

---

# Springer-Lehrbuch

Weitere Bände in dieser Reihe  
<http://www.springer.com/series/1183>

---

Dierk Schröder

# Leistungselektronische Schaltungen

Funktion, Auslegung und Anwendung

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.h.c. Dierk Schröder  
Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme  
Technische Universität München  
München, Deutschland

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-30103-2

ISBN 978-3-642-30104-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-30104-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997, 2008, 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

## Vorwort 3. Auflage

Die Leistungselektronik hatte in der Vergangenheit zwei wesentliche Anwendungsgebiete, die elektrische Antriebstechnik für die zahlreichen drehzahlvariablen Antriebe sowie die Stromversorgung von Geräten der Kommunikation. Die Anforderungen aus den beiden Gebieten beeinflussten die Forschung und Entwicklung sowohl auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter als auch in der Schaltungstechnik der Stellglieder. Ein typisches Beispiel sind die Mehrpunkt-Topologien in der Antriebstechnik, die unter anderem zur Realisierung von drehzahlvariablen Mittelspannungsantrieben führte. Beide Gebiete waren aber nur sehr begrenzt bekannt. Inzwischen ist aber auch der Allgemeinheit die Bedeutung der Leistungselektronik bewusst.

Dies ist beispielhaft auf die öffentliche Diskussion der zukünftigen Energieversorgung und der Mobilität mittels Elektro-PKW oder Hybrid-Fahrzeugen zurückzuführen. Die zukünftige Energieversorgung wird sowohl verstärkt die Windenergie u.a. durch Windparks auf der See als auch die Photovoltaik beispielsweise das Desertec-Projekt nutzen. In beiden Fällen muss die Energie über weite Strecken zum Verbraucher, bzw. bis zum nächsten verfügbaren Einspeisepunkt geführt werden. Eine vorteilhafte Lösung hinsichtlich der Verluste und der Akzeptanz ist die HGÜ mit Mehrpunkt-Stellgliedern und dem Energietransport mittels Kabel. Zusätzlich kann die Blindleistungsbilanz im Drehstromnetz beeinflusst werden. Weitere Optionen sind Funktionen, wie beispielsweise die Filterung von Oberschwingungen, Symmetrierung unsymmetrischer Belastungen und Überbrückung kurzzeitiger Spannungsverzerrungen. Derartige Forderungen werden inzwischen bereits bei dezentralen Photovoltaik-Anlagen realisiert.

Ganz andere Anforderungen bestehen hinsichtlich der Leistungselektronik bei Hybrid- oder rein elektrischen Fahrzeugen: Massenprodukt, geringe Ausfallwahrscheinlichkeit und hohe Lebensdauer, geringes Gewicht und Volumen, ungünstige Umweltbedingungen, wie Temperatur, Feuchtigkeit, Öl und Staub. Außerdem wird diskutiert, die Batterien dieser Fahrzeuge als dezentrale Energiespeicher in smart-grids zu nutzen. Diese Option kann genutzt werden, wenn die Lebensdauer der Batterien dies zulässt. Die Leistungselektronik wird somit zunehmend eine wichtige Komponente in komplexen Systemen, die eine interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordern. Damit besteht die Notwendigkeit viele Anwendungsaspekte gebührend zu berücksichtigen.

In der vorliegenden dritten Auflage wurden deshalb die bereits bestehenden Kapitel wie folgt bearbeitet, erweitert bzw. neu erstellt: Da die U-Wechselrichter ( VSC und Mehrpunkt-Wechselrichter ) die am häufigsten verwendeten selbstgeführten Wechselrichter sind, wurde ein Orientierungs-Kapitel „VSC zu BBC“ neu in Kapitel 8 eingeführt. Dieses Kapitel verbindet die wichtigsten Grundla-

gen in den Büchern „Leistungselektronische Bauelemente“ , „Leistungselektronische Schaltungen“ und „Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen“ mittels Querverweisen. Somit werden dem Leser Hinweise gegeben, welche Informationen er schnell und ausführlich finden kann. Es werden die wesentlichen Schaltungen der U-Wechselrichter angesprochen, es erfolgen Auslegungshinweise, eine Kosten-Nutzen Analyse, die Vorstellung verschiedener Verfahren der PWM sowie der Regelung – mit Hinweisen zur Realisierung der Regelung mittels FPGAs, der hard- und software Aufteilung, kritischer Realisierungsansätze und deren Vermeidung – von Resonanz-Effekten, Erdströmen und Lagerschäden, von Analyse-Verfahren durch Simulation, und es werden praktische Hinweise gegeben, um Fehlerfälle und Ausfälle zu vermeiden. Ein weiteres neues und sehr umfangreiches Kapitel ist das Kapitel 8.6 „Anwendungs-Aspekte“. Herr Dr. Steimer - ABB/CH - bewertet kritisch die Mehrpunkt-Umrichter. Es folgt ein Kapitel, in dem die Beschaltungen und deren Minimierungen für IGCTs und IGBTs abgehandelt werden. Herr Dr. Herzer – Semikron – bringt eine Darstellung von Varianten der Ansteuerungen für IGBTs und MOSFETs in den verschiedenen Spannungsklassen. Die Ansteuerung von IGCTs wurde bereits im Bauelemente-Buch vorgestellt, wird vom Bauelement-Hersteller ausgeführt und muß deshalb hier nicht mehr besprochen werden. Herr Professor Eckel – Rostock – behandelt sehr anschaulich – unter der Nutzung der Halbleiter-Physik – die dynamischen Spannungs-, Strom- und Feldstärke-Belastungen der Halbleiter-Bauelemente, beginnend beim VSC bis zum BBC – wobei auch auf die Verkopplungen über den DC-Zwischenkreis hingewiesen wird. Herr Professor Lindemann – Magdeburg – stellt die thermischen Belastungen, die Kühlung sowie die Alterung und die Berechnung des Ausfalls vor. Diese Berechnungen sind nur verlässlich möglich, wenn das vollständige System beginnend beim Betriebszyklus, über die Regelungs- und Antriebskonfiguration bis hin zur Kühlungs-Ausführung berücksichtigt wird. Im abschließende Abschnitt werden kritische Fehler bei der Realisierung von Antriebs-Systemen aus der Sicht der Betriebs-Sicherheit aufgezeigt. Das neue Kapitel „M2C-Wechselrichter“ von Herrn Professor Marquardt – München – stellt eine neue Topologie für Hochleistungs-Anwendungen mit sehr interessanten Eigenschaften vor. Eine Einfügung behandelt den 5L-FC-CI-Wechselrichter. Die bestehenden Kapitel „Elektrische Energiewandler für photovoltaische Solarenergieanlagen“ – Herr Professor Zacharias – Kassel – und “Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen“ – Herr Dr. Franck, Osram – wurden an den neusten Stand der Technik angepasst. Neu ist die detaillierte sowie kritische Diskussion der AC-DC-PFC-Wandler von Herrn Professor Kolar – ETHZ/CH. Weiterhin werden zusätzlich die resonanten LCC- sowie LLC-Schaltungen für verschiedene Anwendungen von Herrn Dr. Fröhleke – Paderborn – vorgestellt. Ein weiterer Aspekt sind die smart grids, ein umfangreiches Kapitel über die neueste schaltungstechnische Lösung, der Auslegung sowie der Regelung auf dem Gebiet Stat-Com wurde von Herrn Professor Nee – KTH, Stockholm – beigesteuert. Damit ist das Gebiet der U-Wechselrichter bzw. der U-Umrichter um wichtige Aspekte erweitert worden, und es wurde Benutzer-freundlich gestaltet.

Eine weitere Fragestellung bei dieser Neuauflage war, ob Darstellungen wie die Schaltungstechniken zur Löschung von Frequenz-Thyristoren, die in der Anfangszeit der selbstgeführten Umrichter wesentlich waren, entfallen, oder ob nicht mehr so bedeutungsvoll erscheinende Schaltungen wie die fremdgeführten Thyristor-Schaltungen noch erwähnt werden sollten. Auf Anfrage bei Kollegen ergab sich die eindeutige Meinung, dass alle vorhandenen Darstellungen weiterhin bestehen bleiben sollen. Die Gründe waren, dass beispielsweise die Thyristor-Schaltungen – u.a. bei STATCOM oder die untersynchronen Kaskaden bei den Windenergie-Anlagen vorteilhaft eingesetzt werden – nun wieder von Bedeutung sind. Ähnliche Aussagen gelten für andere Schaltungen.

