

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 Netzurückwirkungen	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	Netzurückwirkungen	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
2.8	Umkehrstromrichter	97
2.8.1	Kreisstromfreie Gegenparallelschaltung	98
2.8.2	Kreisstrombehaftete Kreuzschaltung	100
2.8.3	H-Schaltung	104
2.9	Blindleistungssparende Schaltungen	109
2.9.1	Schaltungen mit Freilaufdiode	111
2.9.2	Halbgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6H-Schaltung)	116
2.9.3	Zu- und Gegenschaltung von Teilstromrichtern	122
2.9.4	B6-Schaltung mit Hilfstthyristoren	127
2.9.5	Halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltungen (B2H-Schaltung)	131
2.9.6	Folgesteuerung von Teilstromrichtern	134
2.9.7	Löschbare unsymmetrische Brückenschaltungen	140
2.9.7.1	Sektorsteuerung	140
2.9.7.2	Löschbare unsymmetrische Brückenschaltung (LUB)	142
3	Direktumrichter	145
3.1	Trapezumrichter	146
3.1.1	Einphasiger Trapezumrichter	146
3.1.2	Mehrphasiger Trapezumrichter	147
3.1.3	Frequenzelastischer Trapezumrichter	149
3.2	Steuerungrichter	150
3.3	Schaltungsvarianten des Direktumrichters	153
3.3.1	Wahl der Umkehrstromrichter	153
3.3.2	Schaltung der Last	153
3.3.3	Schaltungsvarianten des Umrichters	156
3.4	Frequenzbeschränkung beim Direktumrichter	162
3.5	Auslegungskriterien	175
3.6	Regelung der direktumrichter- gespeisten Synchronmaschine	176
3.6.1	Stationäres Flußmodell	179
3.6.2	Dynamisches Flußmodell	182
3.6.3	Stromregelkreise	185
3.6.4	Trapezbetrieb	185
3.6.5	Synchronmaschine	186
3.7	Ausführungsbeispiele	186
3.8	Matrixkonverter	188

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

3.8.1	Einleitung	188
3.8.2	Konzepte dreiphasiger AC/AC-Konverterschaltungen	189
3.8.2.1	AC/AC-Konverter mit Zwischenspeicher	189
3.8.2.2	AC/AC-Matrixkonverter	194
3.8.2.3	Klassifizierung	196
3.8.3	AC/AC-Konverter mit Spannungszwischenkreis	199
3.8.3.1	Grundfunktion	199
3.8.3.2	Spannungskonversion und Raumzeigermodulation	201
3.8.3.3	Stromkonversion	205
3.8.3.4	Funktions-Ersatzschaltbild	208
3.8.4	AC/AC-Konverter mit Stromzwischenkreis	209
3.8.4.1	Grundfunktion	210
3.8.4.2	Stromkonversion und Raumzeigermodulation	212
3.8.4.3	Spannungskonversion	214
3.8.4.4	Funktions-Ersatzschaltbild	219
3.8.5	AC/AC-Umrichter mit Spannungszwischenkreis ohne Energie- speicher	219
3.8.5.1	Grundfunktion	219
3.8.5.2	Spannungsübersetzungsverhältnis	221
3.8.6	Indirekter Matrixkonverter	224
3.8.6.1	Ableitung der Schaltungsstruktur	224
3.8.6.2	Spannungs- und Stromkonversion	227
3.8.6.3	Raumzeigermodulation	231
3.8.6.4	Funktions-Ersatzschaltbild	244
3.8.7	Vereinfachte Schaltungstopologien indirekter Matrixkonverter	249
3.8.7.1	Sparse Matrix Converter	249
3.8.7.2	Ultra-Sparse Matrix Converter	250
3.8.7.3	Very-Sparse Matrix Converter	252
3.8.8	Direkter Matrixkonverter	253
3.8.8.1	Grundfunktion	254
3.8.8.2	Schaltzustände	255
3.8.8.3	Rotierende Strom- und Spannungsraumzeiger	257
3.8.8.4	Feststehende Strom- und Spannungsraumzeiger	259
3.8.8.5	Relation der Schaltzustände von CMC und IMC	263
3.8.8.6	Raumzeigermodulation des CMC	265
3.8.8.7	Mehrschrittkommutierung des CMC	268
3.8.9	Erweiterungen der Matrixkonverter-Grundstrukturen	272
3.8.9.1	Indirekte Dreipunkt-Matrixkonverter	272
3.8.9.2	IMC mit nach Eingangsphasen getrennten Zwischenkreisen	275
3.8.9.3	Matrixkonverter in Vollbrückenschaltung	276
3.8.9.4	Hybride Matrixkonverter	279
3.8.10	Diskussion	282
3.8.10.1	Ausgangsspannungsbereich und Betriebseigenschaften	283
3.8.10.2	Modulation	283

