

Inhaltsverzeichnis

1	Was ist Leistungselektronik?	1
2	Grundlagen	5
2.1	Die elektrische Leitfähigkeit	6
2.1.1	Eigenleitung	7
2.1.2	Störstellenleitung	9
2.2	Der pn-Übergang	10
2.2.1	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	12
2.2.2	Der pn-Übergang im Durchlassbetrieb	12
2.2.3	pn-Übergang in Sperrrichtung beansprucht	14
2.2.4	Die Durchbruchmechanismen des pn-Überganges	14
2.2.5	Die optimale Gestaltung des pn-Übergangs	16
	Literatur	18
3	Dioden	19
3.1	pn-Diode	19
3.1.1	Modellbildung einer realen pn-Diode	20
3.1.2	Die Verlustleistungsberechnung	22
3.2	pin-Diode	24
3.2.1	Das Sperrverhalten	24
3.2.2	Das Durchlassverhalten	25
3.2.3	Das Schaltverhalten	26
	3.2.3.1 Einschalten	27
	3.2.3.2 Ausschalten	28
	3.2.3.3 Schaltverluste	29
3.2.4	Reihenschaltung	31
3.2.5	Parallelschaltung	33
3.2.6	Einsatzkriterien für Dioden	35
3.3	Solarzelle	36
	Literatur	40

4	Transistoren	41
4.1	Bipolartransistor	41
4.1.1	Aufbau	42
4.1.2	Wirkungsweise	42
4.1.3	Schaltverluste	44
4.1.4	Der bipolare Leistungstransistor	47
4.1.5	Die Arbeitspunkte des bipolaren Transistorschalters	48
4.1.6	Nichtsättigungsbetrieb (aktiver Bereich, $u_{BC} < 0$)	48
4.1.7	Quasisättigungsbetrieb ($u_{BC} > 0$)	48
4.1.8	Übersättigungsbetrieb	49
4.1.9	Darlington-Transistoren	51
4.1.10	Vergleich Bipolartransistor – Schalter	52
4.2	Betriebsarten	53
4.2.1	Schalten einer ohmsch-induktiven Last	54
4.2.2	Schalten eines eingepprägten Stromes	57
4.2.2.1	Weiches Schalten	57
4.2.2.2	Hartes Schalten	58
4.2.3	RCD-Beschaltung	59
4.3	Der IG-Feldeffekttransistor (MOSFET)	61
4.3.1	Aufbau	61
4.3.2	Die Kennlinie	65
4.3.3	Die Gatekapazität	67
4.3.4	Neuere Entwicklungsrichtungen	68
4.4	Der IG-Bipolar Transistor (IGBT)	69
4.4.1	Aufbau	69
4.4.2	Durchlasseigenschaften	70
4.4.3	Das Schaltverhalten	72
4.4.3.1	Einschalten	72
4.4.3.2	Ausschalten	74
4.4.4	Sperr- und Blockierverhalten	75
4.4.5	Neuere Entwicklungsrichtungen	76
4.5	Treiberschaltungen	78
4.5.1	Gateanschluss	82
4.5.2	Ausführung einer IGBT-Ansteuerung	82
4.5.2.1	Ansteuerung eines Halbbrückenmoduls	84
4.5.2.2	Impulslogik	85
4.5.2.3	Ventilbelastung	87
4.6	Aufbau- und Verbindungstechnik	88
4.6.1	Problematik	88
4.6.2	Gehäuseformen	89
4.6.2.1	Diskrete Bauelemente	89
4.6.2.2	IGBT-Leistungsmodule	91

