
Joachim Specovius

Grundkurs Leistungselektronik

Bauelemente, Schaltungen und Systeme

9., überarbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer Vieweg

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
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	26
3.2.3.2	Ausschalten	28
3.2.3.3	Schaltverluste	30
3.2.4	Reihenschaltung	31
3.2.5	Parallelschaltung	32
3.2.6	Einsatzkriterien für Dioden	35
3.3	Solarzelle	36

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 ($u_{BC} > 0$)	49
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	60
4.3	Der IG-Feldeffekttransistor (MOSFET)	61
4.3.1	Aufbau	61
4.3.2	Die Kennlinie	65
4.3.3	Die Gatekapazität	66
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	71
4.4.3.1	Einschalten	71
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	81
4.5.2	Ausführung einer IGBT-Ansteuerung	82
4.5.2.1	Ansteuerung eines Halbbrückenmoduls	83
4.5.2.2	Impulslogik	85
4.5.2.3	Ventilbelastung	86
4.6	Aufbau- und Verbindungstechnik	87
4.6.1	Problematik	87
4.6.2	Gehäuseformen	88
4.6.2.1	Diskrete Bauelemente	88
4.6.2.2	IGBT-Leistungsmodule	90

4.6.3	Eigenschaften von Leistungsmodulen	91
4.6.3.1	Lastwechselfestigkeit	91
4.6.3.2	Verhalten bei Moduldefekt	93
4.6.3.3	Parasitäre Induktivitäten	93
4.6.3.4	EMV-Verhalten	93
5	Thyristoren	95
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	95
5.2	Kennlinie	97
5.3	Das Einschaltverhalten	98
5.3.1	Überschreiten der zulässigen Blockierspannung	98
5.3.2	Überschreiten der zulässigen Spannungssteilheit	98
5.3.3	Gatestromzündung	98
5.4	Ausschalten	101
5.4.1	Netzgeführter Betrieb	101
5.4.2	Selbstgeführter Betrieb	102
5.5	Ausführungsformen	104
5.5.1	Amplifying Gate-Struktur	105
5.5.2	Zweirichtungs-Thyristoren	105
5.5.3	Der asymmetrisch sperrende Thyristor	106
5.5.4	Der lichtzündbare Thyristor	106
5.6	Abschaltbarer Thyristor (GTO)	106
5.6.1	Der asymmetrisch sperrende GTO	106
5.6.2	Ansteuerung	107
5.6.2.1	Einschalten	107
5.6.2.2	Ausschalten	107
5.6.3	Betriebsbedingungen für einen GTO	109
5.6.4	IGCT	110
5.7	Auswahl von Leistungsbauelementen	110
6	Wärme Management	111
6.1	Die Verlustleistung	111
6.2	Das thermische Ersatzschaltbild	113
6.2.1	Der innere Wärmewiderstand $R_{th,JC}$	114
6.2.2	Der äußere Wärmewiderstand $R_{th,CA}$	114
6.2.3	Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers	115
6.2.4	Die Wärmekapazität C_{th}	117
6.3	Kühlmedien	121
6.3.1	Luftkühlung	121
6.3.2	Wasserkühlung	121
6.3.3	Siedekühlung	122

7	Stromrichterschaltungen	125
7.1	Grundfunktionen	125
7.2	Kennzeichnung von Stromrichterschaltungen	125
7.3	Einteilung nach der inneren Wirkungsweise	126
7.4	Leistungssteuerverfahren	127
7.5	Mittelpunktschaltung M1	128
7.5.1	Bauleistung des Transformators	132
7.5.2	Kapazitive Last	133
7.5.3	Ohmsch-induktive Last	135
7.5.4	Ohmsch-induktive Last mit Freilaufdiode	136
7.6	Wechselwegschaltung W1	137
7.6.1	Stellerbetrieb mit ohmscher Last	138
7.6.2	Stellerbetrieb mit ohmsch-induktiver Last	140
7.6.3	Schaltbetrieb mit ohmsch-induktiver Last	141
8	Wechselstromschaltungen	143
8.1	Die Mittelpunktschaltung M2U	143
8.2	Die gesteuerte Mittelpunktschaltung M2C	144
8.2.1	Die Wirkungsweise des Steuergenerators	144
8.2.2	Gleichspannungsbildung	145
8.2.2.1	Ohmsche Last	145
8.2.2.2	Ohmsch-induktive Last	146
8.2.2.3	Aktive Last	148
8.2.3	Ventilbelastung	151
8.2.4	Trafo- und Netzgrößen	152
8.2.5	Bemessung einer Glättungsinduktivität	153
8.2.6	Die Kommutierung	156
8.2.6.1	Überlappung	157
8.2.6.2	Die induktive Gleichspannungsänderung	159
8.3	Die Brückenschaltung B2	162
8.3.1	Die halbgesteuerte Brückenschaltung B2H	164
8.3.2	Ventilbelastung	164
8.3.3	Bauleistung des Transformators	164
9	Drehstromschaltungen	167
9.1	Die Mittelpunktschaltung M3	167
9.1.1	Gleichspannungsbildung	167
9.1.1.1	Ohmsche Last	167
9.1.1.2	Aktive Last	171
9.1.2	Ventilbelastung	171
9.1.2.1	Spannung	173
9.1.2.2	Strom	173
9.1.3	Netzstrom	175