Ein weiterer Aspekt war, dass die Verfügbarkeit von Veröffentlichungen erst seit 1988 sicher gegeben ist; Ältere Veröffentlichungen sind damit nur erschwert verfügbar.

Mit diesen Überarbeitungen und Ergänzungen sind wichtige Aspekte für die interdisziplinäre Zusammenarbeit verfügbar.

Dieses bewährte Standardwerk liefert somit den Ingenieuren in der Praxis ein wertvolles Nachschlagewerk und den Studierenden ein umfassendes Lehrbuch.

Ich danke allen Autoren sehr für Ihre Bereitschaft, wichtige neue Erkenntnisse in diesem Buch einzubringen. Herrn Professor Silber, Bremen und Herrn Professor Steimel, Bochum sowie vielen in diesen Fachgebieten Tätigen danke ich für die konstruktiven Gespräche und wertvollen Hinweise.

Ich bedanke mich auch bei den Herren Mahdi und Kombas für ihre Hilfe bei der Erstellung dieser Neuauflage.

Ich danke, daß mir die Kraft und die Ausdauer gegeben wurde, diese Neuauflage zu realisieren – trotz meiner Behinderungen. Ich danke aber vor allen meiner Frau für ihr Verständnis und ihre Akzeptanz, mir den Freiraum zu geben, um alle die Ideen in der Neuauflage zu vollenden.

## Vorwort 2. Auflage

Die Leistungselektronik hat ihre Bedeutung in den vergangenen Jahren kontinuierlich auf der ganzen Breite erweitert.

Dies gilt für bereits grundsätzlich bekannte Schaltungsvarianten wie dem Direktrichter, dem Stromrichtermotor oder Drehstromantriebe mit Klemmenspannungen über 1 kV. Beispielsweise wurden Direktumrichter mit einer Leistung von je 100 MW bei doppeltgespeisten Asynchronmotor-Antrieben mit 331 MVA für Pumpenspeicherantriebe realisiert. Ein anderes Beispiel sind Kompressorantriebe für Gasverflüssigung mit bis zu 65 MW Leistung, die die bisher verwendeten Gasturbinenantriebe ersetzen. Weiterhin werden inzwischen in großem Umfang drehzahlvariable Antriebe mit selbstgeführten Wechselrichtern für Klemmenspannungen größer 1 kV realisiert.

Die Erweiterung der Anwendungsfelder erfolgte bereits beispielsweise sowohl bei den Windkraftwerken als auch bei der Photovoltaik und könnte in naher Zukunft auch den Bereich der Hybrid-Fahrzeuge umfassen.

Eine weitere positive Änderung der Situation ist, daß inzwischen auch rückwärtssperrende Bauelemente wie der RGCT zur Verfügung stehen und damit der I-Wechselrichter wesentlich einfacher zu realisieren ist. Zusätzlich sind SiC-Bauelemente verfügbar, so daß der reverse-recovery-Effekt nicht mehr relevant ist und sich somit Verbesserungen beispielsweise im Wirkungsgrad ergeben.

Die Leistungselektronik hat sich somit sowohl vom Leistungsbereich als auch von der Schaltungstechnik erweitert.

Es ist damit sinnvoll, auch „alte“ Schaltungsvarianten, wie die doppeltgespeiste ASM, sowohl von der Funktion als auch von der Bemessung der Bauelemente in der leistungselektronischen Schaltung her, im Text dieses Buches beizubehalten.

Selbstverständlich werden auch neuere Entwicklungen wie die brückenlose PFC-Schaltung, die Mehrpunkt-Wechselrichter in den neuesten Schaltungsvarianten, aktive Filter oder die Zusatzbeanspruchungen der Drehfeld-Maschinen aufgrund steiler Schaltflanken aufgenommen.

Ich wünsche, daß alle Leser dieses Buches viele Anregungen für die tägliche Arbeit erhalten.

# Vorwort 1. Auflage

Mit dem Lehrbuch „Elektrische Antriebe 4, Leistungselektronische Schaltungen“ liegt das vierte Buch der Reihe „Elektrische Antriebe“ vor.

Dieser Band baut auf dem Buch „Elektrische Antriebe 1, Grundlagen“ auf. In Band 1 wurden unter anderem phänomenologische Vorstellungen der verschiedenen Stromrichter-Stellglieder und damit ihrer grundsätzlichen Funktion gegeben. Außerdem wurden auch die Abwandlungen der Stromrichterschaltungen aufgrund der historisch bedingten Verfügbarkeit der Leistungshalbleiter dargestellt.

Um in dem vorliegenden Band eine geschlossene Vorstellung des Gebiets der Stromrichterschaltungen zu erhalten, wird jeweils zu Beginn für jede Schaltungsart die phänomenologische Vorstellung des ersten Buchs mit aufgenommen und um die mathematischen Zusammenhänge erweitert. Damit ist eine solide Basis gegeben, um die in den Lehrbüchern und in der Literatur im allgemeinen nur angedeutete Auslegung von Stromrichterschaltungen ausführlich zu erläutern; dies ist der erste Schwerpunkt dieses Bandes.

Bei der Auslegung von Stromrichter-Stellgliedern wird ein zutiefst ingenieurtypisches Vorgehen verlangt, das hohe Anforderungen an den verantwortlichen Ingenieur stellt. Die hohen Anforderungen sind bedingt durch die Forderungen, erstens eine jahrelange einwandfreie Funktion sicherzustellen, zweitens eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Lösung zu finden und drittens zu beachten, daß nicht alle Anforderungen und Randbedingungen sowie die kombinatorischen Streuungen genau bekannt sind. Ich bin deshalb überzeugt, daß eine Einführung in die Auslegung von Stromrichterschaltungen in einem Lehrbuch und Nachschlage-Handbuch zwingend notwendig ist. In diesem Zusammenhang möchte ich mich bei ehemaligen Mitarbeitern in der Industrie bedanken, die mir sehr bei der Realisierung dieses angestrebten Zieles geholfen haben.

Der zweite Schwerpunkt dieses Buches sind Schaltungsvarianten wie die resonanten Schaltungstopologien, die insbesondere bei speziellen Anforderungen — wie sie beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt bestehen — ihre Bedeutung haben.

Eine weitere Aufgabe ist die Darstellung von Stromrichterschaltungen sowie deren Steuerung und Regelung für die Kompensation von Netzurückwirkungen oder die Verbesserung der Energieübertragung mittels FACTS.



Das Gelingen eines Buches mit der gewünschten Zielsetzung ist ein sehr komplexes Vorhaben, und ich möchte mich bei meinen wissenschaftlichen Mitarbeitern — hier insbesondere Herrn Akad. Direktor Dipl.-Ing. G. Hoffstätter — für ihre Unterstützung bei der Erstellung des Bandes bedanken.

Meiner Familie danke ich sehr für ihr Verständnis und ihre Unterstützung bei diesem Vorhaben.

Dem Leser wünsche ich viel Freude beim Studium dieses Buches und bitte, Tippfehler anzumerken und mir Hinweise für Verbesserungen des komplexen Themas zu geben, vielen Dank.