4.6.3	Eigenschaften von Leistungsmodulen.	93
4.6.3.1	Lastwechselfestigkeit.	93
4.6.3.2	Verhalten bei Moduldefekt.	94
4.6.3.3	Parasitäre Induktivitäten.	94
4.6.3.4	EMV-Verhalten.	95
	Literatur.	95
5	Thyristoren	97
5.1	Aufbau und Wirkungsweise.	97
5.2	Kennlinie	99
5.3	Das Einschaltverhalten.	100
5.3.1	Überschreiten der zulässigen Blockierspannung.	100
5.3.2	Überschreiten der zulässigen Spannungssteilheit	100
5.3.3	Gatestromzündung.	100
5.4	Ausschalten	103
5.4.1	Netzgeführter Betrieb	104
5.4.2	Selbstgeführter Betrieb	104
5.5	Ausführungsformen	106
5.5.1	Amplifying Gate-Struktur	107
5.5.2	Zweirichtungs-Thyristoren	107
5.5.3	Der asymmetrisch sperrende Thyristor	108
5.5.4	Der lichtzündbare Thyristor	108
5.6	Abschaltbarer Thyristor (GTO)	108
5.6.1	Der asymmetrisch sperrende GTO	108
5.6.2	Ansteuerung.	109
5.6.2.1	Einschalten.	109
5.6.2.2	Ausschalten	109
5.6.3	Betriebsbedingungen für einen GTO	111
5.6.4	IGCT	112
5.7	Auswahl von Leistungsbauelementen	112
6	Wärme Management	113
6.1	Die Verlustleistung	113
6.2	Das thermische Ersatzschaltbild	115
6.2.1	Der innere Wärmewiderstand $R_{th,JC}$	116
6.2.2	Der äußere Wärmewiderstand $R_{th,CA}$	117
6.2.3	Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers	117
6.2.4	Die Wärmekapazität C_{th}	119
6.3	Kühlmedien	123
6.3.1	Luftkühlung	123
6.3.2	Wasserkühlung	124
6.3.3	Siedekühlung	125
	Literatur.	126

7	Stromrichterschaltungen	127
7.1	Grundfunktionen	127
7.2	Kennzeichnung von Stromrichterschaltungen	127
7.3	Einteilung nach der inneren Wirkungsweise	128
7.4	Leistungssteuerverfahren	129
7.5	Mittelpunktschaltung M1	130
7.5.1	Bauleistung des Transformators	133
7.5.2	Kapazitive Last	135
7.5.3	Ohmsch-induktive Last	137
7.5.4	Ohmsch-induktive Last mit Freilaufdiode	138
7.6	Wechselwegschaltung W1	140
7.6.1	Stellerbetrieb mit ohmscher Last	140
7.6.2	Stellerbetrieb mit ohmsch-induktiver Last	142
7.6.3	Schaltbetrieb mit ohmsch-induktiver Last	144
	Literatur	144
8	Wechselstromschaltungen	145
8.1	Die Mittelpunktschaltung M2U	145
8.2	Die gesteuerte Mittelpunktschaltung M2C	146
8.2.1	Die Wirkungsweise des Steuergenerators	147
8.2.2	Gleichspannungsbildung	148
8.2.2.1	Ohmsche Last	148
8.2.2.2	Ohmsch-induktive Last	148
8.2.2.3	Aktive Last	151
8.2.3	Ventilbelastung	153
8.2.4	Trafo- und Netzgrößen	155
8.2.5	Bemessung einer Glättungsinduktivität	156
8.2.6	Die Kommutierung	158
8.2.6.1	Überlappung	160
8.2.6.2	Die induktive Gleichspannungsänderung	163
8.3	Die Brückenschaltung B2	165
8.3.1	Die halbgesteuerte Brückenschaltung B2H	167
8.3.2	Ventilbelastung	167
8.3.3	Bauleistung des Transformators	167
	Literatur	169
9	Drehstromschaltungen	171
9.1	Die Mittelpunktschaltung M3	171
9.1.1	Gleichspannungsbildung	171
9.1.1.1	Ohmsche Last	173
9.1.1.2	Aktive Last	175

9.1.2	Ventilbelastung	176
9.1.2.1	Spannung	176
9.1.2.2	Strom	178
9.1.3	Netzstrom	178
9.1.4	Die Kommutierung	180
9.1.4.1	Einfluss auf die Gleichspannung	180
9.1.4.2	Berechnung des induktiven Gleichspannungsabfalls	181
9.1.4.3	Einfluss auf die Ventilspannung	185
9.2	Die Brückenschaltung B6	186
9.2.1	Gleichspannungsbildung	186
9.2.2	Leitzustände der Ventile	187
9.2.3	Steuerkennlinie	188
9.2.4	Stromrichtereingangsstrom	190
9.2.5	Netzstrom	190
9.2.6	Bauleistung des Transformators	192
9.3	Zündimpulse.	193
9.3.1	Gleichspannungsbildung	195
9.3.2	Einfluss der Kommutierungen.	197
9.3.3	Auswirkungen nicht idealer Glättung auf die Gleichspannung.	200
9.4	12-pulsige Schaltungen	201
9.4.1	Stromrichter-Reihenschaltung.	203
9.4.2	Stromrichter-Parallelschaltung	203
9.4.3	Höherpulsige Schaltungen.	206
9.5	Hochspannungs-Gleichstrom Übertragungstechnik.	207
10	Netzurückwirkungen.	211
10.1	Blindleistungsverhalten	211
10.1.1	Die Kennlinie der Steuerblindleistung	212
10.1.2	Oberschwingungsblindleistung	214
10.2	Stromoberschwingungen	215
10.2.1	Stromglättung	215
10.2.2	Spannungsglättung	218
10.2.2.1	Passive PFC-Schaltung.	220
10.2.2.2	Aktive PFC-Schaltung	220
10.2.2.3	Vier Quadranten Steller	223
10.3	Spannungsoberschwingungen	225
10.3.1	B2-Schaltung	227
10.3.2	B6-Schaltung	229
	Literatur.	234

