

---

Dierk Schröder • Rainer Marquardt  
Hrsg.

# Leistungselektronische Schaltungen

Funktion, Auslegung und Anwendung

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Band 1

# Inhaltsverzeichnis

## Band 1

<b>1</b>	<b>Leistungselektronische Umformer (Grundlagen)</b>	<b>1</b>
1.1	Einteilung der Stromrichter nach der Art der Kommutierung . . .	5
<b>2</b>	<b>Netzgeführte Stromrichter</b>	<b>11</b>
2.1	Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2-Schaltung) . . . . .	11
2.1.1	Ohmsche Last . . . . .	12
2.1.2	Ideale Glättung . . . . .	15
2.1.3	Allgemeine ohmsch-induktive Last . . . . .	18
2.1.4	Gegenspannung im Lastkreis . . . . .	25
2.1.5	Netzgeführte Kommutierung . . . . .	30
2.1.6	Wechselrichterbetrieb . . . . .	36
2.1.7	Wechselrichterkippen . . . . .	39
2.2	Oberschwingungen und Netzurückwirkungen . . . . .	42
2.2.1	Oberschwingungen auf der Lastseite . . . . .	43
2.2.1.1	Ohmsche Last . . . . .	43
2.2.1.2	Ideale Glättung . . . . .	44
2.2.2	Oberschwingungen auf der Netzseite . . . . .	48
2.2.2.1	Ohmsche Last . . . . .	48
2.2.2.2	Ideale Glättung . . . . .	50
2.2.3	Netzurückwirkungen . . . . .	53
2.3	Blindleistung und Leistungsfaktor . . . . .	55
2.3.1	Ohmsche Last . . . . .	56
2.3.2	Ohmsch-induktive Last . . . . .	58
2.4	Transformator-Auslegung . . . . .	63
2.4.1	Gleichstrom-Vormagnetisierung . . . . .	63
2.4.1.1	M2-Schaltung . . . . .	63
2.4.1.2	M3-Schaltung . . . . .	64
2.4.2	Transformator-Bauleistung . . . . .	69
2.5	Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3) . . . . .	75
2.5.1	M3-Schaltung mit Netztrafo in Dy-Schaltung . . . . .	75
2.5.2	M3-Schaltung mit Netztrafo in Yz-Schaltung . . . . .	82
2.6	Brückenschaltungen . . . . .	84

