

# Inhalt

<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Leistungs-Halbleiterbauelemente .....</b>	<b>2</b>
2.1 Einführung in die Physik der Halbleiter.....	2
2.1.1 Eigenleitung.....	3
2.1.2 Störstellenleitung .....	4
2.1.3 Der PN-Übergang .....	5
2.1.3.1 Sperrrichtung .....	6
2.1.3.2 Durchlassrichtung.....	7
2.2 Dioden .....	7
2.2.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	7
2.2.2 Strom-Spannungs-Kennlinie.....	8
2.2.3 Schaltverhalten von Dioden.....	9
2.2.3.1 Einschaltvorgang .....	10
2.2.3.2 Ausschaltvorgang .....	11
2.3 Bipolare Leistungstransistoren.....	12
2.3.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	12
2.3.2 Der Transistor als Schalter.....	14
2.3.2.1 Einschaltvorgang .....	15
2.3.2.2 Ausschaltvorgang .....	16
2.3.3 Transistoren in Darlington-Schaltung.....	18
2.4 Feldeffekt-Leistungstransistoren.....	19
2.4.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	19
2.4.2 Schaltverhalten von Leistungs-Feldeffektransistoren.....	22
2.5 Bipolare Transistoren mit isoliertem Steueranschluss (IGBTs).....	24
2.5.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	24
2.5.2 Schaltverhalten.....	26
2.6 Thyristoren .....	28
2.6.1 Aufbau und Wirkungsweise.....	28
2.6.2 Schaltverhalten von Thyristoren .....	30

2.6.2.1 Kritische Stromsteilheit .....	30
2.6.2.2 Kritische Spannungssteilheit .....	31
2.6.2.3 Einschaltvorgang .....	32
2.6.2.4 Ausschaltvorgang .....	33
2.6.3 Zündung von Thyristoren – Phasenanschnittsteuerung .....	34
2.6.4 Thyristorarten.....	37
2.6.4.1 Zweirichtungs-Thyristoren (Triac, Diac).....	38
2.6.4.2 Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR) .....	39
2.6.4.3 Rückwärts leitender Thyristor .....	40
2.6.4.4 Lichtgezündeter Thyristor.....	40
2.6.5 Abschaltbarer Thyristor (GTO-Thyristor) .....	41
2.6.5.1 Aufbau und Arbeitsweise .....	41
2.6.5.2 Schaltverhalten .....	43
2.6.5.3 IGCT-Thyristor .....	46
2.6.6 MOS-gesteuerter Thyristor (MCT).....	46
2.7 Intelligente Leistungshalbleiter (Smart-Power-Elemente).....	48
2.8 Gehäuseformen von Leistungshalbleitern.....	49
2.9 Thermisches Verhalten von Leistungshalbleitern .....	51
2.9.1 Entstehung der Verlustleistungen .....	51
2.9.1.1 Ermittlung der Durchlassverluste .....	52
2.9.1.2 Ermittlung der Schaltverluste .....	55
2.9.2 Abführung der Verlustleistungen – thermisches Ersatzschaltbild .....	57
2.9.3 Kühlung .....	61
2.10 Schutz von Leistungshalbleitern .....	62
2.10.1 Überstromschutz .....	62
2.10.2 Überspannungsschutz .....	63
2.11 Reihen- und Parallelschaltung von Leistungshalbleitern .....	64
2.11.1 Reihenschaltung .....	65
2.11.2 Parallelschaltung .....	65
<b>3 Netzgeführte Stromrichter .....</b>	<b>67</b>
3.1 Zweipuls-Mittelpunktschaltung .....	68
3.1.1 Ohmsche Belastung .....	68
3.1.2 Glättung der Gleichspannung durch einen Kondensator .....	70
3.1.3 Glättung des Gleichstromes durch eine Drosselspule.....	72
3.1.4 Bauleistung des Transformators .....	74