München, im Herbst 1997

Dierk Schröder

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Stromrichterschaltungen (Übersicht)</b>	<b>1</b>
1.1	Grundfunktionen von Stromrichtern . . . . .	1
1.2	Einteilung der Stromrichter nach der Art der Kommutierung . .	2
<b>2</b>	<b>Netzgeführte Stromrichter</b>	<b>9</b>
2.1	Zweipuls–Mittelpunktschaltung (M2–Schaltung) . . . . .	9
2.1.1	Ohmsche Last . . . . .	10
2.1.2	Ideale Glättung . . . . .	13
2.1.3	Allgemeine ohmsch–induktive Last . . . . .	16
2.1.4	Gegenspannung im Lastkreis . . . . .	23
2.1.5	Netzgeführte Kommutierung . . . . .	28
2.1.6	Wechselrichterbetrieb . . . . .	34
2.1.7	Wechselrichterkippen . . . . .	37
2.2	Oberschwingungen und Netzzrückwirkungen . . . . .	40
2.2.1	Oberschwingungen auf der Lastseite . . . . .	41
2.2.1.1	Ohmsche Last . . . . .	41
2.2.1.2	Ideale Glättung . . . . .	42
2.2.2	Oberschwingungen auf der Netzseite . . . . .	46
2.2.2.1	Ohmsche Last . . . . .	46
2.2.2.2	Ideale Glättung . . . . .	48
2.2.3	Netzzrückwirkungen . . . . .	51
2.3	Blindleistung und Leistungsfaktor . . . . .	54
2.3.1	Ohmsche Last . . . . .	54
2.3.2	Ohmsch–induktive Last . . . . .	56
2.4	Transformator–Auslegung . . . . .	60
2.4.1	Gleichstrom–Vormagnetisierung . . . . .	60
2.4.1.1	M2–Schaltung . . . . .	61
2.4.1.2	M3–Schaltung . . . . .	62
2.4.2	Transformator–Bauleistung . . . . .	67
2.5	Dreipuls–Mittelpunktschaltung (M3) . . . . .	72
2.5.1	M3–Schaltung mit Netztrafo in Dy–Schaltung . . . . .	72
2.5.2	M3–Schaltung mit Netztrafo in Yz–Schaltung . . . . .	79

2.6	Brückenschaltungen . . . . .	81
2.6.1	Zweipuls-Brückenschaltung (B2-Schaltung) . . . . .	82
2.6.2	Sechspuls-Brückenschaltung (B6-Schaltung) . . . . .	85
2.6.3	Gegenüberstellung von Mittelpunkt- und Brückenschaltungen . . . . .	90
2.7	Höherpulsige Schaltungen . . . . .	91
2.7.1	Sechspuls-Mittelpunktschaltung (M6-Schaltung) . . . . .	91
2.7.2	Zwölfpuls-Brückenschaltung . . . . .	92
2.7.3	Zwölfpuls-Saugdrosselschaltung . . . . .	94
2.7.4	Höchstleistungs-Stellglieder, Beurteilungs-Kriterien . . . . .	97
2.8	Umkehrstromrichter . . . . .	101
2.8.1	Kreisstromfreie Gegenparallelschaltung . . . . .	104
2.8.2	Kreisstrombehaftete Kreuzschaltung . . . . .	107
2.8.3	H-Schaltung . . . . .	110
2.9	Blindleistungssparende Schaltungen . . . . .	116
2.9.1	Schaltungen mit Freilaufdiode . . . . .	118
2.9.2	Halbgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6H-Schaltung) . . . . .	123
2.9.3	Zu- und Gegenschaltung von Teilstromrichtern . . . . .	129
2.9.4	B6-Schaltung mit Hilfsthystoren . . . . .	134
2.9.5	Halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltungen (B2H-Schaltung) . . . . .	138
2.9.6	Folgesteuerung von Teilstromrichtern . . . . .	141
2.9.7	Löschbare unsymmetrische Brückenschaltungen . . . . .	147
2.9.7.1	Sektorsteuerung . . . . .	147
2.9.7.2	Löschbare unsymmetrische Brückenschaltung (LUB) . . . . .	149
<b>3</b>	<b>Direktumrichter</b> . . . . .	<b>152</b>
3.1	Trapezumrichter . . . . .	153
3.1.1	Einphasiger Trapezumrichter . . . . .	153
3.1.2	Mehrphasiger Trapezumrichter . . . . .	154
3.1.3	Frequenzelastischer Trapezumrichter . . . . .	156
3.2	Steuerumrichter . . . . .	157
3.3	Schaltungsvarianten des Direktumrichters . . . . .	160
3.3.1	Wahl der Umkehrstromrichter . . . . .	160
3.3.2	Schaltung der Last . . . . .	160
3.3.3	Schaltungsvarianten des Umrichters . . . . .	163
3.4	Frequenzbeschränkung beim Direktumrichter . . . . .	169
3.5	Auslegungskriterien . . . . .	182
3.6	Regelung der direktumrichter-gepeisten Synchronmaschine . . . . .	183
3.6.1	Stationäres Flußmodell . . . . .	186
3.6.2	Dynamisches Flußmodell . . . . .	189
3.6.3	Stromregelkreise . . . . .	192
3.6.4	Trapezbetrieb . . . . .	192
3.6.5	Synchronmaschine . . . . .	193
3.7	Ausführungsbeispiele . . . . .	193
3.8	Matrixkonverter . . . . .	195

*Prof. Dr. J. W. Kolar, Dr. F. Schafmeister, ETH Zürich*

3.8.1	Einleitung . . . . .	195
3.8.2	Konzepte dreiphasiger AC/AC-Konverterschaltungen . . . . .	196
3.8.2.1	AC/AC-Konverter mit Zwischenspeicher . . . . .	196
3.8.2.2	AC/AC-Matrixkonverter . . . . .	201
3.8.2.3	Klassifizierung . . . . .	203
3.8.3	AC/AC-Konverter mit Spannungszwischenkreis . . . . .	206
3.8.3.1	Grundfunktion . . . . .	206
3.8.3.2	Spannungskonversion und Raumzeigermodulation . . . . .	208
3.8.3.3	Stromkonversion . . . . .	212
3.8.3.4	Funktions-Ersatzschaltbild . . . . .	215
3.8.4	AC/AC-Konverter mit Stromzwischenkreis . . . . .	216
3.8.4.1	Grundfunktion . . . . .	217
3.8.4.2	Stromkonversion und Raumzeigermodulation . . . . .	219
3.8.4.3	Spannungskonversion . . . . .	221
3.8.4.4	Funktions-Ersatzschaltbild . . . . .	226
3.8.5	AC/AC-Umrichter mit Spannungszwischenkreis ohne Energie- speicher . . . . .	226
3.8.5.1	Grundfunktion . . . . .	226
3.8.5.2	Spannungsübersetzungsverhältnis . . . . .	228
3.8.6	Indirekter Matrixkonverter . . . . .	231
3.8.6.1	Ableitung der Schaltungsstruktur . . . . .	231
3.8.6.2	Spannungs- und Stromkonversion . . . . .	234
3.8.6.3	Raumzeigermodulation . . . . .	238
3.8.6.4	Funktions-Ersatzschaltbild . . . . .	251
3.8.7	Vereinfachte Schaltungstopologien indirekter Matrixkonverter . . . . .	256
3.8.7.1	Sparse Matrix Converter . . . . .	256
3.8.7.2	Ultra-Sparse Matrix Converter . . . . .	257
3.8.7.3	Very-Sparse Matrix Converter . . . . .	259
3.8.8	Direkter Matrixkonverter . . . . .	260
3.8.8.1	Grundfunktion . . . . .	261
3.8.8.2	Schaltzustände . . . . .	262
3.8.8.3	Rotierende Strom- und Spannungsraumzeiger . . . . .	264
3.8.8.4	Feststehende Strom- und Spannungsraumzeiger . . . . .	266
3.8.8.5	Relation der Schaltzustände von CMC und IMC . . . . .	270
3.8.8.6	Raumzeigermodulation des CMC . . . . .	272
3.8.8.7	Mehrschrittkommutierung des CMC . . . . .	275
3.8.9	Erweiterungen der Matrixkonverter-Grundstrukturen . . . . .	279
3.8.9.1	Indirekte Dreipunkt-Matrixkonverter . . . . .	279
3.8.9.2	IMC mit nach Eingangsphasen getrennten Zwischenkreisen . . . . .	282
3.8.9.3	Matrixkonverter in Vollbrückenschaltung . . . . .	283
3.8.9.4	Hybride Matrixkonverter . . . . .	286
3.8.10	Diskussion . . . . .	289
3.8.10.1	Ausgangsspannungsbereich und Betriebseigenschaften . . . . .	290