2.6.1	Zweipuls-Brückenschaltung (B2-Schaltung) . . . . .	85
2.6.2	Sechspuls-Brückenschaltung (B6-Schaltung) . . . . .	88
2.6.3	Gegenüberstellung von Mittelpunkt- und Brückenschaltungen . . . . .	93
2.7	Höherpulsige Schaltungen . . . . .	94
2.7.1	Sechspuls-Mittelpunktschaltung (M6-Schaltung) . . . . .	94
2.7.2	Zwölfpuls-Brückenschaltung . . . . .	95
2.7.3	Zwölfpuls-Saugdrosselschaltung . . . . .	97
2.7.4	Höchstleistungs-Stellglieder, Beurteilungs-Kriterien . . . . .	100
2.8	Umkehrstromrichter . . . . .	105
2.8.1	Kreisstromfreie Gegenparallelschaltung . . . . .	107
2.8.2	Kreisstrombehaftete Kreuzschaltung . . . . .	109
2.8.3	H-Schaltung . . . . .	114
2.9	Blindleistungssparende Schaltungen . . . . .	119
2.9.1	Schaltungen mit Freilaufdiode . . . . .	121
2.9.2	Halbgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6H-Schaltung) . . . . .	126
2.9.3	Zu- und Gegenschaltung von Teilstromrichtern . . . . .	132
2.9.4	B6-Schaltung mit Hilfsthystoren . . . . .	135
2.9.5	Halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltungen (B2H-Schaltung) . . . . .	142
2.9.6	Folgesteuerung von Teilstromrichtern . . . . .	145
2.9.7	Sektorsteuerung . . . . .	151
<b>3</b>	<b>Direktumrichter</b> . . . . .	<b>154</b>
3.1	Trapezumrichter . . . . .	155
3.1.1	Einphasiger Trapezumrichter . . . . .	155
3.1.2	Mehrphasiger Trapezumrichter . . . . .	156
3.1.3	Frequenzelastischer Trapezumrichter . . . . .	158
3.2	Steuerungrichter . . . . .	159
3.3	Frequenzbeschränkung beim Direktumrichter . . . . .	162
3.4	Auslegungskriterien . . . . .	175
3.5	Regelung der direktumrichter-gespeisten Synchronmaschine . . . . .	176
3.5.1	Stationäres Flußmodell . . . . .	179
3.5.2	Dynamisches Flußmodell . . . . .	182
3.5.3	Stromregelkreise . . . . .	185
3.5.4	Trapezbetrieb . . . . .	185
3.5.5	Synchronmaschine . . . . .	186
3.6	Direktumrichter mit abschaltbaren Halbleitern . . . . .	186
3.7	Matrixkonverter . . . . .	189
	<i>Prof. Dr. J. W. Kolar, Dr. F. Schafmeister, ETH Zürich</i>	
3.7.1	Einleitung . . . . .	189
3.7.2	Konzepte dreiphasiger AC/AC-Konverterschaltungen . . . . .	190
3.7.2.1	AC/AC-Konverter mit Zwischenspeicher . . . . .	190
3.7.2.2	AC/AC-Matrixkonverter . . . . .	195
3.7.2.3	Klassifizierung . . . . .	197
3.7.3	AC/AC-Konverter mit Spannungszwischenkreis . . . . .	199

3.7.3.1	Grundfunktion . . . . .	200
3.7.3.2	Spannungskonversion und Raumzeigermodulation . . . . .	201
3.7.3.3	Stromkonversion . . . . .	206
3.7.3.4	Funktions-Ersatzschaltbild . . . . .	209
3.7.4	AC/AC-Konverter mit Stromzwischenkreis . . . . .	210
3.7.4.1	Grundfunktion . . . . .	211
3.7.4.2	Stromkonversion und Raumzeigermodulation . . . . .	213
3.7.4.3	Spannungskonversion . . . . .	215
3.7.4.4	Funktions-Ersatzschaltbild . . . . .	220
3.7.5	AC/AC-Umrichter mit Spannungszwischenkreis ohne Energie- speicher . . . . .	220
3.7.5.1	Grundfunktion . . . . .	220
3.7.5.2	Spannungsübersetzungsverhältnis . . . . .	222
3.7.6	Indirekter Matrixkonverter . . . . .	226
3.7.6.1	Ableitung der Schaltungsstruktur . . . . .	226
3.7.6.2	Spannungs- und Stromkonversion . . . . .	229
3.7.6.3	Raumzeigermodulation . . . . .	232
3.7.6.4	Funktions-Ersatzschaltbild . . . . .	246
3.7.7	Vereinfachte Schaltungstopologien indirekter Matrixkonverter .	250
3.7.7.1	Sparse Matrix Converter . . . . .	251
3.7.7.2	Ultra-Sparse Matrix Converter . . . . .	252
3.7.7.3	Very-Sparse Matrix Converter . . . . .	254
3.7.8	Direkter Matrixkonverter . . . . .	255
3.7.8.1	Grundfunktion . . . . .	255
3.7.8.2	Schaltzustände . . . . .	257
3.7.8.3	Rotierende Strom- und Spannungsraumzeiger . . . . .	257
3.7.8.4	Feststehende Strom- und Spannungsraumzeiger . . . . .	260
3.7.8.5	Relation der Schaltzustände von CMC und IMC . . . . .	264
3.7.8.6	Raumzeigermodulation des CMC . . . . .	266
3.7.8.7	Mehrschrittkommutierung des CMC . . . . .	269
3.7.9	Erweiterungen der Matrixkonverter-Grundstrukturen . . . . .	273
3.7.9.1	Indirekte Dreipunkt-Matrixkonverter . . . . .	273
3.7.9.2	IMC mit nach Eingangsphasen getrennten Zwischenkreisen . . .	276
3.7.9.3	Matrixkonverter in Vollbrückenschaltung . . . . .	276
3.7.9.4	Hybride Matrixkonverter . . . . .	280
3.7.10	Diskussion . . . . .	283
3.7.10.1	Ausgangsspannungsbereich und Betriebseigenschaften . . . . .	284
3.7.10.2	Modulation . . . . .	284
3.7.10.3	Kommutierung . . . . .	285
3.7.10.4	Zwischenkreiskondensator und Ride-through . . . . .	285
3.7.10.5	EMV-Filter . . . . .	286
3.7.10.6	Verluste und Effizienz . . . . .	286
3.7.10.7	Komplexität der Schaltung und Realisierungsaufwand . . . . .	287
3.7.10.8	Kühlung und Baugröße . . . . .	288