3.8.10.3	Kommutierung	283
3.8.10.4	Zwischenkreiskondensator und Ride-through	284
3.8.10.5	EMV-Filter	285
3.8.10.6	Verluste und Effizienz	285
3.8.10.7	Komplexität der Schaltung und Realisierungsaufwand	286
3.8.10.8	Kühlung und Baugröße	287
3.8.10.9	Regelung	287
3.8.10.10	Stillstand und Gleichheit von Ein- und Ausgangsfrequenz	288
3.8.11	Ausblick	288
4	Untersynchrone Stromrichter-kaskade (USK)	290
4.1	Aufbau und Funktion	290
4.2	Quasistationäre Regelung der untersynchronen Kaskade	305
4.3	Die USK und Netzrückwirkungen	311
4.4	Auslegung der untersynchronen Kaskade	314
4.4.1	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	314
4.4.2	Anlaßwiderstand	318
4.4.3	Gleichrichterbrücke	323
4.4.4	Wechselrichterbrücke	325
4.4.5	Zwischenkreisdrossel	330
4.4.6	Blindleistungskompensation	332
4.4.7	Schaltspannungsschutz	333
4.4.8	Vorfluten der Dioden	334
4.5	Sonderausführungen	336
4.5.1	Umschaltbare Kaskade	336
4.5.2	Zwölfpulssige Ausführung	338
4.5.3	Schaltungen bei Netzunterbrechungen und Netzumschaltungen	340
4.6	Zusammenfassung	340
5	Stromrichtermotor	342
5.1	Prinzipielle Funktion	342
5.1.1	Drehmomentverlauf	348
5.1.2	Einfluß der Zwischenkreisdrossel	351
5.1.3	Erregung der Synchronmaschine	353
5.2	Steuerung und Auslegung	354
5.2.1	Lastgeführte Kommutierung	355
5.2.2	Auslegung des Systems	359
5.2.3	Schonzeitregelung der Thyristoren	364
5.3	Regelung des Stromrichtermotors	365
5.4	Ausführungsbeispiel	368

6	Selbstgeführte Wechselrichter mit eingepprägtem Strom (I-Umrichter)	369
6.1	Prinzipielles Systemverhalten	369
6.2	Kommutierung des selbstgeführten Wechselrichters	371
6.3	Auslegungsgang beim I-Umrichter mit Phasenfolgelöschung . .	384
6.3.1	Kritische Betriebszustände	384
6.3.2	Beanspruchung der Umrichterelemente	388
6.3.2.1	Kommutierungs-Kondensator	388
6.3.2.2	Thyristoren	390
6.3.2.3	Dioden	392
6.3.2.4	Kommutierungs-drosseln, Stufendrosseln	392
6.3.2.5	Entlastungsschaltungen (TSE-Beschaltungen)	394
6.3.2.6	Umrichter mit Zusatzschaltung	397
6.3.3	Auslegung der Einspeisung	398
6.3.3.1	Netzgeführter Stromrichter	398
6.3.3.2	Zwischenkreisdrossel	400
6.3.4	Auslegung der Asynchronmaschine	407
6.3.4.1	Betrieb mit Normmotoren	407
6.3.4.2	Stern- bzw. Dreieckschaltung der Maschine	410
6.3.4.3	Kleiner Stromhub	411
6.3.4.4	Beanspruchung der Motorisolation	412
6.3.5	Anwendungsbeispiele	413
6.4	Steuer- und Regelverfahren	416
6.5	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter	418
6.5.1	I-Umrichter mit abschaltbaren Bauelementen	418
6.5.2	Schaltzustände im I-Wechselrichter mit abschaltbaren Bauelementen	424
6.5.3	Schaltentlastung für blockierfähige GTOs	426
6.5.4	Kommutierungsvorgang	427
6.6	Abschließende Bemerkungen	431
7	Gleichspannungswandler (Gleichstromsteller)	437
7.1	Prinzip des Gleichspannungswandlers (Tiefsetzsteller)	438
7.2	Gleichspannungswandler mit nicht abschaltbaren Bauelementen	440
7.2.1	Gleichspannungswandler-Grundschialtung (Tröger-Schaltung) .	440
7.2.2	Sperrspannungsfreie Gleichspannungswandler-Schaltung	446
7.2.3	Weitere Schaltungs-Abwandlungen mit Löschkreis	454
7.3	Gleichspannungswandler mit abschaltbaren Bauelementen . . .	458
7.3.1	Gleichspannungswandler-Grundschialtung mit GCT/GTO . . .	458
7.3.2	Gleichspannungswandler mit GTO und RCD-Beschaltung . . .	461
7.3.3	Schaltung mit zusätzlichem Spannungsbegrenzer	466
7.3.4	Verlustfreie Entlastungsschaltungen nach Boehringer	470
7.3.4.1	Verlustfreie Entlastungsschaltung (1) nach Boehringer	471