3.8.10.2	Modulation . . . . .	290
3.8.10.3	Kommutierung . . . . .	291
3.8.10.4	Zwischenkreiskondensator und Ride-through . . . . .	291
3.8.10.5	EMV-Filter . . . . .	292
3.8.10.6	Verluste und Effizienz . . . . .	292
3.8.10.7	Komplexität der Schaltung und Realisierungsaufwand . . . . .	293
3.8.10.8	Kühlung und Baugröße . . . . .	294
3.8.10.9	Regelung . . . . .	294
3.8.10.10	Stillstand und Gleichheit von Ein- und Ausgangsfrequenz . . . . .	295
3.8.11	Ausblick . . . . .	295
<b>4</b>	<b>Untersynchrone Stromrichter-kaskade (USK)</b>	<b>297</b>
4.1	Aufbau und Funktion . . . . .	297
4.2	Quasistationäre Regelung der untersynchronen Kaskade . . . . .	312
4.3	Die USK und Netzurückwirkungen . . . . .	317
4.4	Auslegung der untersynchronen Kaskade . . . . .	321
4.4.1	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer . . . . .	321
4.4.2	Anlaßwiderstand . . . . .	325
4.4.3	Gleichrichterbrücke . . . . .	330
4.4.4	Wechselrichterbrücke . . . . .	332
4.4.5	Zwischenkreisdrossel . . . . .	337
4.4.6	Blindleistungskompensation . . . . .	339
4.4.7	Schaltspannungsschutz . . . . .	340
4.4.8	Vorfluten der Dioden . . . . .	341
4.5	Sonderausführungen . . . . .	343
4.5.1	Umschaltbare Kaskade . . . . .	343
4.5.2	Zwölfpulsige Ausführung . . . . .	345
4.5.3	Schaltungen bei Netzunterbrechungen und Netzscheidungen . . . . .	347
4.6	Zusammenfassung . . . . .	347
<b>5</b>	<b>Stromrichtermotor</b>	<b>349</b>
5.1	Prinzipielle Funktion . . . . .	349
5.1.1	Drehmomentverlauf . . . . .	355
5.1.2	Einfluß der Zwischenkreisdrossel . . . . .	357
5.1.3	Erregung der Synchronmaschine . . . . .	360
5.2	Steuerung und Auslegung . . . . .	361
5.2.1	Lastgeführte Kommutierung . . . . .	362
5.2.2	Auslegung des Systems . . . . .	366
5.2.3	Schonzeitregelung der Thyristoren . . . . .	371
5.3	Regelung des Stromrichtermotors . . . . .	372
5.4	Ausführungsbeispiel . . . . .	375

<b>6</b>	<b>Selbstgeführte Wechselrichter mit eingprägtem Strom (I-Umrichter)</b>	<b>376</b>
6.1	Prinzipielles Systemverhalten . . . . .	376
6.2	Kommutierung des selbstgeführten Wechselrichters . . . . .	378
6.3	Auslegungsgang beim I-Umrichter mit Phasenfolgelöschung . .	391
6.3.1	Kritische Betriebszustände . . . . .	391
6.3.2	Beanspruchung der Umrichterelemente . . . . .	395
6.3.2.1	Kommutierungs-Kondensator . . . . .	395
6.3.2.2	Thyristoren . . . . .	397
6.3.2.3	Dioden . . . . .	399
6.3.2.4	Kommutierungsdrosseln, Stufendrosseln . . . . .	399
6.3.2.5	Entlastungsschaltungen (TSE-Beschaltungen) . . . . .	401
6.3.2.6	Umrichter mit Zusatzschaltung . . . . .	404
6.3.3	Auslegung der Einspeisung . . . . .	405
6.3.3.1	Netzgeführter Stromrichter . . . . .	405
6.3.3.2	Zwischenkreisdrossel . . . . .	407
6.3.4	Auslegung der Asynchronmaschine . . . . .	414
6.3.4.1	Betrieb mit Normmotoren . . . . .	414
6.3.4.2	Stern- bzw. Dreieckschaltung der Maschine . . . . .	417
6.3.4.3	Kleiner Stromhub . . . . .	418
6.3.4.4	Beanspruchung der Motorisolation . . . . .	419
6.3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	420
6.4	Steuer- und Regelverfahren . . . . .	423
6.5	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter . . . . .	425
6.5.1	I-Umrichter mit abschaltbaren Bauelementen . . . . .	425
6.5.2	Schaltzustände im I-Wechselrichter mit abschaltbaren Bauelementen . . . . .	431
6.5.3	Schaltentlastung für blockierfähige GTOs . . . . .	433
6.5.4	Kommutierungsvorgang . . . . .	434
6.6	Abschließende Bemerkungen . . . . .	438
<b>7</b>	<b>Gleichspannungswandler (Gleichstromsteller)</b>	<b>444</b>
7.1	Prinzip des Gleichspannungswandlers (Tiefsetzsteller) . . . . .	445
7.2	Gleichspannungswandler mit nicht abschaltbaren Bauelementen	447
7.2.1	Gleichspannungswandler-Grundschtaltung (Träger-Schtaltung) .	447
7.2.2	Sperrspannungsfreie Gleichspannungswandler-Schtaltung . . . .	453
7.2.3	Weitere Schaltungs-Abwandlungen mit Löschkreis . . . . .	461
7.3	Gleichspannungswandler mit abschaltbaren Bauelementen . . .	465
7.3.1	Gleichspannungswandler-Grundschtaltung mit GCT/GTO . . .	465
7.3.2	Gleichspannungswandler mit GTO und RCD-Beschaltung . . .	468
7.3.3	Schtaltung mit zusätzlichem Spannungsbegrenzer . . . . .	473
7.3.4	Verlustfreie Entlastungsschaltungen nach Boehringer . . . . .	477
7.3.4.1	Verlustfreie Entlastungsschtaltung (1) nach Boehringer . . . . .	478

7.3.4.2	Verlustfreie Ausschalt-Entlastung (2) nach Boehringer . . . . .	483
7.3.4.3	Verlustfreie Entlastungsschaltung (3) nach Boehringer . . . . .	486
7.3.5	Verlustfreie Entlastungsschaltung nach Marquardt . . . . .	492
7.3.6	Zusammenfassung Entlastungsschaltungen . . . . .	496
7.4	Grundlegende Steuerung und Regelung von Gleichspannungswandlern . . . . .	498
7.4.1	Pulsweitensteuerung . . . . .	498
7.4.2	Pulsfolgesteuerung . . . . .	500
7.4.3	Zweipunktregelung des Gleichspannungswandlers . . . . .	500
7.5	Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb	503
7.5.1	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb . . . . .	503
7.5.2	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb . . . . .	505
7.5.3	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerstromumkehr . . . . .	507
7.5.4	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerspannungsumkehr . . . . .	508
7.5.5	Vier-Quadrant-Betrieb . . . . .	512
7.5.6	Interleaved-Wandler . . . . .	515
7.6	Leistungsfaktor-Korrektur . . . . .	516
7.7	Weitere Abwandlungen der Gleichstromsteller-Schaltungen . . .	528
	<i>Prof. Dr. M. Reddig, Augsburg</i>	
7.8	Dreiphasige Pulsgleichrichtersysteme . . . . .	532
	<i>Prof. Dr. J. W. Kolar und Thomas Friedli, ETH Zürich</i>	
7.8.1	Einleitung . . . . .	533
7.8.2	Klassifizierung unidirektionaler dreiphasiger Gleichrichtersysteme	538
7.8.3	Phasenmodulare Gleichrichter . . . . .	542
7.8.3.1	Y-Rectifier . . . . .	544
7.8.3.2	$\Delta$ -Rectifier . . . . .	548
7.8.3.3	Diskussion . . . . .	551
7.8.4	Direkt dreiphasige Pulsgleichrichtertopologien . . . . .	552
7.8.4.1	Systeme mit Hochsetzsteller-Charakteristik . . . . .	554
7.8.4.2	Systeme mit Tiefsetzsteller-Charakteristik . . . . .	572
7.8.4.3	Systeme mit Hoch- und Tiefsetzsteller-Charakteristik . . . . .	582
7.8.5	Dimensionierung der Leistungshalbleiter und EMV-Filterung . .	583
7.8.5.1	Dimensionierung der Leistungshalbleiter . . . . .	586
7.8.5.2	Gegentakt- und Gleichtakt-EMV-Filter . . . . .	586
7.8.6	Vergleichende Gegenüberstellung . . . . .	591
7.8.6.1	Definition der Kennwerte . . . . .	593
7.8.6.2	Vergleich des Active Six-Switch Boost-Type PFC Rectifier, des $\Delta$ -Switch Rectifier und des VIENNA Rectifier . . . . .	596
7.8.6.3	Vergleich des Active Six-Switch Buck-Type PFC Rectifier und des SWISS Rectifier . . . . .	597
7.8.7	Schlussfolgerungen . . . . .	599