3.7.10.9	Regelung . . . . .	288
3.7.10.10	Stillstand und Gleichheit von Ein- und Ausgangsfrequenz . . . . .	289
3.7.11	Ausblick . . . . .	289
<b>4</b>	<b>Untersynchrone Stromrichter­kaskade (USK)</b>	<b>291</b>
4.1	Aufbau und Funktion . . . . .	291
4.2	Quasistationäre Regelung der untersynchronen Kaskade . . . . .	306
4.3	Die USK und Net­zrückwirkungen . . . . .	311
4.4	Auslegung der untersynchronen Kaskade . . . . .	315
4.4.1	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer . . . . .	315
4.4.2	Anlaßwiderstand . . . . .	319
4.4.3	Gleichrichterbrücke . . . . .	324
4.4.4	Wechselrichterbrücke . . . . .	326
4.4.5	Zwischenkreisdrossel . . . . .	331
4.4.6	Blindleistungskompensation . . . . .	332
4.4.7	Schaltspannungsschutz . . . . .	333
4.4.8	Vorfluten der Dioden . . . . .	335
4.5	Sonderausführungen . . . . .	337
4.5.1	Umschaltbare Kaskade . . . . .	337
4.5.2	Zwölfpulsige Ausführung . . . . .	337
4.5.3	Schaltungen bei Netzunterbrechungen und Netzumschaltungen . . . . .	340
4.6	Zusammenfassung . . . . .	341
<b>5</b>	<b>Stromrichtermotor</b>	<b>343</b>
5.1	Prinzipielle Funktion . . . . .	343
5.1.1	Drehmomentverlauf . . . . .	349
5.1.2	Einfluß der Zwischenkreisdrossel . . . . .	351
5.1.3	Erregung der Synchronmaschine . . . . .	354
5.2	Steuerung und Auslegung . . . . .	355
5.2.1	Lastgeführte Kommutierung . . . . .	356
5.2.2	Auslegung des Systems . . . . .	360
5.2.3	Schonzeitregelung der Thyristoren . . . . .	365
5.3	Regelung des Stromrichtermotors . . . . .	366
5.4	Ausführungsbeispiel . . . . .	369
<b>6</b>	<b>Selbstgeführte Wechselrichter mit eingepprägtem Strom (I-Umrichter)</b>	<b>370</b>
6.1	Prinzipielles Systemverhalten . . . . .	370
6.2	Kommutierung des selbstgeführten Wechselrichters . . . . .	372
6.3	Auslegungsgang beim I-Umrichter mit Phasenfolgelöschung . . . . .	385
6.3.1	Kritische Betriebszustände . . . . .	385
6.3.2	Beanspruchung der Umrichterelemente . . . . .	389
6.3.2.1	Kommutierungs-Kondensator . . . . .	389