7.3.4.2	Verlustfreie Ausschalt-Entlastung (2) nach Boehringer	476
7.3.4.3	Verlustfreie Entlastungsschaltung (3) nach Boehringer	479
7.3.5	Verlustfreie Entlastungsschaltung nach Marquardt	485
7.3.6	Zusammenfassung Entlastungsschaltungen	489
7.4	Grundlegende Steuerung und Regelung von Gleichspannungs- wandlern	491
7.4.1	Pulsweitensteuerung	491
7.4.2	Pulsfolgesteuerung	493
7.4.3	Zweipunktregelung des Gleichspannungswandlers	493
7.5	Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb	496
7.5.1	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb	496
7.5.2	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb	498
7.5.3	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerstromumkehr	500
7.5.4	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerspannungsumkehr	501
7.5.5	Vier-Quadrant-Betrieb	505
7.5.6	Interleaved-Wandler	508
7.6	Leistungsfaktor-Korrektur	511
7.7	Weitere Abwandlungen der Gleichstromsteller-Schaltungen . . .	521
	<i>Prof. Dr. M. Reddig, Augsburg</i>	

8	Selbstgeführte Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (U-Wechselrichter)	526
8.1	Einführung	526
8.2	Zweipunkt-Wechselrichter	527
8.2.1	Grundfrequenztaktung und Drehspannungssystem	527
8.2.2	Spannungssteuerung	532
8.2.3	Kommutierungsschaltungen	534
8.3	U-Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung	536
8.3.1	Zweipunkt-Wechselrichter mit Gleichstromsteller	537
8.3.1.1	Ungesteuerte netzseitige Diodenbrücke	537
8.3.1.2	Gleichstromsteller	539
8.3.1.3	Zweipunkt-Wechselrichter — Funktionsweise	539
8.3.2	Kommutierung des Wechselrichters mit Summenlöschung	543
8.3.3	Netzgeführter Stromrichter als Einspeise-Stellglied	546
8.4	Pulsverfahren, Pulsweitenmodulation	548
8.4.1	Randbedingungen	548
8.4.2	Zweipunktregelung	548
8.4.3	Pulsweitenmodulation	550
8.4.4	Unterschwingungsverfahren	554
8.4.5	Sinus-Dreieck-Modulation allgemein	559
8.4.5.1	Sinus-Dreieck PWM mit Zwischenpulsverschiebung	566
8.4.6	Injektion von Harmonischen in das Grundschnungssignal . .	569
8.4.7	Rechteck-Dreieck-Modulation	572
8.4.8	Rechteck-Dreieck-PWM; Oberschwingungen	572

