

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	Treiberschaltungen	66
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 Spannungsteilheit	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	Die Wärmekapazität C_{th}	99
6.2.4	Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers.....	100

10.2.2.1	Passive PFC-Schaltung.....	183
10.2.2.2	Aktive PFC-Schaltung.....	184
10.3	Spannungsüberschwingungen.....	187
10.3.1	B2-Schaltung.....	187
10.3.2	B6-Schaltung	189
11	Lastgeführte Stromrichter.....	195
11.1	Schwingkreiswechselrichter.....	195
11.1.1	Betrieb mit eingprägter Gleichspannung	195
11.1.2	Betrieb mit eingprägtem Gleichstrom	198
11.1.3	Vergleich der Wechselrichtertypen.....	200
11.2	Schwingkreiswechselrichter mit abschaltbaren Ventilen.....	200
11.2.1	Strom- und spannungsloses Schalten.....	202
11.2.2	Anwendungsbeispiel zum stromlosen Schalten (ZCS).....	203
12	Selbstgeführte Stromrichter.....	205
12.1	Wechselrichter mit eingprägter Spannung (UWR).....	205
12.1.1	Mittelpunktschaltung mit AC-seitigem Mittelpunkt	206
12.1.2	Ausführungsbeispiel mit Thyristorschalter.....	207
12.1.3	3-phasige Brückenschaltungen.....	210
12.1.3.1	Betrieb mit passiver Last	212
12.1.3.2	Betrieb mit einer Drehfeldmaschine.....	212
12.1.3.3	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung.....	214
12.2	Wechselrichter mit eingprägtem Strom (IWR).....	216
12.2.1	Prinzip.....	216
12.2.2	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung.....	219
13	Die Wirkungsweise selbstgeführter UWR.....	223
13.1	Schaltungen in Zweipunkttechnik (2-level-inverter).....	224
13.1.1	Schaltfunktionen.....	225
13.1.2	Kurzzeit-Mittelwert.....	226
13.1.3	Der Modulator.....	227
13.1.4	Modulationsfunktion	228
13.1.5	Aussteuerung.....	229
13.1.6	1-phasige Brückenschaltung	230
13.1.6.1	Grundfrequenztaktung.....	231
13.1.6.2	Schwenksteuerung.....	232

13.1.6.3	Pulsweitenmodulation.....	233
13.1.7	3-phasige Brückenschaltung.....	234
13.1.7.1	Die Spannungsbildung.....	235
13.1.7.2	Der Zwischenkreisstrom	238
13.2	Schaltungen in Dreipunkttechnik (3-level-inverter).....	242
13.2.1	1-phasige Brückenschaltung.....	245
13.2.2	3-phasige Brückenschaltung.....	246
13.3	Multi-level-Schaltungen.....	249
14	Drehstromgrößen in Raumzeigerdarstellung.....	251
14.1	Raumzeigertransformation.....	251
14.2	Stromrichterspeisung.....	255
15	Steuerverfahren für UWR.....	257
15.1	Begriffe.....	257
15.2	Die Grundfrequenzsteuerung.....	262
15.3	Die Pulsweitenmodulation (PWM).....	263
15.3.1	Digitale Schaltungen.....	266
15.3.2	Schaltfunktionen für 3-phasige Schaltungen.....	267
15.3.3	Steuerkennlinie.....	270
15.3.4	Off-line optimierte Schaltfunktionen.....	272
15.3.5	Eliminationsmethode	272
15.3.6	Optimierte Pulsmuster.....	273
15.3.7	Raumzeigermodulation.....	274
16	Stromrichter und Maschinen.....	277
16.1	Gleichstrommaschinen.....	277
16.2	Elektronikmotor.....	280
16.3	Stromrichtermotor.....	281
16.4	Drehfeldmaschinen.....	284
16.5	Zusatzverluste durch Stromrichterspeisung.....	288
16.6	Leistungssteuerung bei konstanter Ständerfrequenz.....	289
16.6.1	Drehstromsteller W3.....	290
16.6.2	Pulsgesteuerter Läuferwiderstand.....	291
16.6.3	Stromrichter-kaskade.....	292
16.6.3.1	Ausführung mit Stromzwischenkreis.....	293
16.6.3.2	Ausführung mit Spannungszwischenkreis.....	294
16.7	Leistungssteuerung bei variabler Ständerfrequenz.....	296

16.7.1	Prinzip des Direktumrichters.....	296
16.7.2	3-phasiger Direktumrichter.....	299
16.7.3	Frequenzumrichter.....	299
16.7.3.1	U/f-Kennliniensteuerung.....	302
16.7.3.2	Feldorientierte Regelung.....	303
16.7.4	Abschätzung der Zwischenkreisgrößen.....	305
16.8	Energieeffizienz von elektrischen Antrieben.....	307
17	Leistungselektronik und EMV.....	311
17.1	Grundbegriffe.....	311
17.1.1	Störgrößen in der Leistungselektronik.....	312
17.1.2	Störfestigkeit.....	314
17.1.3	Störvermögen.....	314
17.1.4	Leitungsgebundene Störungen.....	314
17.1.5	Nicht leitungsgebundene Störungen.....	314
17.1.5.1	Kapazitive Beeinflussungen.....	314
17.1.5.2	Induktive Beeinflussungen.....	315
17.1.5.3	Elektromagnetische Beeinflussungen.....	315
17.1.6	Psophometrischer Störstrom.....	316
17.2	Netzfilter.....	316
17.3	Motoranpassung an den Stromrichter.....	320
17.3.1	Lagerströme.....	320
17.3.2	Wanderwellenprobleme.....	320
17.3.3	Ausgangsfilter.....	323
17.4	Weitere Maßnahmen.....	324
18	Gleichspannungswandler.....	327
18.1	Tiefsetzsteller.....	327
18.2	Ausführungsbeispiel zum Tiefsetzsteller.....	327
18.3	Gleichstromsteller.....	328
18.4	Gleichstromsteller mit aktiver Last.....	331
18.5	Lückbetrieb.....	333
18.6	Hochsetzsteller.....	336
18.7	Hoch-Tiefsetzsteller.....	337
18.8	Sperrwandler.....	339
18.9	Durchflusswandler.....	340
18.10	Schaltnetzteile.....	341
18.10.1	Sekundär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler).....	342

18.10.2	Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler).....	342
18.10.3	Elektronischer Transformator (AC-AC-Wandler).....	343
18.10.4	Pulsleichrichter.....	343
18.10.5	Kontaktlose Energieübertragungssysteme.....	345
18.10.6	Energiesparlampen.....	346
18.10.6.1	Kompakt-Leuchtstofflampe.....	346
18.10.6.2	Leuchtdioden (LEDs).....	347
19	Stromversorgungen.....	349
19.1	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen.....	349
19.1.1	Online-Systeme.....	350
19.1.2	Offline-Systeme.....	350
19.2	Photovoltaische Stromversorgungen.....	351
19.3	Brennstoffzellen-Stromversorgungen.....	352
19.4	Energiespeicher.....	353
19.4.1	Konzepte für akkugestützte Fahrzeugantriebe.....	359
19.4.2	Speichertechnologien für Elektrofahrzeuge.....	360
	Formelzeichen.....	364
	Weiterführende Literatur.....	367
	Sachwortverzeichnis.....	369