6.3.2.2	Thyristoren . . . . .	391
6.3.2.3	Dioden . . . . .	393
6.3.2.4	Kommutierungsdrosseln, Stufendrosseln . . . . .	393
6.3.2.5	Entlastungsschaltungen (TSE-Beschaltungen) . . . . .	395
6.3.2.6	Umrichter mit Zusatzschaltung . . . . .	398
6.3.3	Auslegung der Einspeisung . . . . .	399
6.3.3.1	Netzgeführter Stromrichter . . . . .	399
6.3.3.2	Zwischenkreisdrossel . . . . .	401
6.3.4	Auslegung der Asynchronmaschine . . . . .	408
6.3.4.1	Betrieb mit Normmotoren . . . . .	408
6.3.4.2	Stern- bzw. Dreieckschaltung der Maschine . . . . .	411
6.3.4.3	Kleiner Stromhub . . . . .	412
6.3.4.4	Beanspruchung der Motorisolation . . . . .	413
6.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	414
6.4	Steuer- und Regelverfahren . . . . .	417
6.5	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter . . . . .	419
6.5.1	I-Umrichter mit abschaltbaren Bauelementen . . . . .	419
6.5.2	Schaltzustände im I-Wechselrichter mit abschaltbaren Bauelementen . . . . .	425
6.5.3	Schaltentlastung für blockierfähige GTOs . . . . .	427
6.5.4	Kommutierungsvorgang . . . . .	428
6.6	Abschließende Bemerkungen . . . . .	432
<b>7</b>	<b>Gleichspannungswandler (Gleichstromsteller)</b>	<b>439</b>
7.1	Prinzip des Gleichspannungswandlers (Tiefsetzsteller) . . . . .	440
7.2	Gleichspannungswandler mit nicht abschaltbaren Bauelementen	442
7.2.1	Gleichspannungswandler-Grundschtaltung (Träger-Schtaltung) .	442
7.2.2	Sperrspannungsfreie Gleichspannungswandler-Schtaltung . . . . .	448
7.2.3	Weitere Schaltungs-Abwandlungen mit Löschkreis . . . . .	456
7.3	Gleichspannungswandler mit abschaltbaren Bauelementen . . . . .	460
7.3.1	Gleichspannungswandler-Grundschtaltung mit GCT/GTO . . . . .	460
7.3.2	Gleichspannungswandler mit GTO und RCD-Beschaltung . . . . .	463
7.3.3	Schtaltung mit zusätzlichem Spannungsbegrenzer . . . . .	468
7.3.4	Verlustfreie Entlastungsschtaltung nach Marquardt . . . . .	472
7.3.5	Zusammenfassung Entlastungsschtaltungen . . . . .	476
7.4	Grundlegende Steuerung und Regelung von Gleichspannungswandlern . . . . .	478
7.4.1	Pulsweitensteuerung . . . . .	478
7.4.2	Pulsfolgesteuerung . . . . .	480
7.4.3	Zweipunktregelung des Gleichspannungswandlers . . . . .	480
7.5	Gleichstromstellerschtaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb	483
7.5.1	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb . . . . .	483
7.5.2	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb . . . . .	485
7.5.3	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerstromumkehr . . . . .	487