3.1.5 Die gesteuerte Schaltung .....	78
3.1.6 Wechselrichterbetrieb .....	88
3.1.7 Kommutierung .....	92
3.1.8 Gleichspannungsänderung bei Belastung .....	98
3.1.9 Steuerwinkelgrenzwert beim Wechselrichterbetrieb .....	102
3.1.10 Steuerblindleistung und Verzerrungsleistung .....	105
3.1.11 Kommutierungsblindleistung .....	111
3.1.12 Bemessung der Induktivität der Glättungsdrossel .....	113
3.1.13 Lückbetrieb .....	117
3.2 Zweipuls-Brückenschaltung .....	123
3.2.1 Vollgesteuerte Schaltung .....	123
3.2.2 Halbgesteuerte Schaltung .....	129
3.3 Dreipuls-Mittelpunktschaltung .....	135
3.3.1 Aufbau und Betrieb bei Vollaussteuerung .....	135
3.3.2 Betrieb bei Teilaussteuerung .....	139
3.3.3 Berücksichtigung der Kommutierungsinduktivitäten .....	143
3.4 Sechspuls-Brückenschaltung .....	145
3.4.1 Aufbau und Funktion .....	145
3.4.2 Die halbgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung .....	151
3.5 Zwölfpuls-Schaltungen .....	156
3.6 Schaltungen mit verminderter Blindleistungsaufnahme .....	159
3.6.1 Schaltungen mit Freilaufdiode .....	160
3.6.2 Folgesteuerung .....	161
3.7 Netzrückwirkungen .....	163
3.7.1 Grundschwingungs-Blindleistung .....	163
3.7.2 Stromoberschwingungen .....	164
3.7.3 Spannungsoberschwingungen .....	167
<b>4 Wechsel- und Drehstromschalter und -steller .....</b>	<b>170</b>
4.1 Wechsel- und Drehstromschalter .....	170
4.1.1 Wechselstromschalter .....	170
4.1.2 Drehstromschalter .....	173
4.2 Wechsel- und Drehstromsteller .....	174
4.2.1 Wechselstromsteller mit Phasenanschnittsteuerung .....	174
4.2.2 Blindleistungsverhalten des phasenanschnittgesteuerten Wechselstromstellers .....	178
4.2.3 Phasenabschnittsteuerung, Sektorsteuerung .....	181

4.2.4 Wechselstromsteller mit Schwingungspaketsteuerung .....	182
4.2.5 Drehstromsteller.....	184
<b>5 Selbstgeführte Stromrichter .....</b>	<b>188</b>
5.1 Thyristor-Lösung durch Anwendung von Löschschaltungen .....	188
5.2 Gleichstromsteller .....	192
5.2.1 Tiefsetz-Gleichstromsteller.....	192
5.2.2 Hochsetz-Gleichstromsteller.....	197
5.2.3 Hochsetz-Tiefsetz-Gleichstromsteller .....	200
5.2.4 Umkehrung der Energierichtung.....	203
5.2.5 Vierquadranten-Gleichstromsteller.....	204
5.3 Selbstgeführte Wechselrichter.....	209
5.3.1 Spannungs-Wechselrichter .....	209
5.3.1.1 Einphasiger Spannungs-Wechselrichter .....	210
5.3.1.2 Dreiphasiger Spannungs-Wechselrichter.....	213
5.3.1.3 Einphasiger Spannungs-Pulswechselrichter .....	218
5.3.1.4 Dreiphasiger Spannungs-Pulswechselrichter.....	221
5.3.1.5 Dreiphasiger Spannungs-Wechselrichter mit Drei- punktverhalten .....	225
5.3.2 Strom-Wechselrichter .....	226
5.3.2.1 Dreiphasiger Strom-Wechselrichter mit abschalt- baren Leistungshalbleitern.....	227
5.3.2.2 Dreiphasiger Strom-Wechselrichter mit konventi- onellen Thyristoren .....	229
5.3.2.3 Strom-Pulswechselrichter .....	232
5.4 Netzparallel betriebene selbstgeführte Stromrichter .....	234
5.4.1 Wechselstrom-Gleichstrom-Wandler mit sinusförmigem Eingangstrom.....	235
5.4.2 Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom- Wechselstrom-Wandler mit sinusförmigem Netzstrom.....	238
5.4.2.1 Einphasiger Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstrom-Wandler mit sinus- förmigem Netzstrom .....	238
5.4.2.2 Dreiphasiger Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstrom-Wandler mit sinus- förmigem Netzstrom .....	242
5.4.3 Blindleistungsstromrichter.....	245
5.4.4 Netzspannungsstabilisierung .....	248

