

Inhaltsverzeichnis

1	Stromrichterschaltungen (Übersicht)	1
1.1	Grundfunktionen von Stromrichtern	1
1.2	Einteilung der Stromrichter nach der Art der Kommutierung . .	2
2	Netzgeführte Stromrichter	9
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
3	Direktumrichter	152
3.1	Trapezumrichter	153
3.1.1	Einphasiger Trapezumrichter	153
3.1.2	Mehrphasiger Trapezumrichter	154
3.1.3	Frequenzelastischer Trapezumrichter	156
3.2	Steuerungrichter	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- gespeisten 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
4	Untersynchrone Stromrichter-kaskade (USK)	297
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 Netzs Umschaltungen	347
4.6	Zusammenfassung	347
5	Stromrichtermotor	349
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

6	Selbstgeführte Wechselrichter mit eingepprägtem Strom (I-Umrichter)	376
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	Kommutierungs-drosseln, 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
7	Gleichspannungswandler (Gleichstromsteller)	444
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 Pulsleichrichtersysteme	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	Δ -Rectifier	548
7.8.3.3	Diskussion	551
7.8.4	Direkt dreiphasige Pulsleichrichtertopologien	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 Δ -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

8	Selbstgeführte Wechselrichter mit eingprägter Spannung (U-Wechselrichter)	603
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	Ungesteuerte 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	Anwendungen – 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 Si-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 Maschinenzuleitungen 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
9	Resonant schaltentlastete Wandler	1072
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
10	Leistungselektronische Blindleistungs-Kompensation	1284
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	1340
	<i>Prof. Dr. H. P. Nee, H. Xie and L. Ängquist, KTH, Stockholm, Sweden</i>	
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
11	Sondergebiete der Leistungselektronik	1384
11.1	Stromrichter für elektrische Triebfahrzeuge	1386
	<i>Dr. H.-G. Eckel, Siemens, Nürnberg</i>	
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	Diselelektrische 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 Energiewand- lung	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 Geräuschmessung	1552
	<i>F. Witzani, Osram, München</i>	
11.5.1	Praktisches Messverfahren zur Bestimmung der akustischen Schalleistung	1557

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
12	Simulation von leistungselektronischen Schaltungen	1572
	Variablenübersicht	1580
	Literaturverzeichnis	1591
	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
Stichwortverzeichnis	1723