<b>8</b>	<b>Selbstgeführte Wechselrichter mit eingprägter Spannung (U-Wechselrichter)</b>	<b>603</b>
8.1	Einführung . . . . .	603
8.2	Zweipunkt-Wechselrichter . . . . .	604
8.2.1	Grundfrequenztaktung und Drehspannungssystem . . . . .	604
8.2.2	Spannungssteuerung . . . . .	609
8.2.3	Kommutierungsschaltungen . . . . .	611
8.3	U-Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung . . . . .	613
8.3.1	Zweipunkt-Wechselrichter mit Gleichstromsteller . . . . .	614
8.3.1.1	Ungesteuerete netzseitige Diodenbrücke . . . . .	614
8.3.1.2	Gleichstromsteller . . . . .	616
8.3.1.3	Zweipunkt-Wechselrichter — Funktionsweise . . . . .	616
8.3.2	Kommutierung des Wechselrichters mit Summenlöschung . . . . .	620
8.3.3	Netzgeführter Stromrichter als Einspeise-Stellglied . . . . .	623
8.3.4	VSC zu Back to Back Umrichter (BBC) . . . . .	625
8.3.4.1	Grundlagen . . . . .	625
8.3.4.2	Zwischenkreis-Auslegung . . . . .	629
8.3.4.3	Ansteuerungen . . . . .	632
8.3.4.4	Regelung . . . . .	633
8.3.4.5	Kosten-Nutzen-Analyse . . . . .	636
8.3.4.6	FACTs-Konfiguration . . . . .	639
8.3.4.7	Simulationsverfahren . . . . .	641
8.3.4.8	Regelung - Realisierung . . . . .	642
8.3.4.9	PFC-Gleichrichter . . . . .	648
8.3.4.10	Sondereffekte . . . . .	650
8.3.4.11	Praktische Hinweise . . . . .	655
8.4	Pulsverfahren, Pulsweitenmodulation . . . . .	658
8.4.1	Randbedingungen . . . . .	658
8.4.2	Zweipunktregelung . . . . .	659
8.4.3	Pulsweitenmodulation . . . . .	660
8.4.4	Unterschwingungsverfahren . . . . .	665
8.4.5	Sinus-Dreieck-Modulation allgemein . . . . .	670
8.4.5.1	Sinus-Dreieck PWM mit Zwischenpulsverschiebung . . . . .	676
8.4.6	Injektion von Harmonischen in das Grundschwingungssignal . . . . .	678
8.4.7	Rechteck-Dreieck-Modulation . . . . .	682
8.4.8	Rechteck-Dreieck-PWM; Oberschwingungen . . . . .	683
8.4.9	Übermodulation – Übersteuerung . . . . .	694
8.4.10	Raumzeigermodulation . . . . .	696
8.4.11	Übermodulation – Raumzeigermodulation . . . . .	701
	<i>Prof. Dr. A. M. Khambadkone, The National University of Singapore</i>	
8.4.12	PWM mit abgetastetem Sollwertsignal . . . . .	705
8.4.13	Direkte PWM . . . . .	707
8.4.14	Optimierte Pulsmustererzeugung . . . . .	708
8.4.15	Wechselrichter-Spannungsfehler . . . . .	718



8.5	Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	721
8.5.1	Dreipunkt–Wechselrichter, prinzipielle Funktion . . . . .	721
8.5.2	Nullpunkt–Stabilisierung . . . . .	730
8.5.3	Spannungsbeanspruchung und Leistung . . . . .	731
8.5.4	Diode–Clamped–Wechselrichter, Realisierung . . . . .	732
8.5.5	Aktiver NP–Wechselrichter . . . . .	733
8.5.6	Imbricated–Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	734
8.5.6.1	5L-FC-CI-Wechselrichter . . . . .	736
8.5.7	Kaskadierte Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	743
8.5.8	Hybride–Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	745
8.5.9	Modulare Mehrpunkt-Umrichter (M2C) . . . . .	748
	<i>Prof. Dr. R. Marquardt, München</i>	
8.5.9.1	Einleitung . . . . .	748
8.5.9.2	Eigenschaften und Grenzen der Grundschaltungen . . . . .	749
8.5.9.3	Grundlagen Modularer Mehrpunkt-Umrichter . . . . .	751
8.5.9.4	Steuerung der DC-Seite . . . . .	772
8.5.9.5	Dimensionierung der Halbleiter . . . . .	777
8.5.9.6	Fehlertoleranz und Redundanz . . . . .	778
8.5.10	Modulationsverfahren für Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	780
8.5.11	Blockbetrieb Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	781
8.5.12	Pulsweitenmodulation Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	783
8.5.13	Raumzeigermodulation, Mehrpunkt–Wechselrichter . . . . .	787
8.6	Anwendungs – Aspekte . . . . .	789
8.6.1	Multi-Level Topologien in der Hochleistungselektronik . . . . .	791
	<i>Dr. P. K. Steimer, ABB, Schweiz</i>	
8.6.1.1	Halbleitertechnologie - Hochleistungselektronik . . . . .	791
8.6.1.2	Topologien für die Hochleistungselektronik . . . . .	796
8.6.1.3	Neutral-Point Clamped Topologien . . . . .	796
8.6.1.4	Flying Capacitor Topologien . . . . .	796
8.6.1.5	Aktive Neutral Point Multi-level Topologie . . . . .	798
8.6.1.6	Multi-level Umrichter, Zellen-Aufbau und Einspeisung . . . . .	798
8.6.1.7	Multi-level Umrichter, Zellen Aufbau . . . . .	802
8.6.1.8	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	805
8.6.2	Beschaltungs–Minimierung . . . . .	806
8.6.2.1	Beschaltung – Ausgangssituation . . . . .	806
8.6.2.2	Varianten mit IGCT und <i>Si</i> -Dioden . . . . .	809
8.6.2.3	IGBT–Diode (MOSFET–Diode) . . . . .	814
8.6.2.4	Messergebnisse eines IGBT . . . . .	823
8.6.3	MOSFET- und IGBT-Gatetreiber . . . . .	836
	<i>Dr. habil. R. Herzer, Semikron, Nürnberg</i>	
8.6.3.1	Komponenten und Grundprinzipien eines leistungselektronischen Systems . . . . .	836
8.6.3.2	Grundlagen von Gatetreibern . . . . .	838
8.6.3.3	Ansteuerung und Schaltverhalten . . . . .	841