<b>6 Lastgeführte Wechselrichter .....</b>	250
6.1 Parallelschwingkreis-Wechselrichter .....	250
6.2 Reihenschwingkreis-Wechselrichter .....	254
<b>7 Umrichter.....</b>	258
7.1 Zwischenkreis-Wechselstromumrichter .....	258
7.1.1 Wechselstromumrichter mit Gleichspannungs- Zwischenkreis (U-Umrichter).....	259
7.1.2 Wechselstromumrichter mit Gleichstrom-Zwischenkreis (I-Umrichter).....	261
7.2 Netzgeführte Direktumrichter .....	263
7.3 Zwischenkreis-Gleichstromumrichter .....	267
7.3.1 Durchflusswandler .....	267
7.3.2 Sperrwandler .....	274
<b>8 Stromrichteranwendungen in der elektrischen Antriebstechnik .....</b>	278
8.1 Gleichstromantriebe .....	278
8.1.1 Schaltungsaufbau und Betriebsverhalten der fremderreg- ten, stromrichtergespeisten Gleichstrommaschine.....	278
8.1.2 Drehrichtungsumkehr mit einem Umkehrstromrichter.....	284
8.1.3 Drehzahlgeregelter Gleichstromantrieb mit fremderregter Gleichstrommaschine.....	286
8.1.4 Drehzahlverstellung und Drehrichtungsumkehr mit einem Vierquadranten-Gleichstromsteller.....	289
8.1.5 Gleichstromantrieb mit Reihenschlussmaschine .....	293
8.2 Reihenschlussmotor mit Wechselstromsteller.....	295
8.3 Drehstromantriebe .....	296
8.3.1 Aufbau und Arbeitsweise von Drehstrommotoren .....	296
8.3.1.1 Drehstrom-Synchronmotor .....	297
8.3.1.2 Drehstrom-Asynchronmotor .....	298
8.3.1.3 Drehstrom-Reluktanzmotor .....	300
8.3.2 Drehzahlverstellung durch Umrichter mit Spannungszwi- schenkreis (U-Umrichter) .....	300
8.3.2.1 Kurvenform der erzeugten Spannungen und Raumzeiger-Ortskurve des magnetischen Dreh- flusses .....	301
8.3.2.2 Spannungs-Frequenz-Kennlinien und Kennlinien- Steuerung .....	306

8.3.2.3 Feldorientierte Regelung .....	308
8.3.2.4 Bremsbetrieb.....	311
8.3.2.5 Schlupfkompensation .....	313
8.3.2.6 Überstromschutz .....	313
8.3.3 Drehzahlverstellung durch Umrichter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter).....	313
8.3.4 Stromrichtermotor.....	315
8.3.5 Drehzahlverstellung durch Direktumrichter .....	318
8.3.6 Drehzahlverstellung durch Steuerung der Ständerspannung .....	319
8.3.7 Die untersynchrone Stromrichterkaskade .....	321
8.3.8 Asynchronmaschine mit gepulstem Läuferwiderstand .....	323
8.3.9 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit Spannungs- zwischenkreis-Umrichter .....	325
<b>8.4 Elektronisch kommutierte Maschine (Elektronikmotor).....</b>	<b>327</b>
8.4.1 Aufbau und Arbeitsweise.....	327
8.4.2 Bestromung der Wicklungen .....	329
8.4.3 Betriebsverhalten .....	329
8.4.4 Gebersysteme.....	330
8.4.4.1 Inkrementalgeber .....	331
8.4.4.2 Resolver .....	332
<b>8.5 Schrittmotoren.....</b>	<b>333</b>
8.5.1 Aufbau und Arbeitsweise.....	333
8.5.2 Vollschriftbetrieb, Halbschriftbetrieb, Mikroschriftbetrieb .....	334
8.5.3 Unipolare und bipolare Ansteuerung .....	335
8.5.4 Strangzahlen und Polpaarzahlen von Schrittmotoren .....	336
8.5.5 Ausführungsformen (Bauformen).....	337
8.5.6 Bestromung der Wicklungen .....	339
8.5.6.1 Blockbestromung .....	340
8.5.6.2 Sinusbestromung .....	343
<b>Verzeichnis der wichtigsten Symbole .....</b>	<b>346</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>350</b>
<b>Sachverzeichnis.....</b>	<b>351</b>