7.5.4	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerspannungsumkehr . . . . .	488
7.5.5	Vier-Quadrant-Betrieb . . . . .	492
7.5.6	Interleaved-Wandler . . . . .	495
7.6	Leistungsfaktor-Korrektur . . . . .	496
7.7	Weitere Abwandlungen der Gleichstromsteller-Schaltungen . . . . . <i>Prof. Dr. M. Reddig, Augsburg</i>	508
7.8	Dreiphasige Pulsleichrichtersysteme . . . . . <i>Prof. Dr. J. W. Kolar und Thomas Friedli, ETH Zürich</i>	512
7.8.1	Einleitung . . . . .	513
7.8.2	Klassifizierung unidirektionaler dreiphasiger Gleichrichtersysteme	518
7.8.3	Phasenmodulare Gleichrichter . . . . .	522
7.8.3.1	Y-Rectifier . . . . .	524
7.8.3.2	$\Delta$ -Rectifier . . . . .	528
7.8.3.3	Diskussion . . . . .	531
7.8.4	Direkt dreiphasige Pulsleichrichtertopologien . . . . .	532
7.8.4.1	Systeme mit Hochsetzsteller-Charakteristik . . . . .	534
7.8.4.2	Systeme mit Tiefsetzsteller-Charakteristik . . . . .	552
7.8.4.3	Systeme mit Hoch- und Tiefsetzsteller-Charakteristik . . . . .	562
7.8.5	Dimensionierung der Leistungshalbleiter und EMV-Filterung . . . . .	563
7.8.5.1	Dimensionierung der Leistungshalbleiter . . . . .	566
7.8.5.2	Gegentakt- und Gleichtakt-EMV-Filter . . . . .	566
7.8.6	Vergleichende Gegenüberstellung . . . . .	571
7.8.6.1	Definition der Kennwerte . . . . .	573
7.8.6.2	Vergleich des Active Six-Switch Boost-Type PFC Rectifier, des $\Delta$ -Switch Rectifier und des VIENNA Rectifier . . . . .	576
7.8.6.3	Vergleich des Active Six-Switch Buck-Type PFC Rectifier und des SWISS Rectifier . . . . .	577
7.8.7	Schlussfolgerungen . . . . .	579
<b>8</b>	<b>Selbstgeführte Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (U-Wechselrichter)</b>	<b>583</b>
8.1	Einführung . . . . .	583
8.2	Zweipunkt-Wechselrichter . . . . .	584
8.2.1	Grundfrequenztaktung und Drehspannungssystem . . . . .	584
8.2.2	Spannungssteuerung . . . . .	589
8.2.3	Kommutierungsschaltungen . . . . .	591
8.3	U-Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung . . . . .	593
8.3.1	Zweipunkt-Wechselrichter mit Gleichstromsteller . . . . .	594
8.3.1.1	Ungesteuerte netzseitige Diodenbrücke . . . . .	594
8.3.1.2	Gleichstromsteller . . . . .	596
8.3.1.3	Zweipunkt-Wechselrichter — Funktionsweise . . . . .	596
8.3.2	Kommutierung des Wechselrichters mit Summenlöschung . . . . .	600
8.3.3	Netzgeführter Stromrichter als Einspeise-Stellglied . . . . .	603
8.3.4	VSC zu Back to Back Umrichter (BBC) . . . . .	605

8.3.4.1	Grundlagen . . . . .	605
8.3.4.2	Zwischenkreis-Auslegung . . . . .	611
8.3.4.3	Ansteuerungen . . . . .	612
8.3.4.4	Regelung . . . . .	613
8.3.4.5	Kosten-Nutzen-Analyse . . . . .	617
8.3.4.6	FACTS-Konfiguration . . . . .	620
8.3.4.7	Simulationsverfahren . . . . .	622
8.3.4.8	Regelung - Realisierung . . . . .	623
8.3.4.9	PFC-Gleichrichter . . . . .	629
8.3.4.10	Sondereffekte . . . . .	631
8.3.4.11	Praktische Hinweise . . . . .	636
8.4	Pulsverfahren, Pulsweitenmodulation . . . . .	640
8.4.1	Randbedingungen . . . . .	640
8.4.2	Zweipunktregelung . . . . .	640
8.4.3	Pulsweitenmodulation . . . . .	642
8.4.4	Unterschwingungsverfahren . . . . .	646
8.4.5	Sinus-Dreieck-Modulation allgemein . . . . .	651
8.4.5.1	Sinus-Dreieck PWM mit Zwischenpulsverschiebung . . . . .	658
8.4.6	Injektion von Harmonischen in das Grundschnwingungssignal . . . . .	659
8.4.7	Rechteck-Dreieck-Modulation . . . . .	663
8.4.8	Rechteck-Dreieck-PWM; Oberschwingungen . . . . .	664
8.4.9	Übermodulation – Übersteuerung . . . . .	673
8.4.10	Raumzeigermodulation . . . . .	677
8.4.11	Übermodulation – Raumzeigermodulation . . . . .	682
	<i>Prof. Dr. A. M. Khambadkone, The National University of Singapore</i>	
8.4.12	PWM mit abgetastetem Sollwertsignal . . . . .	686
8.4.13	Direkte PWM . . . . .	688
8.4.14	Optimierte Pulsmustererzeugung . . . . .	689
8.4.15	Wechselrichter-Spannungsfehler . . . . .	699
8.5	Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	702
8.5.1	Dreipunkt-Wechselrichter, prinzipielle Funktion . . . . .	702
8.5.2	Nullpunkt-Stabilisierung . . . . .	711
8.5.3	Spannungsbeanspruchung und Leistung . . . . .	712
8.5.4	Diode-Clamped-Wechselrichter, Realisierung . . . . .	713
8.5.5	Aktiver NP-Wechselrichter . . . . .	714
8.5.6	Imbricated-Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	715
8.5.6.1	5L-FC-CI-Wechselrichter . . . . .	717
8.5.7	Kaskadierte Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	724
8.5.8	Hybride-Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	726
8.5.9	Modulare Mehrpunkt-Umrichter (MMC, M2C) . . . . .	729
	<i>Prof. Dr. R. Marquardt, Dipl.-Ing. Yeqi Wang, München</i>	
8.5.9.1	Einleitung . . . . .	729
8.5.9.2	Grundlagen Modularer Mehrpunkt-Umrichter . . . . .	730
8.5.9.3	Betrieb mit niedrigen Ausgangsfrequenzen bis $\omega_1=0$ . . . . .	743