8.4.9	Übermodulation – Übersteuerung	581
8.4.10	Raumzeigermodulation	586
8.4.11	Übermodulation – Raumzeigermodulation	591
	<i>Prof. Dr. A. M. Khambadkone, The National University of Singapore</i>	
8.4.12	PWM mit abgetastetem Sollwertsignal	594
8.4.13	Direkte PWM	597
8.4.14	Optimierte Pulsmustererzeugung	597
8.4.15	Wechselrichter–Spannungsfehler	607
8.5	Mehrpunkt–Wechselrichter	610
8.5.1	Dreipunkt–Wechselrichter, prinzipielle Funktion	610
8.5.2	Nullpunkt–Stabilisierung	619
8.5.3	Spannungsbeanspruchung und Leistung	619
8.5.4	Diode–Clamped–Wechselrichter, Realisierung	620
8.5.5	Aktiver NP–Wechselrichter	621
8.5.6	Imbricated–Mehrpunkt–Wechselrichter	623
8.5.7	Kaskadierte Mehrpunkt–Wechselrichter	625
8.5.8	Hybride–Mehrpunkt–Wechselrichter	629
8.5.9	Modulationsverfahren für Mehrpunkt–Wechselrichter	632
8.5.10	Blockbetrieb Mehrpunkt–Wechselrichter	632
8.5.11	Raumweitenmodulation Mehrpunkt–Wechselrichter	634
8.5.12	Raumzeigermodulation, Mehrpunkt–Wechselrichter	638
8.6	Auslegung eines Drehstromantriebs mit Pulswechselrichter	641
8.6.1	Bemessung der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine	641
8.6.2	Dimensionierung des Pulswechselrichters	643
8.6.3	Pulsationsmomente	645
8.6.4	Gleichspannungs–Zwischenkreis	646
8.6.5	Eingangsschaltungen und Bremsbetrieb	647
8.6.6	Anwendungsbereiche der Pulswechselrichter	648
8.7	Selbstgeführte Thyristor–Wechselrichter mit Phasenlöschung	650
8.7.1	Schaltung und Arbeitsweise	651
8.7.2	Dimensionierung der Schaltung (Übersicht)	657
8.7.3	Grundgleichungen der Kommutierung	659
8.7.4	Kommutierungsbedingung	661
8.7.5	Thermische Belastung der Lastthyristoren	663
8.7.5.1	Schalt- und Kommutierungsstromverluste	663
8.7.5.2	Laststromverluste (Durchlaßverluste)	663
8.7.5.3	Gesamte Verlustleistung in den Lastthyristoren	668
8.7.6	Bestimmung der Kommutierungselemente	669
8.7.7	Kriterien zur Auswahl der Kommutierungselemente	669
8.8	Beschaltung von Leistungshalbleitern	673
8.8.1	RCD–Schutzbeschaltung mit Überlaufkondensator	674
8.8.1.1	Einschaltvorgang	675
8.8.1.2	Ausschalten großer Lastströme	677
8.8.1.3	Ausschalten kleiner Lastströme	678

8.8.2	Unsymmetrische Beschaltung	680
8.8.2.1	Einschaltvorgänge	680
8.8.2.2	Ausschalten großer positiver Lastströme	683
8.8.2.3	Ausschalten großer negativer Lastströme	685
8.8.2.4	Ausschalten kleiner Lastströme	686
8.8.3	Symmetrische Schutzbeschaltung	688
8.8.3.1	Einschaltvorgang	688
8.8.3.2	Ausschalten großer Lastströme	690
8.8.3.3	Ausschalten kleiner Lastströme	691
8.8.4	Vergleich der Schutzbeschaltungen	693
8.8.5	Abschließende Hinweise	694
8.9	Auslegungsbeispiel für einen GTO–U–Wechselrichter	697
8.9.1	Einführung	697
8.9.2	Orientierende Festlegung der Zwischenkreisspannung	698
8.9.3	Weiterführende Überlegungen zur Bestimmung der Sperrspannung der Halbleiter	702
8.9.4	Schutzkonzept eines U–Umrichters	703
8.9.5	Orientierende Festlegung des abzuschaltenden Stroms	704
8.9.6	Weiterführende Überlegungen zum abschaltbaren Strom der GTOs und zur Beschaltung	705
8.9.7	Quervergleich der bisherigen Ergebnisse	709
8.9.8	Auslegung des Zwischenkreiskondensators	710
8.9.9	Sicherheitsfaktoren	711
8.9.10	Verluste, Schaltfrequenzen, Kühlung	712
8.9.11	Zusammenfassung	723
8.10	Zusatzbeanspruchungen der Drehfeldmaschine	724
	<i>Prof. Dr. A. Binder, Darmstadt</i>	
8.10.1	Einleitung	724
8.10.2	Spannungsreflexionen an den Maschinenklemmen	725
8.10.2.1	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf verlustfreien Maschinenzuleitungen bei Reflexionskoeffizienten $r = \pm 1$	725
8.10.2.2	Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf verlustfreien Maschinenzuleitungen bei Reflexionskoeffizienten $ r < 1$	733
8.10.2.3	Kritische Länge der Maschinenzuleitung	735
8.10.3	Transiente Spannungsverteilung in der Maschinenwicklung	739
8.10.4	Beanspruchung der Wicklungsisolierung bei Umrichterspeisung	743
8.10.5	Umrichterbedingte Lagerströme in elektrischen Maschinen	749
8.10.5.1	Gleichtaktspannung der Statorwicklung gegen Erde	749
8.10.5.2	Entladeströme in den Lagern	754
8.10.5.3	Kapazitive Umladeströme	754
8.10.5.4	Hochfrequenter über die Lager fließender Kreisstrom	755
8.10.5.5	Hochfrequenter Rotor–Erdstrom	757
8.10.6	Systemauslegung von umrichtergespeisten Drehstromantrieben bei großem du/dt	758