9.1.4	Die Kommutierung	176
9.1.4.1	Einfluss auf die Gleichspannung	178
9.1.4.2	Berechnung des induktiven Gleichspannungsabfalls	179
9.1.4.3	Einfluss auf die Ventilspannung	183
9.2	Die Brückenschaltung B6	183
9.2.1	Gleichspannungsbildung	183
9.2.2	Leitzustände der Ventile	184
9.2.3	Steuerkennlinie	186
9.2.4	Stromrichtereingangsstrom	186
9.2.5	Netzstrom	187
9.2.6	Bauleistung des Transformators	188
9.3	Zündimpulse	189
9.3.1	Gleichspannungsbildung	191
9.3.2	Einfluss der Kommutierungen	193
9.3.3	Auswirkungen nicht idealer Glättung auf die Gleichspannung	197
9.4	12-pulsige Schaltungen	198
9.4.1	Stromrichter-Reihenschaltung	199
9.4.2	Stromrichter-Parallelschaltung	199
9.5	Höherpulsige Schaltungen	203
10	Netzurückwirkungen	205
10.1	Blindleistungsverhalten	205
10.1.1	Die Kennlinie der Steuerblindleistung	206
10.1.2	Oberschwingungsblindleistung	207
10.2	Stromüberschwingungen	208
10.2.1	Stromglättung	209
10.2.2	Spannungsglättung	212
10.2.2.1	Passive PFC-Schaltung	213
10.2.2.2	Aktive PFC-Schaltung	214
10.2.2.3	Vier Quadranten Steller	217
10.3	Spannungsüberschwingungen	220
10.3.1	B2-Schaltung	221
10.3.2	B6-Schaltung	222
11	Lastgeführte Stromrichter	229
11.1	Schwingkreiswechselrichter	229
11.1.1	Betrieb mit eingepprägter Gleichspannung	229
11.1.2	Betrieb mit eingepprägtem Gleichstrom	233
11.2	Vergleich der Wechselrichtertypen	234
11.3	Schwingkreiswechselrichter mit abschaltbaren Ventilen	235
11.3.1	Strom- und spannungsloses Schalten	237
11.3.2	Anwendungsbeispiel zum stromlosen Schalten (ZCS)	238

12	Selbstgeführte Stromrichter	241
12.1	Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (UWR)	241
12.1.1	Mittelpunktschaltung mit AC-seitigem Mittelpunkt	241
12.1.2	Ausführungsbeispiel mit Thyristorschalter	242
12.1.3	3-phasige Brückenschaltungen	246
12.1.3.1	Betrieb mit passiver Last	248
12.1.3.2	Betrieb mit einer Drehfeldmaschine	249
12.1.3.3	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung	250
12.2	Wechselrichter mit eingepprägtem Strom (IWR)	252
12.2.1	Prinzip	252
12.2.2	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung	255
12.2.2.1	Die Wechselrichtervorladung	259
12.2.2.2	Anfahrverhalten	260
13	Die Wirkungsweise selbstgeführter UWR	263
13.1	Schaltungen in Zweipunkttechnik (2-level-inverter)	263
13.1.1	Schaltfunktionen	265
13.1.2	Kurzzeit-Mittelwert	267
13.1.3	Der Modulator	268
13.1.4	Modulationsfunktion	268
13.1.5	Aussteuerung	270
13.1.6	1-phasige Brückenschaltung	271
13.1.6.1	Grundfrequenztaktung	272
13.1.6.2	Schwenksteuerung	272
13.1.6.3	Pulsweitenmodulation	273
13.1.7	3-phasige Brückenschaltung	274
13.1.7.1	Die Spannungsbildung	275
13.1.7.2	Der Zwischenkreisstrom	278
13.2	Schaltungen in Mehrpunkttechnik (Multi-Level-Inverter)	282
13.2.1	Schaltungen in Dreipunkttechnik (3-level-inverter)	284
13.2.1.1	1-phasige Brückenschaltung	287
13.2.1.2	3-phasige Brückenschaltung	288
13.2.2	Schaltungen in Vierpunkttechnik (4-level-inverter)	291
14	Drehstromgrößen in Raumzeigerdarstellung	293
14.1	Raumzeigertransformation	293
14.2	Stromrichterspeisung	297
15	Steuerverfahren für UWR	301
15.1	Begriffe	302
15.2	Die Grundfrequenzsteuerung	306