8.5.9.4	Symmetrierung der internen Energieverteilung . . . . .	746
8.5.9.5	Symmetrierung der internen Energiespeicher (AC-Betrieb) . . .	748
8.5.9.6	Steuerung der DC-Seite . . . . .	753
8.5.9.7	Kurzschluss der DC-Seite . . . . .	754
8.5.9.8	Fehlertoleranz und Redundanz . . . . .	756
8.5.9.9	Dimensionierung und Submodul-Topologie . . . . .	758
8.5.10	Modulationsverfahren für Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	768
8.5.11	Blockbetrieb Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	768
8.5.12	Pulsweitenmodulation Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	770
8.5.13	Raumzeigermodulation, Mehrpunkt-Wechselrichter . . . . .	774
8.6	Modulationsverfahren für den M2C . . . . .	777
8.7	Anwendungen – Aspekte . . . . .	779
8.7.1	Multi-Level Topologien in der Hochleistungselektronik . . . . .	780
	<i>Dr. P. K. Steimer, ABB, Schweiz</i>	
8.7.1.1	Halbleitertechnologie - Hochleistungselektronik . . . . .	780
8.7.1.2	Topologien für die Hochleistungselektronik . . . . .	785
8.7.1.3	Neutral-Point Clamped Topologien . . . . .	785
8.7.1.4	Flying Capacitor Topologien . . . . .	786
8.7.1.5	Aktive Neutral Point Multi-level Topologie . . . . .	787
8.7.1.6	Multi-level Umrichter, Zellen-Aufbau und Einspeisung . . . . .	787
8.7.1.7	Multi-level Umrichter, Zellen Aufbau . . . . .	791
8.7.1.8	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	793
8.7.2	Beschaltungs-Minimierung . . . . .	795
8.7.2.1	Beschaltung – Ausgangssituation . . . . .	795
8.7.2.2	Varianten mit IGCT und <i>Si</i> -Dioden . . . . .	798
8.7.2.3	IGBT-Diode (MOSFET-Diode) . . . . .	803
8.7.2.4	Messergebnisse eines IGBT . . . . .	812
8.7.3	MOSFET- und IGBT-Gatetreiber . . . . .	826
	<i>Dr. habil. R. Herzer, Semikron, Nürnberg</i>	
8.7.3.1	Komponenten und Grundprinzipien eines leistungselektronischen Systems . . . . .	826
8.7.3.2	Grundlagen von Gatetreibern . . . . .	828
8.7.3.3	Ansteuerung und Schaltverhalten . . . . .	831
8.7.3.4	Integrierte Potentialtrennung und sekundärseitige Versorgung . . . . .	840
8.7.3.5	Gatetreiber mit galvanischer Isolation für mittlere und hohe Leistungen . . . . .	842
8.7.3.6	Gatetreiber mit erweiterter digitaler Signalverarbeitung für hohe Leistungen . . . . .	848
8.7.3.7	Gatetreiber für niedrige Leistungen ohne galvanische Isolation . . . . .	851
8.7.3.8	Grundlegende Konzepte und Funktionen hochspannungsfester Treiber-ICs (bis 1200V) . . . . .	852
8.7.3.9	Gatetreiber in PN-Isolation . . . . .	854
8.7.3.10	Gatetreiber in SOI-Technologie . . . . .	856
8.7.3.11	Gatetreiber mit Multi-Chip-Integration für 1200V . . . . .	859