11 Lastgeführte Stromrichter	235
11.1 Schwingkreiswechselrichter	235
11.1.1 Betrieb mit eingepprägter Gleichspannung	235
11.1.2 Betrieb mit eingepprägtem Gleichstrom	239
11.2 Vergleich der Wechselrichtertypen	240
11.3 Schwingkreiswechselrichter mit abschaltbaren Ventilen	241
11.3.1 Strom- und spannungsloses Schalten	243
11.3.2 Anwendungsbeispiel zum stromlosen Schalten (ZCS)	244
Literatur	246
12 Selbstgeführte Stromrichter	247
12.1 Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (UWR)	247
12.1.1 Mittelpunktschaltung mit AC-seitigem Mittelpunkt	248
12.1.2 Ausführungsbeispiel mit Thyristorschalter	248
12.1.3 3-phasige Brückenschaltungen	252
12.1.3.1 Betrieb mit passiver Last	253
12.1.3.2 Betrieb mit einer Drehfeldmaschine	255
12.1.3.3 Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung	257
12.2 Wechselrichter mit eingepprägtem Strom (IWR)	259
12.2.1 Prinzip	259
12.2.2 Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung	263
12.2.2.1 Die Wechselrichtervorladung	266
12.2.2.2 Anfahrverhalten	266
Literatur	268
13 Die Wirkungsweise selbstgeführter UWR	269
13.1 Schaltungen in Zweipunkttechnik (2-level-inverter)	269
13.1.1 Schaltfunktionen	271
13.1.2 Kurzzeit-Mittelwert	273
13.1.3 Der Modulator	274
13.1.4 Modulationsfunktion	274
13.1.5 Aussteuerung	276
13.1.6 1-phasige Brückenschaltung	277
13.1.6.1 Grundfrequenztaktung	278
13.1.6.2 Schwenksteuerung	279
13.1.6.3 Pulsweitenmodulation	280
13.1.7 3-phasige Brückenschaltung	281
13.1.7.1 Die Spannungsbildung	281
13.1.7.2 Der Zwischenkreisstrom	284
13.2 Schaltungen in Mehrpunkttechnik (Multi-Level-Inverter)	289
13.2.1 Schaltungen in Dreipunkttechnik (3-level-inverter)	290

13.2.1.1	1-phasige Brückenschaltung	294
13.2.1.2	3-phasige Brückenschaltung	295
13.2.2	Schaltungen in Vierpunkttechnik (4-level-inverter)	297
14	Drehstromgrößen in Raumzeigerdarstellung	301
14.1	Raumzeigertransformation	301
14.2	Stromrichterspeisung	305
15	Steuerverfahren für UWR	309
15.1	Begriffe	310
15.2	Die Grundfrequenzsteuerung	314
15.3	Die Pulsweitenmodulation (PWM)	316
15.3.1	1-phasige Mittelpunktschaltung	317
15.3.2	1-phasige Brückenschaltung	320
15.4	Schaltfunktionen für 3-phasige Schaltungen	322
15.4.1	Taktsteuerung	322
15.4.2	Pulssteuerung	323
15.4.3	Steuerkennlinie	325
15.4.4	Off-line optimierte Schaltfunktionen	327
15.4.5	Eliminationsmethode	328
15.4.6	Optimierte Pulsmuster	329
15.4.7	Raumzeigermodulation	330
	Literatur	333
16	Stromrichter und Maschinen	335
16.1	Gleichstrommaschinen	335
16.2	Elektronikmotor	338
16.3	Der geschaltete Reluktanzmotor (SRM)	340
16.4	Stromrichtermotor	343
16.5	Drehfeldmaschinen	347
16.6	Zusatzverluste durch Stromrichterspeisung	351
16.7	Leistungssteuerung bei konstanter Ständerfrequenz	353
16.7.1	Drehstromsteller W3	354
16.7.2	Pulsgesteuerter Läuferwiderstand	355
16.7.3	Stromrichtererkaskade	357
16.7.3.1	Ausführung mit Stromzwischenkreis	358
16.7.3.2	Ausführung mit Spannungszwischenkreis	360
16.8	Leistungssteuerung bei variabler Ständerfrequenz	361
16.8.1	Prinzip des Direktumrichters	361
16.8.2	3-phasiger Direktumrichter	364
16.8.3	Frequenzumrichter	365