15.3	Die Pulsweitenmodulation (PWM)	308
15.3.1	1-phasige Mittelpunktschaltung	309
15.3.2	1-phasige Brückenschaltung	312
15.4	Schaltfunktionen für 3-phasige Schaltungen	314
15.4.1	Taktsteuerung	314
15.4.2	Pulssteuerung	314
15.4.3	Steuerkennlinie	317
15.4.4	Off-line optimierte Schaltfunktionen	319
15.4.5	Eliminationsmethode	319
15.4.6	Optimierte Pulsmuster	321
15.4.7	Raumzeigermodulation	321
16	Stromrichter und Maschinen	325
16.1	Gleichstrommaschinen	325
16.2	Elektronikmotor	328
16.3	Der geschaltete Reluktanzmotor (SRM)	330
16.4	Stromrichter motor	333
16.5	Drehfeldmaschinen	337
16.6	Zusatzverluste durch Stromrichterspeisung	341
16.7	Leistungssteuerung bei konstanter Ständerfrequenz	342
16.7.1	Drehstromsteller W3	343
16.7.2	Pulsgesteuerter Läuferwiderstand	345
16.7.3	Stromrichter kaskade	346
16.7.3.1	Ausführung mit Stromzwischenkreis	347
16.7.3.2	Ausführung mit Spannungszwischenkreis	349
16.8	Leistungssteuerung bei variabler Ständerfrequenz	350
16.8.1	Prinzip des Direktumrichters	350
16.8.2	3-phasiger Direktumrichter	353
16.8.3	Frequenzumrichter	354
16.8.3.1	<i>U/f</i> -Kennliniensteuerung	356
16.8.3.2	Feldorientierte Regelung	358
16.8.4	Abschätzung der Zwischenkreisgrößen	360
16.9	Energieeffizienz von elektrischen Antrieben	362
17	Leistungselektronik und EMV	367
17.1	Grundbegriffe	367
17.2	Störgrößen – Ursachen	368
17.2.1	Störgröße Spannungsteilheit	368
17.2.2	Störgröße Stromteilheit	371
17.2.3	Auswirkungen parasitärer Elemente	373
17.3	Störfestigkeit	376

17.4	Störvermögen	376
17.4.1	Leitungsgebundene Störungen	376
17.4.2	Nicht leitungsgebundene Störungen	376
17.4.2.1	Kapazitive Beeinflussungen	377
17.4.2.2	Induktive Beeinflussungen	377
17.4.2.3	Elektromagnetische Beeinflussungen	378
17.4.3	Psophometrischer Störstrom	378
17.5	Netzfilter	379
17.6	Motoranpassung an den Stromrichter	384
17.6.1	Lagerströme	384
17.6.2	Wanderwellenprobleme	385
17.6.3	Ausgangsfilter	387
17.6.4	Ableitströme	389
17.7	Weitere Maßnahmen	390
18	Gleichspannungswandler	395
18.1	Tiefsetzsteller	395
18.2	Ausführungsbeispiel zum Tiefsetzsteller	396
18.3	Gleichstromsteller	397
18.4	Gleichstromsteller mit aktiver Last	399
18.5	Lückbetrieb	401
18.6	Hochsetzsteller	404
18.7	Hoch-Tiefsetzsteller	407
18.8	Sperrwandler	409
18.9	Durchflusswandler	411
18.9.1	Eintaktwandler	411
18.9.2	Gegentaktwandler	411
18.9.3	Vollbrückenwandler	413
18.10	Resonanzwandler	415
18.10.1	Der LC-Resonanzwandler	416
18.10.2	Der LLC-Resonanzwandler	419
18.10.3	Schaltverluste	421
18.11	Schaltnetzteile	426
18.11.1	Sekundär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler)	427
18.11.2	Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler)	427
18.11.3	Elektronischer Transformator (AC-AC-Wandler)	428
18.11.4	Pulsleichrichter	429
18.11.5	Kontaktlose Energieübertragungssysteme	430
18.11.6	Energiesparlampen	431

19	Stromversorgungen	435
19.1	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen	435
19.1.1	Online-Systeme	436
19.1.2	Offline-Systeme	436
19.2	Photovoltaische Stromversorgungen	437
19.2.1	Wechselrichter Wirkungsgrad	439
19.2.2	Einfluss der Netzimpedanz	440
19.2.3	Leistungsflusssteuerung mit FACTS	440
19.3	Brennstoffzellen-Stromversorgungen	442
19.4	Energiespeicher	443
19.4.1	Konzepte für akkugestützte Fahrzeugantriebe	449
19.4.2	Speichertechnologien für Elektrofahrzeuge	452
	Literatur	457
	Sachverzeichnis	459