8.10.6.1	Kapazitive Ladeströme der Maschinenzuleitungen	758
8.10.6.2	Umrichterausgangs-Filter	760
8.10.6.3	Motoreingangsimpedanzen zur Reflexionsvermeidung	768
8.10.6.4	Maßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung von umrichterbe- dingten Lagerströmen	770
8.10.6.5	Fehlerstromschutzschalter bei umrichtergespeisten Antrieben . .	774
9	Resonant schaltentlastete Wandler	776
9.1	Die Zellenstruktur der Gleichspannungswandler	779
9.2	Resonante Schaltentlastung: Grundüberlegungen	786
9.2.1	Einführung	786
9.2.2	Nullspannungsschalter (ZVS)	787
9.2.3	Nullstromschalter (ZCS)	791
9.2.4	Quasi-resonante und multi-resonante Wandler – Eine Gegenüber- stellung	793
9.3	Quasi-resonante Zellwandler	795
9.3.1	Die quasi-resonanten Wandlerzellen in der Phasenebene	795
9.3.2	Quasi-Resonant Zero-Voltage-Switching (QR ZVS)	797
9.3.3	Quasi-Resonant Zero-Current-Switching (QR ZCS)	817
9.3.4	Die Gleichungen aller quasi-resonanten Zellen	829
9.3.5	Bewertung der quasi-resonanten Zellen	830
9.4	Multi-resonante Zellwandler	840
9.4.1	Die multi-resonante ZVS-Wandlerzelle im Phasenraum	841
9.4.2	Die vier Betriebsmodi	847
9.5	Resonante Brückenschaltungen	868
9.5.1	Serien-Parallel-Resonanz-Brückenschaltung	874
9.5.2	Serien-Parallel-Resonanz-Brückenschaltung mit konstanter Schaltfrequenz	876
9.5.3	Analyse resonanter Schaltungen	877
9.5.4	Serien-Resonanz-Wandler bei induktiver Betriebsweise (ZVS) . .	880
9.5.5	Serien-Parallel-Resonanz-Wandler bei induktiver Betriebsart (ZVS)	884
9.5.6	Zusammenfassung resonante Gleichspannungswandler	890
9.6	Transient-resonante Gleichspannungswandler	891
9.6.1	Einführung	891
9.6.2	Die transient-resonanten Schalter	892
9.6.3	Transient-resonante Zellwandler	894
9.6.4	Transient-resonante Brückenwandler	908
9.7	Dreiphasige resonante Wechselrichter	924
9.7.1	Einführung	924
9.7.2	Der ARCPI (Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter) . .	936
9.7.3	Der NLRPI (Non Linear Resonant Pole Inverter)	942
9.7.4	Der MACRDCLI (Modified Active Clamped Resonant DC Link Inverter)	948
9.7.5	Der PRDCLI (Parallel Resonant DC Link Inverter)	952