16.8.3.1	U/f-Kennliniensteuerung	367
16.8.3.2	Feldorientierte Regelung	368
16.8.4	Abschätzung der Zwischenkreisgrößen	371
16.9	Energieeffizienz von elektrischen Antrieben	373
	Literatur	378
17	Leistungselektronik und EMV	379
17.1	Grundbegriffe	379
17.2	Störgrößen – Ursachen	381
17.2.1	Störgröße Spannungssteilheit	381
17.2.2	Störgröße Stromsteilheit	382
17.2.3	Auswirkungen parasitärer Elemente	384
17.3	Störfestigkeit	387
17.4	Störvermögen	388
17.4.1	Leitungsgebundene Störungen	388
17.4.2	Nicht leitungsgebundene Störungen	388
17.4.2.1	Kapazitive Beeinflussungen	388
17.4.2.2	Induktive Beeinflussungen	389
17.4.2.3	Elektromagnetische Beeinflussungen	390
17.4.3	Psophometrischer Störstrom	390
17.5	Netzfilter	391
17.6	Motoranpassung an den Stromrichter	396
17.6.1	Lagerströme	396
17.6.2	Wanderwellenprobleme	397
17.6.3	Ausgangsfiler	400
17.6.4	Ableitströme	402
17.7	Weitere Maßnahmen	403
	Literatur	406
18	Gleichspannungswandler	407
18.1	Tiefsetzsteller	407
18.2	Ausführungsbeispiel zum Tiefsetzsteller	408
18.3	Gleichstromsteller	409
18.4	Gleichstromsteller mit aktiver Last	411
18.5	Lückbetrieb	413
18.6	Hochsetzsteller	417
18.7	Hoch-Tiefsetzsteller	420
18.8	Sperrwandler	422
18.9	Durchflusswandler	423
18.9.1	Eintaktwandler	424
18.9.2	Gegentaktwandler	425
18.9.3	Vollbrückenwandler	426

18.10	Resonanzwandler	429
18.10.1	Der LC-Resonanzwandler	430
18.10.2	Der LLC-Resonanzwandler	432
18.10.3	Schaltverluste	433
18.11	Schaltnetzteile	439
18.11.1	Sekundär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler)	440
18.11.2	Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler)	441
18.11.3	Elektronischer Transformator (AC-AC-Wandler)	441
18.11.4	Pulsleichrichter	442
18.11.5	Kontaktlose Energieübertragungssysteme	443
18.11.6	Energiesparlampen	445
	Literatur	448
19	Stromversorgungen	449
19.1	Energieversorgungsnetze	449
19.2	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen	452
19.2.1	Online-Systeme	453
19.2.2	Offline-Systeme	453
19.3	Photovoltaische Stromversorgungen	454
19.3.1	Wechselrichter Wirkungsgrad	456
19.3.2	Einfluss der Netzimpedanz	456
19.3.3	Leistungsflusssteuerung mit FACTS	458
19.4	Brennstoffzellen-Stromversorgungen	459
19.5	Energiespeicher	461
	Literatur	467
20	Konzepte für elektrische Fahrzeugantriebe	469
20.1	Speichertechnologien für Elektrofahrzeuge	472
20.2	Bordnetz	478
20.3	Fahrzeug- und Ladetechnologien	479
20.3.1	Ladebetriebsarten	480
20.3.2	Ladeverbund	482
	Literatur	485
	Stichwortverzeichnis	487