8.6.3.4	Integrierte Potentialtrennung und sekundärseitige Versorgung . . . . .	850
8.6.3.5	Gatetreiber mit galvanischer Isolation für mittlere und hohe Leistungen . . . . .	852
8.6.3.6	Gatetreiber mit erweiterter digitaler Signalverarbeitung für hohe Leistungen . . . . .	858
8.6.3.7	Gatetreiber für niedrige Leistungen ohne galvanische Isolation . . . . .	861
8.6.3.8	Grundlegende Konzepte und Funktionen hochspannungsfester Treiber-ICs (bis 1200V) . . . . .	862
8.6.3.9	Gatetreiber in PN-Isolation . . . . .	864
8.6.3.10	Gatetreiber in SOI-Technologie . . . . .	866
8.6.3.11	Gatetreiber mit Multi-Chip-Integration für 1200V . . . . .	869
8.6.3.12	Treiber- und IGBT/FWD-Inverter-Integration auf einem Chip ( <i>single chip inverter</i> ) . . . . .	872
8.6.4	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter beim Schalten . . . . . <i>Prof. Dr. H. G. Eckel, Dipl.-Ing. J. Böhmer, Rostock</i>	873
8.6.4.1	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter beim Schalten im normalen Betrieb . . . . .	873
8.6.4.2	Schaltbelastungen beim Abschalten von IGBT . . . . .	874
8.6.4.3	Schaltbelastungen beim Reverse-Recovery von Dioden . . . . .	890
8.6.4.4	Besondere Schaltbedingungen . . . . .	893
8.6.4.5	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter in Fehlerfällen . . . . .	896
8.6.4.6	Ausgangsseitige Kurzschlüsse auf der Gleichspannungsseite . . . . .	897
8.6.4.7	Ausgangsseitige Kurzschlüsse auf der Wechselspannungsseite . . . . .	899
8.6.4.8	Kurzschlussverhalten des IGBTs . . . . .	900
8.6.4.9	Kurzschlussverhalten von Dioden . . . . .	906
8.6.4.10	Kurzschlüsse im Umrichter . . . . .	907
8.6.4.11	Komponenten der Ansteuerschaltung zur Beherrschung der Kurzschlussfälle . . . . .	910
8.6.5	Schaltungsspezifische Belastungen der Bauelemente . . . . . <i>Prof. Dr. A. Lindemann, Dipl.-Ing. F. Grieger, Magdeburg</i>	913
8.6.5.1	Grundlagen . . . . .	913
8.6.5.2	Belastungen der Bauelemente in besonderen Betriebszuständen . . . . .	921
8.6.5.3	Zuverlässigkeit . . . . .	922
8.6.5.4	Schaltungsspezifische Belastungen . . . . .	934
8.7	Auslegung eines Drehstromantriebs mit Pulswechselrichter . . . . .	936
8.7.1	Bemessung der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine . . . . .	936
8.7.2	Dimensionierung des Pulswechselrichters . . . . .	937
8.7.3	Pulsationsmomente . . . . .	941
8.7.4	Gleichspannungs-Zwischenkreis . . . . .	942
8.7.5	Eingangsschaltungen und Bremsbetrieb . . . . .	942
8.7.6	Anwendungsbereiche der Pulswechselrichter . . . . .	944
8.8	Selbstgeführte Thyristor-Wechselrichter mit Phasenlöschung . . . . .	944
8.8.1	Schaltung und Arbeitsweise . . . . .	946
8.8.2	Dimensionierung der Schaltung (Übersicht) . . . . .	952

8.8.3	Grundgleichungen der Kommutierung . . . . .	954
8.8.4	Kommutierungsbedingung . . . . .	956
8.8.5	Thermische Belastung der Lastthyristoren . . . . .	958
8.8.5.1	Schalt- und Kommutierungsstromverluste . . . . .	959
8.8.5.2	Laststromverluste (Durchlaßverluste) . . . . .	959
8.8.5.3	Gesamte Verlustleistung in den Lastthyristoren . . . . .	964
8.8.6	Bestimmung der Kommutierungselemente . . . . .	965
8.8.7	Kriterien zur Auswahl der Kommutierungselemente . . . . .	965
8.9	Beschaltung von Leistungshalbleitern . . . . .	969
8.9.1	RCD-Schutzbeschaltung mit Überlaufkondensator . . . . .	970
8.9.1.1	Einschaltvorgang . . . . .	972
8.9.1.2	Ausschalten großer Lastströme . . . . .	973
8.9.1.3	Ausschalten kleiner Lastströme . . . . .	974
8.9.2	Unsymmetrische Beschaltung . . . . .	976
8.9.2.1	Einschaltvorgänge . . . . .	976
8.9.2.2	Ausschalten großer positiver Lastströme . . . . .	979
8.9.2.3	Ausschalten großer negativer Lastströme . . . . .	981
8.9.2.4	Ausschalten kleiner Lastströme . . . . .	982
8.9.3	Symmetrische Schutzbeschaltung . . . . .	984
8.9.3.1	Einschaltvorgang . . . . .	984
8.9.3.2	Ausschalten großer Lastströme . . . . .	986
8.9.3.3	Ausschalten kleiner Lastströme . . . . .	987
8.9.4	Vergleich der Schutzbeschaltungen . . . . .	989
8.9.5	Abschließende Hinweise . . . . .	990
8.10	Auslegungsbeispiel für einen U-Wechselrichter . . . . .	993
8.10.1	Einführung . . . . .	993
8.10.2	Orientierende Festlegung der Zwischenkreisspannung . . . . .	994
8.10.3	Weiterführende Überlegungen zur Bestimmung der Sperrspannung der Halbleiter . . . . .	998
8.10.4	Schutzkonzept eines U-Umrichters . . . . .	999
8.10.5	Orientierende Festlegung des abzuschaltenden Stroms . . . . .	1000
8.10.6	Weiterführende Überlegungen zum abschaltbaren Strom und zur Beschaltung . . . . .	1001
8.10.7	Quervergleich der bisherigen Ergebnisse . . . . .	1005
8.10.8	Auslegung des Zwischenkreiskondensators . . . . .	1006
8.10.9	Sicherheitsfaktoren . . . . .	1007
8.10.10	Verluste, Schaltfrequenzen, Kühlung . . . . .	1008
8.10.11	Zusammenfassung . . . . .	1019
8.11	Zusatzbeanspruchungen der Drehfeldmaschine . . . . .	1020
	<i>Prof. Dr. A. Binder, Darmstadt</i>	
8.11.1	Einleitung . . . . .	1020
8.11.2	Spannungsreflexionen an den Maschinenklemmen . . . . .	1021
8.11.2.1	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf verlustfreien Maschinezuleitungen bei Reflexionskoeffizienten $r = \pm 1$ . . . . .	1021

8.11.2.2	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf verlustfreien Maschinezuleitungen bei Reflexionskoeffizienten $ r  < 1$ . . . .	1029
8.11.2.3	Kritische Länge der Maschinezuleitung . . . . .	1031
8.11.3	Transiente Spannungsverteilung in der Maschinenwicklung . . .	1035
8.11.4	Beanspruchung der Wicklungsisolierung bei Umrichterspeisung .	1039
8.11.5	Umrichterbedingte Lagerströme in elektrischen Maschinen . . .	1045
8.11.5.1	Gleichtaktspannung der Statorwicklung gegen Erde . . . . .	1045
8.11.5.2	Entladeströme in den Lagern . . . . .	1050
8.11.5.3	Kapazitive Umladeströme . . . . .	1050
8.11.5.4	Hochfrequenter über die Lager fließender Kreisstrom . . . . .	1051
8.11.5.5	Hochfrequenter Rotor–Erdstrom . . . . .	1053
8.11.6	Systemauslegung von umrichtergespeisten Drehstromantrieben bei großem $du/dt$ . . . . .	1054
8.11.6.1	Kapazitive Ladeströme der Maschinezuleitungen . . . . .	1054
8.11.6.2	Umrichterausgangs–Filter . . . . .	1056
8.11.6.3	Motoreingangsimpedanzen zur Reflexionsvermeidung . . . . .	1064
8.11.6.4	Maßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung von umrichterbedingten Lagerströmen . . . . .	1066
8.11.6.5	Fehlerstromschutzschalter bei umrichtergespeisten Antrieben . .	1070
<b>9</b>	<b>Resonant schaltentlastete Wandler</b>	<b>1072</b>
9.1	Die Zellenstruktur der Gleichspannungswandler . . . . .	1075
9.2	Resonante Schaltentlastung: Grundüberlegungen . . . . .	1082
9.2.1	Einführung . . . . .	1082
9.2.2	Nullspannungsschalter (ZVS) . . . . .	1083
9.2.3	Nullstromschalter (ZCS) . . . . .	1087
9.2.4	Quasi-resonante und multi-resonante Wandler – Eine Gegenüberstellung . . . . .	1089
9.3	Quasi-resonante Zellwandler . . . . .	1091
9.3.1	Die quasi-resonanten Wandlerzellen in der Phasenebene . . . . .	1091
9.3.2	Quasi-Resonant Zero-Voltage-Switching (QR ZVS) . . . . .	1093
9.3.3	Quasi-Resonant Zero-Current-Switching (QR ZCS) . . . . .	1113
9.3.4	Die Gleichungen aller quasi-resonanten Zellen . . . . .	1125
9.3.5	Bewertung der quasi-resonanten Zellen . . . . .	1126
9.4	Multi-resonante Zellwandler . . . . .	1136
9.4.1	Die multi-resonante ZVS-Wandlerzelle im Phasenraum . . . . .	1137
9.4.2	Die vier Betriebsmodi . . . . .	1143
9.5	Resonante Brückenschaltungen . . . . .	1164
9.5.1	Erweiterte Resonanz-Brückenschaltungen . . . . .	1170
9.5.1.1	Serien-Parallel-Resonanz-Brückenschaltung (LCC) . . . . .	1170
9.5.1.2	LLC-Brückenschaltung . . . . .	1172
9.5.2	Modulationsstrategien für Serien-Parallel Resonanz Wandler . .	1174
9.5.3	Analyse resonanter Schaltungen . . . . .	1175
9.5.4	Serien-Resonanz-Wandler bei induktiver Betriebsweise (ZVS) .	1179