9.7.6	Zusammenfassung resonanter Dreiphasen-Wechselrichter	955
10	Leistungselektronische Blindleistungs-Kompensation	956
10.1	Einführung: Verbraucher-Kompensation in Industrienetzen . . .	956
10.2	Spannungsstabilisierung in Übertragungsnetzen	963
10.3	Blindleistungsquellen	969
10.3.1	Synchronmaschinen	969
10.3.2	Parallelkondensatoren	969
10.3.3	Serienkondensatoren	970
10.4	Dynamische Blindleistungsquellen	971
10.4.1	Sättigbare Spulen	971
10.4.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder	977
10.4.3	Thyristor-geschaltete Kondensatoren	978
10.4.4	Thyristor-gesteuerte Spule (TCR)	979
10.5	Herkömmliche Steuer- und Regelverfahren	980
10.6	Weiterführende Überlegungen — Stellglieder	990
10.7	Selbstgeführte Stellglieder als Kompensator	993
10.8	Weitere Überlegungen — Prädiktive Signalverarbeitung	995
10.9	Flexible AC Transmission Systems (FACTS)	1003
11	Sondergebiete der Leistungselektronik	1007
11.1	Stromrichter für elektrische Triebfahrzeuge <i>Dr. H.-G. Eckel, Nürnberg</i>	1009
11.1.1	Netzspannungen in der Traktion	1009
11.1.2	Traktion für DC-Netze	1010
11.1.2.1	Gleichstromsteller mit Gleichstrommotor	1011
11.1.2.2	Stromzwischenkreisumrichter mit ASM	1011
11.1.2.3	Spannungszwischenkreisumrichter mit ASM	1013
11.1.3	Traktion für AC-Netze	1016
11.1.3.1	Antriebssysteme mit Wechselstrom- und Mischstrommotor . . .	1016
11.1.3.2	Antriebssysteme mit Drehstrommotor	1018
11.1.4	Antriebssysteme für mehrere Netzspannungen	1022
11.1.4.1	Mehrsystemstromrichter für AC 15 kV und 25 kV	1022
11.1.4.2	Mehrsystemstromrichter für AC und DC 750 V / 1500 V	1022
11.1.4.3	Mehrsystemstromrichter für AC und DC 3000 V	1022
11.1.4.4	Mehrsystemstromrichter für AC, DC 3000 V und DC 1500 V . .	1027
11.1.5	Dieselelektrische Systeme	1029
11.1.6	Umrichtertechnik	1031
11.1.6.1	Leistungshalbleiter in der Traktion	1031
11.2	Three-Phase Active Filters for Power Conditioning <i>Prof. Dr. H. Akagi, Tokyo Institute of Technology, Japan</i>	1032
11.2.1	Introduction	1032
11.2.2	Voltage Harmonics in Power Systems	1033

11.2.2.1	Harmonic-producing loads	1033
11.2.2.2	Voltage THD and 5th-harmonic voltages	1034
11.2.3	Traditional Passive Filters	1035
11.2.3.1	Circuit configurations	1035
11.2.3.2	Consideration to installation	1036
11.2.4	Pure Active Filters for Power Conditioning	1037
11.2.4.1	Circuit configurations of shunt and series active filters	1037
11.2.4.2	Three-phase voltage-source and current-source PWM converters	1038
11.2.4.3	Three-phase pure active filters	1040
11.2.4.4	Trends in pure active filters	1041
11.2.5	Series Active Filters	1042
11.2.5.1	System configuration	1043
11.2.5.2	Operating principle	1043
11.2.5.3	Design and effect of switching-ripple filters	1044
11.2.5.4	Experimental results - Series Active Filters	1046
11.2.6	Hybrid Active Filters for Harmonic-Current Filtering	1046
11.2.6.1	Circuit configurations	1046
11.2.6.2	Experimental waveforms	1048
11.2.7	Low-Voltage Transformerless Hybrid Active Filters	1050
11.2.7.1	The 480 V hybrid active filter	1051
11.2.7.2	The 480 V pure active filter	1053
11.2.7.3	Design of the 480 V hybrid active filter	1055
11.2.7.4	Comparisons between the 480 V hybrid and pure filters	1056
11.2.8	The 400 V Hybrid Active Filter	1059
11.2.8.1	System configuration	1059
11.2.8.2	Start-up procedure	1060
11.2.8.3	Steady-state performance of the passive filter used alone	1060
11.2.8.4	Steady-state performance of the hybrid filter	1060
11.2.8.5	Transient-state performance of the hybrid filter	1062
11.2.9	Medium-Voltage Transformerless Hybrid Active Filters	1063
11.2.10	Practical Applications of Active Filters	1064
11.2.10.1	Application to harmonic-current filtering	1064
11.2.10.2	Application to voltage-flicker reduction	1064
11.2.11	Conclusions	1068
11.3	Elektronische Energiewandler für photovoltaische Solarenergieanlagen	1069
	<i>Prof. Dr. P. Zacharias, Kassel</i>	
11.3.1	Einleitung	1069
11.3.2	Grundsätzliche Zielstellungen und Anforderungen	1069
11.3.3	Gestaltung der Energiewandlungskette DC/AC für PV-Systeme	1074
11.3.4	Situation bei den Halbleiterschaltern	1077
11.3.5	MPP-Tracking	1080
11.3.6	Schaltungstopologien für netzgekoppelte Photovoltaik-Wechselrichter	1082