8.7.3.12	Treiber- und IGBT/FWD-Inverter-Integration auf einem Chip ( <i>single chip inverter</i> ) . . . . .	862
8.7.4	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter beim Schalten . . . <i>Prof. Dr. H. G. Eckel, Dipl.-Ing. J. Böhmer, Rostock</i>	863
8.7.4.1	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter beim Schalten im normalen Betrieb . . . . .	863
8.7.4.2	Schaltbelastungen beim Abschalten von IGBT . . . . .	864
8.7.4.3	Schaltbelastungen beim Reverse-Recovery von Dioden . . . . .	880
8.7.4.4	Besondere Schaltbedingungen . . . . .	883
8.7.4.5	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter in Fehlerfällen . . .	886
8.7.4.6	Ausgangsseitige Kurzschlüsse auf der Gleichspannungsseite . . .	887
8.7.4.7	Ausgangsseitige Kurzschlüsse auf der Wechspannungsseite . . .	889
8.7.4.8	Kurzschlussverhalten des IGBTs . . . . .	890
8.7.4.9	Kurzschlussverhalten von Dioden . . . . .	896
8.7.4.10	Kurzschlüsse im Umrichter . . . . .	897
8.7.4.11	Komponenten der Ansteuerschaltung zur Beherrschung der Kurz- schlussfälle . . . . .	900
8.8	Auslegung eines Drehstromantriebs mit Pulswechselrichter . . . . .	903
8.8.1	Bemessung der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine . . . . .	903
8.8.2	Dimensionierung des Pulswechselrichters . . . . .	905
8.8.3	Pulsationsmomente . . . . .	907
8.8.4	Gleichspannungs-Zwischenkreis . . . . .	909
8.8.5	Eingangsschaltungen und Bremsbetrieb . . . . .	909
8.8.6	Anwendungsbereiche der Pulswechselrichter . . . . .	912
8.9	Selbstgeführte Thyristor-Wechselrichter mit Phasenlöschung . . .	912
8.9.1	Schaltung und Arbeitsweise . . . . .	913
8.9.2	Dimensionierung der Schaltung (Übersicht) . . . . .	919
8.9.3	Grundgleichungen der Kommutierung . . . . .	921
8.9.4	Kommutierungsbedingung . . . . .	923
8.9.5	Thermische Belastung der Lastthyristoren . . . . .	925
8.9.5.1	Schalt- und Kommutierungsstromverluste . . . . .	925
8.9.5.2	Laststromverluste (Durchlaßverluste) . . . . .	926
8.9.5.3	Gesamte Verlustleistung in den Lastthyristoren . . . . .	930
8.9.6	Bestimmung der Kommutierungselemente . . . . .	931
8.9.7	Kriterien zur Auswahl der Kommutierungselemente . . . . .	931
8.10	Beschaltung von Leistungshalbleitern . . . . .	936
8.10.1	RCD-Schutzbeschaltung mit Überlaufkondensator . . . . .	937
8.10.1.1	Einschaltvorgang . . . . .	939
8.10.1.2	Ausschalten großer Lastströme . . . . .	940
8.10.1.3	Ausschalten kleiner Lastströme . . . . .	942
8.10.2	Unsymmetrische Beschaltung . . . . .	944
8.10.2.1	Einschaltvorgänge . . . . .	945
8.10.2.2	Ausschalten großer positiver Lastströme . . . . .	947
8.10.2.3	Ausschalten großer negativer Lastströme . . . . .	949

