	Netzfilter.....	338
17.6	Motoranpassung an den Stromrichter.....	343
17.6.1	Lagerströme.....	343
17.6.2	Wanderwellenprobleme.....	343
17.6.3	Ausgangsfilter.....	346
17.6.4	Ableitströme.....	347
17.7	Weitere Maßnahmen.....	348

18 Gleichspannungswandler.....	351
18.1 Tiefsetzsteller.....	351
18.2 Ausführungsbeispiel zum Tiefsetzsteller.....	351
18.3 Gleichstromsteller.....	352
18.4 Gleichstromsteller mit aktiver Last.....	355
18.5 Lückbetrieb.....	357
18.6 Hochsetzsteller.....	360
18.7 Hoch-Tiefsetzsteller.....	363
18.8 Sperrwandler.....	365
18.9 Durchflusswandler.....	367
18.9.1 Eintaktwandler.....	367
18.9.2 Gegentaktwandler.....	368
18.9.3 Vollbrückenwandler.....	369
18.10 Resonanzwandler.....	371
18.10.1 LC-Wandler.....	372
18.10.2 LLC-Wandler.....	375
18.10.3 Schaltverluste.....	377
18.11 Schaltnetzteile.....	379
18.11.1 Sekundär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler).....	380
18.11.2 Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler).....	380
18.11.3 Elektronischer Transformator (AC-AC-Wandler).....	381
18.11.4 Pulsleichrichter.....	381
18.11.5 Kontaktlose Energieübertragungssysteme.....	383
18.11.6 Energiesparlampen.....	384
19 Stromversorgungen.....	387
19.1 Unterbrechungsfreie Stromversorgungen.....	387
19.1.1 Online-Systeme.....	388
19.1.2 Offline-Systeme.....	388
19.2 Photovoltaische Stromversorgungen.....	389
19.2.1 Wechselrichter-Wirkungsgrad.....	390
19.2.2 Einfluss der Netzimpedanz.....	391
19.2.3 Leistungsflusssteuerung mit FACTS.....	392
19.3 Brennstoffzellen-Stromversorgungen.....	393
19.4 Energiespeicher.....	394
19.4.1 Konzepte für akkugestützte Fahrzeugantriebe.....	400
19.4.2 Speichertechnologien für Elektrofahrzeuge.....	402

Formelzeichen.....407

Weiterführende Literatur.....410

Sachwortverzeichnis..... 412