11.3.6.1	Konzepte mit isoliertem Photovoltaikgenerator	1082
11.3.6.2	Transformatorlose Wechselrichter	1086
11.3.7	Weitere Entwicklung	1089
11.3.8	Erwartete Trends und Schlußfolgerungen	1092
11.4	Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen	1093
	<i>F. Bernitz, Fa. Osram, München</i>	
11.4.1	Einführung	1093
11.4.2	Lichterzeugung und Gliederung wichtiger Lichtquellen	1094
11.4.3	Grundlagen zum Betrieb von Entladungslampen	1103
11.4.4	Konventionelle Betriebsgeräte (Vorschaltgeräte) für Entladungs- lampen	1104
11.4.5	Betriebsgeräte für Niederdruckentladungslampen	1107
11.4.5.1	KVG für Niederdruckentladungslampen	1107
11.4.5.2	EVG für Niederdruckgasentladungslampen	1109
11.4.5.3	Vor- und Nachteile von EVG und KVG	1119
11.4.5.4	Konventionelle Betriebsgeräte für Hochdruck-Entladungslampen	1120
11.4.6	Elektronische Betriebsgeräte für Entladungslampen	1121
11.4.7	Elektronische Transformatoren für Niedervolt-Halogenglühlampen	1149
11.5	Akustische Grundlagen zur Geräuschmessung	1152
	<i>F. Witzani, Fa. Osram, München</i>	
11.5.1	Praktisches Messverfahren zur Bestimmung der akustischen Schalleistung	1157
11.5.2	Ermittlung der Schalleistung aus dem mittleren Schalldruck in der Halbkugel	1159
11.5.3	Grundlegende Mechaniken der Schallerzeugung in elektrischen Komponenten	1159
11.5.4	Praktische Methode zur Schalleistungsmessung an elektrischen Komponenten	1163
11.5.5	Umsetzung einer Geräuschreduzierung mit messtechnischer Aus- wertung	1167
11.5.6	Schlussfolgerung	1171
12	Simulation von leistungselektronischen Schaltungen	1172
	Variablenübersicht	1180
	Literaturverzeichnis	1191
	Allgemeine Literatur (Bücher)	1191
	Netzgeführte Stromrichter	1196
	Direktumrichter	1201
	Matrixkonverter	1204
	Untersynchrone Kaskade – USK	1212
	Stromrichtermotor	1214

I–Umrichter	1217
Gleichspannungswandler	1223
Leistungsfaktor–Korrektur	1225
Entlastungsschaltungen	1226
U–Umrichter	1231
Übermodulation – Raumzeigermodulation	1242
Dreipunkt–Wechselrichter	1243
Zusatzbeanspruchungen der Drehfeldmaschine	1247
Resonant schaltentlastete Wandler	1250
Spannungsstabilisierung	1256
Aktive Filter	1260
FACTS	1265
Traktions–Antriebe	1267
Traktions–Antriebe	1275
Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen	1278
Simulation von leistungselektronischen Schaltungen	1280
Stichwortverzeichnis	1284