9.5.5	Serien-Parallel-Resonanz-Wandler mit kapazitivem Ausgangsfilter	1183
9.5.5.1	Serien-Parallel-Resonanz-Wandler bei induktiver Betriebsart (ZVS)	1183
9.5.5.2	Serien-Parallel-Resonanz-Wandler zur Ansteuerung von Hochspannungskaskaden . . . . .	1189
9.5.6	Serien-Parallel-Resonanz-Wandler mit induktivem Ausgangsfilter bei optimierter Modulation . . . . .	1196
9.5.6.1	Modellbildung im Frequenzbereich . . . . .	1197
9.5.6.2	Modellbildung im Zeitbereich bei stationärem Betrieb . . . . .	1199
9.5.6.3	Vergleich von Modellierungstechniken . . . . .	1205
9.5.7	LLC-Wandler . . . . .	1205
9.5.8	LLCC-Resonanz-Brückenschaltung zur Ansteuerung piezoelektrischer Aktuatoren . . . . .	1212
9.5.9	Zusammenfassung resonante Gleichspannungswandler . . . . .	1217
9.6	Transient-resonante Gleichspannungswandler . . . . .	1219
9.6.1	Einführung . . . . .	1219
9.6.2	Die transient-resonanten Schalter . . . . .	1220
9.6.3	Transient-resonante Zellwandler . . . . .	1222
9.6.4	Transient-resonante Brückenwandler . . . . .	1236
9.7	Dreiphasige resonante Wechselrichter . . . . .	1252
9.7.1	Einführung . . . . .	1252
9.7.2	Der ARCPI (Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter) . . . . .	1264
9.7.3	Der NLRPI (Non Linear Resonant Pole Inverter) . . . . .	1270
9.7.4	Der MACRDCLI (Modified Active Clamped Resonant DC Link Inverter) . . . . .	1276
9.7.5	Der PRDCLI (Parallel Resonant DC Link Inverter) . . . . .	1280
9.7.6	Zusammenfassung resonanter Dreiphasen-Wechselrichter . . . . .	1283
<b>10</b>	<b>Leistungselektronische Blindleistungs-Kompensation</b>	<b>1284</b>
10.1	Einführung: Verbraucher-Kompensation in Industrienetzen . . . . .	1284
10.2	Spannungsstabilisierung in Übertragungsnetzen . . . . .	1291
10.3	Blindleistungsquellen . . . . .	1297
10.3.1	Synchronmaschinen . . . . .	1297
10.3.2	Parallelkondensatoren . . . . .	1297
10.3.3	Serienkondensatoren . . . . .	1298
10.4	Dynamische Blindleistungsquellen . . . . .	1299
10.4.1	Sättigbare Spulen . . . . .	1299
10.4.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder . . . . .	1305
10.4.3	Thyristor-geschaltete Kondensatoren . . . . .	1306
10.4.4	Thyristor-gesteuerte Spule (TCR) . . . . .	1307
10.5	Herkömmliche Steuer- und Regelverfahren . . . . .	1308
10.6	Weiterführende Überlegungen — Stellglieder . . . . .	1318
10.7	Selbstgeführte Stellglieder als Kompensator . . . . .	1321
10.8	Weitere Überlegungen — Prädiktive Signalverarbeitung . . . . .	1323
10.9	Flexible AC Transmission Systems (FACTS) . . . . .	1331

10.9.1	Neuere Entwicklungen bei FACTs . . . . .	1335
10.9.2	StatCom . . . . . <i>Prof. Dr. H. P. Nee, H. Xie and L. Ängquist, KTH, Stockholm, Sweden</i>	1340
10.9.3	Introduction . . . . .	1340
10.9.4	StatCom, Standard Solution . . . . .	1343
10.9.4.1	Bus Voltage Response when the Resistive Load is Switched On	1343
10.9.4.2	Bus Voltage Response when the Resistive Load is Switched Off	1346
10.9.4.3	Remarks on Accentuated Phase Jumps Due to Reactive Power Support . . . . .	1347
10.9.5	Cost Estimation . . . . .	1350
10.9.6	Design of a Converter Interface . . . . .	1353
10.9.6.1	Dual Thyristor Interface Topology . . . . .	1353
10.9.7	System specifications and comparison method . . . . .	1353
10.10	Method of cost estimation . . . . .	1355
10.10.1	Capacitors as ES . . . . .	1356
10.10.1.1	With thyristor converter interface . . . . .	1356
10.10.1.2	With direct connection . . . . .	1357
10.10.2	Supercapacitors as ES . . . . .	1357
10.10.2.1	With thyristor converter interface . . . . .	1359
10.10.2.2	With direct connection . . . . .	1360
10.10.3	Batteries as ES . . . . .	1361
10.10.3.1	With the thyristor converter interface . . . . .	1361
10.10.3.2	With direct connection . . . . .	1362
10.11	Cost comparison . . . . .	1363
10.11.1	Capacitors as ES . . . . .	1363
10.11.2	Supercapacitors as ES . . . . .	1364
10.11.3	Batteries as ES . . . . .	1364
10.12	Cost comparison with capacitors, supercapacitors, and batteries in one time frame . . . . .	1367
10.12.1	Design and Analysis of a Controller . . . . .	1370
10.12.1.1	Control system overview . . . . .	1372
10.12.2	Active power compensation and dc-side voltage control . . . . .	1373
10.12.2.1	Active Power Compensation . . . . .	1373
10.12.2.2	Control of the ES Terminal Voltage $u_{ES}$ . . . . .	1374
10.12.2.3	Control of the Voltage $u_{C_2}$ across Capacitor $C_2$ . . . . .	1376
<b>11</b>	<b>Sondergebiete der Leistungselektronik</b>	<b>1384</b>
11.1	Stromrichter für elektrische Triebfahrzeuge . . . . . <i>Dr. H.-G. Eckel, Siemens, Nürnberg</i>	1386
11.1.1	Netzspannungen in der Traktion . . . . .	1386
11.1.2	Traktion für DC-Netze . . . . .	1388
11.1.2.1	Gleichstromsteller mit Gleichstrommotor . . . . .	1388
11.1.2.2	Stromzwischenkreisumrichter mit ASM . . . . .	1389
11.1.2.3	Spannungszwischenkreisumrichter mit ASM . . . . .	1389