8.10.2.4	Ausschalten kleiner Lastströme . . . . .	950
8.10.3	Symmetrische Schutzbeschaltung . . . . .	952
8.10.3.1	Einschaltvorgang . . . . .	952
8.10.3.2	Ausschalten großer Lastströme . . . . .	954
8.10.3.3	Ausschalten kleiner Lastströme . . . . .	955
8.10.4	Vergleich der Schutzbeschaltungen . . . . .	957
8.10.5	Abschließende Hinweise . . . . .	958
8.11	Auslegungsbeispiel für einen U-Wechselrichter . . . . .	961
8.11.1	Einführung . . . . .	961
8.11.2	Orientierende Festlegung der Zwischenkreisspannung . . . . .	962
8.11.3	Weiterführende Überlegungen zur Bestimmung der Sperrspannung der Halbleiter . . . . .	966
8.11.4	Schutzkonzept eines U-Umrichters . . . . .	967
8.11.5	Orientierende Festlegung des abzuschaltenden Stroms . . . . .	968
8.11.6	Weiterführende Überlegungen zum abschaltbaren Strom und zur Beschaltung . . . . .	969
8.11.7	Quervergleich der bisherigen Ergebnisse . . . . .	973
8.11.8	Auslegung des Zwischenkreiskondensators . . . . .	974
8.11.9	Sicherheitsfaktoren . . . . .	975
8.11.10	Verluste, Schaltfrequenzen, Kühlung . . . . .	976
8.11.11	Zusammenfassung . . . . .	988
8.12	Zusatzbeanspruchungen der Drehfeldmaschine . . . . .	989
	<i>Prof. Dr. A. Binder, Darmstadt</i>	
8.12.1	Einleitung . . . . .	989
8.12.2	Spannungsreflexionen an den Maschinenklemmen . . . . .	990
8.12.2.1	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf verlustfreien Maschinezuleitungen bei Reflexionskoeffizienten $r = \pm 1$ . . . . .	990
8.12.2.2	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf verlustfreien Maschinezuleitungen bei Reflexionskoeffizienten $ r  < 1$ . . . . .	998
8.12.2.3	Kritische Länge der Maschinezuleitung . . . . .	1000
8.12.3	Transiente Spannungsverteilung in der Maschinenwicklung . . . . .	1004
8.12.4	Beanspruchung der Wicklungsisolierung bei Umrichterspeisung . . . . .	1008
8.12.5	Umrichterbedingte Lagerströme in elektrischen Maschinen . . . . .	1014
8.12.5.1	Gleichtaktspannung der Statorwicklung gegen Erde . . . . .	1014
8.12.5.2	Entladeströme in den Lagern . . . . .	1019
8.12.5.3	Kapazitive Umladeströme . . . . .	1019
8.12.5.4	Hochfrequenter über die Lager fließender Kreisstrom . . . . .	1020
8.12.5.5	Hochfrequenter Rotor-Erdstrom . . . . .	1022
8.12.6	Systemauslegung von umrichtergespeisten Drehstromantrieben bei großem $du/dt$ . . . . .	1023
8.12.6.1	Kapazitive Ladeströme der Maschinezuleitungen . . . . .	1023
8.12.6.2	Umrichterausgangs-Filter . . . . .	1025
8.12.6.3	Motoreingangsimpedanzen zur Reflexionsvermeidung . . . . .	1033

8.12.6.4	Maßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung von umrichterbedingten Lagerströmen . . . . .	1035
8.12.6.5	Fehlerstromschutzschalter bei umrichtergespeisten Antrieben . .	1039