11.1.3	Traktion für AC-Netze . . . . .	1392
11.1.3.1	Antriebssysteme mit Wechselstrom- und Mischstrommotor . . .	1392
11.1.3.2	Antriebssysteme mit Drehstrommotor . . . . .	1395
11.1.4	Antriebssysteme für mehrere Netzspannungen . . . . .	1399
11.1.4.1	Mehrsystemstromrichter für AC 15 kV und 25 kV . . . . .	1399
11.1.4.2	Mehrsystemstromrichter für AC und DC 750 V / 1500 V . . . .	1399
11.1.4.3	Mehrsystemstromrichter für AC und DC 3000 V . . . . .	1399
11.1.4.4	Mehrsystemstromrichter für AC, DC 3000 V und DC 1500 V . .	1404
11.1.5	Dieselelektrische Systeme . . . . .	1407
11.1.6	Umrichtertechnik . . . . .	1408
11.1.6.1	Leistungshalbleiter in der Traktion . . . . .	1408
11.2	Three-Phase Active Filters for Power Conditioning . . . . .	1409
	<i>Prof. Dr. H. Akagi, Tokyo Institute of Technology, Japan</i>	
11.2.1	Introduction . . . . .	1409
11.2.2	Voltage Harmonics in Power Systems . . . . .	1410
11.2.2.1	Harmonic-producing loads . . . . .	1410
11.2.2.2	Voltage THD and 5th-harmonic voltages . . . . .	1411
11.2.3	Traditional Passive Filters . . . . .	1412
11.2.3.1	Circuit configurations . . . . .	1413
11.2.3.2	Consideration to installation . . . . .	1413
11.2.4	Pure Active Filters for Power Conditioning . . . . .	1414
11.2.4.1	Circuit configurations of shunt and series active filters . . . . .	1414
11.2.4.2	Three-phase voltage-source and current-source PWM converters	1416
11.2.4.3	Three-phase pure active filters . . . . .	1417
11.2.4.4	Trends in pure active filters . . . . .	1418
11.2.5	Series Active Filters . . . . .	1419
11.2.5.1	System configuration . . . . .	1420
11.2.5.2	Operating principle . . . . .	1420
11.2.5.3	Design and effect of switching-ripple filters . . . . .	1421
11.2.5.4	Experimental results - Series Active Filters . . . . .	1423
11.2.6	Hybrid Active Filters for Harmonic-Current Filtering . . . . .	1423
11.2.6.1	Circuit configurations . . . . .	1423
11.2.6.2	Experimental waveforms . . . . .	1425
11.2.7	Low-Voltage Transformerless Hybrid Active Filters . . . . .	1427
11.2.7.1	The 480 V hybrid active filter . . . . .	1428
11.2.7.2	The 480 V pure active filter . . . . .	1430
11.2.7.3	Design of the 480 V hybrid active filter . . . . .	1432
11.2.7.4	Comparisons between the 480 V hybrid and pure filters . . . . .	1433
11.2.8	The 400 V Hybrid Active Filter . . . . .	1436
11.2.8.1	System configuration . . . . .	1436
11.2.8.2	Start-up procedure . . . . .	1437
11.2.8.3	Steady-state performance of the passive filter used alone . . . .	1437
11.2.8.4	Steady-state performance of the hybrid filter . . . . .	1437
11.2.8.5	Transient-state performance of the hybrid filter . . . . .	1439



11.2.9	Medium-Voltage Transformerless Hybrid Active Filters . . . . .	1440
11.2.10	Practical Applications of Active Filters . . . . .	1441
11.2.10.1	Application to harmonic-current filtering . . . . .	1441
11.2.10.2	Application to voltage-flicker reduction . . . . .	1441
11.2.11	Conclusions . . . . .	1445
11.3	Elektronische Energiewandler für netzgekoppelte fotovoltaische Solarenergieanlagen . . . . .	1446
	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias	
11.3.1	Einleitung . . . . .	1446
11.3.2	Grundsätzliche Zielstellungen und Anforderungen . . . . .	1447
11.3.3	Gestaltung der Energiewandlungskette DC/AC für FV-Systeme	1453
11.3.4	Situation bei den Halbleiterschaltern . . . . .	1456
11.3.5	MPP-Tracking . . . . .	1459
11.3.6	Schaltungstopologien für netzgekoppelte Fotovoltaik-Wechselrichter . . . . .	1461
11.3.6.1	Wandlerstrukturen zur Erfüllung der netzseitigen Anforderungen	1462
11.3.6.2	Generatorseitige Anforderungen an PV-Wechselrichter . . . . .	1465
11.3.7	Gütekriterien zur Einschätzung von Topologien zur Energiewandlung . . . . .	1472
11.3.8	Netzintegration von fotovoltaischen Energielieferanten . . . . .	1474
11.3.8.1	Dezentrale Spannungsregelung in Netzen . . . . .	1474
11.3.8.2	Blindleistungskompensation . . . . .	1477
11.3.8.3	Spitzenlastabsenkung, Flickerminderung und Versorgungssicherung	1478
11.3.9	Netzstützung im Fehlerfall . . . . .	1480
11.3.10	Zusammenfassung . . . . .	1483
11.4	Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen . . . . .	1485
	<i>Dr. F. Franck et al, Osram, München</i>	
11.4.1	Einführung . . . . .	1485
11.4.2	Lichterzeugung und Gliederung wichtiger Lichtquellen . . . . .	1486
11.4.3	Grundlagen zum Betrieb von Entladungslampen . . . . .	1497
11.4.4	Konventionelle Betriebsgeräte (Vorschaltgeräte) für (Hochdruck-) Entladungslampen . . . . .	1499
11.4.4.1	KVG für Niederdruckentladungslampen . . . . .	1501
11.4.4.2	Konventionelle Betriebsgeräte für Hochdruck-Entladungslampen	1503
11.4.5	Elektronische Betriebsgeräte für Entladungslampen . . . . .	1505
11.4.5.1	Elektronische Betriebsgeräte für Hochdruck-Entladungslampen .	1507
11.4.5.2	EVG für Niederdruckgasentladungslampen . . . . .	1525
11.4.6	Elektronische Transformatoren für Niedervolt-Halogenglühlampen	1543
11.4.7	Vor- und Nachteile von EVG und KVG . . . . .	1548
11.4.8	Solid State Lightning (SSL) . . . . .	1549
11.5	Akustische Grundlagen zur Geräuschemessung . . . . .	1552
	<i>F. Witzani, Osram, München</i>	
11.5.1	Praktisches Messverfahren zur Bestimmung der akustischen Schalleistung . . . . .	1557



XXVI	Inhaltsverzeichnis	
11.5.2	Ermittlung der Schalleistung aus dem mittleren Schalldruck in der Halbkugel . . . . .	1559
11.5.3	Grundlegende Mechaniken der Schallerzeugung in elektrischen Komponenten . . . . .	1559
11.5.4	Praktische Methode zur Schalleistungsmessung an elektrischen Komponenten . . . . .	1563
11.5.5	Umsetzung einer Geräuschreduzierung mit messtechnischer Auswertung . . . . .	1567
11.5.6	Schlussfolgerung . . . . .	1571
<b>12</b>	<b>Simulation von leistungselektronischen Schaltungen</b>	<b>1572</b>
	<b>Variablenübersicht</b>	<b>1580</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>1591</b>
	Allgemeine Literatur (Bücher) . . . . .	1591
	Netzgeführte Stromrichter . . . . .	1596
	Direktumrichter . . . . .	1601
	Matrixkonverter . . . . .	1604
	Untersynchrone Kaskade – USK . . . . .	1612
	Stromrichtermotor . . . . .	1614
	I–Umrichter . . . . .	1617
	Gleichspannungswandler . . . . .	1622
	Leistungsfaktor–Korrektur . . . . .	1624
	Entlastungsschaltungen . . . . .	1625
	Dreiphasige Pulsleichrichtersysteme . . . . .	1630
	U–Umrichter . . . . .	1638
	Übermodulation – Raumzeigermodulation . . . . .	1655
	Dreipunkt–Wechselrichter . . . . .	1657
	Multi-Level Topologien in der Hochleistungselektronik . . . . .	1660
	Modulare Merpunkt–Umrichter (M2C) . . . . .	1663
	MOSFET- und IGBT-Gatetreiber . . . . .	1665
	Schaltungsspezifische Belastungen der Bauelemente . . . . .	1668
	Elektrische Belastung der Leistungshalbleiter beim Schalten im normalen Betrieb . . . . .	1669
	Zusatzbeanspruchungen der Drehfeldmaschine . . . . .	1671
	Resonant schaltentlastete Wandler . . . . .	1674
	Spannungsstabilisierung . . . . .	1683
	Aktive Filter . . . . .	1687
	FACTS . . . . .	1692
	Traktions–Antriebe . . . . .	1700
	Traktions–Antriebe . . . . .	1708

Elektronische Energiewandler für netzgekoppelte photovoltaische Solarener- gieanlagen . . . . .	1711
Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen . . . . .	1717
Simulation von leistungselektronischen Schaltungen . . . . .	1719
<b>Stichwortverzeichnis</b>	1723