

Dierk Schröder

Elektrische Antriebe 4

Leistungselektronische Schaltungen

Mit 602 Abbildungen



Springer

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)	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	50
2.3	Blindleistung und Leistungsfaktor	53
2.3.1	Ohmsche Last	53
2.3.2	Ohmsch-induktive Last	56
2.4	Transformator-Auslegung	60
2.4.1	Gleichstrom-Vormagnetisierung	60
2.4.1.1	M2-Schaltung	60
2.4.1.2	M3-Schaltung	62
2.4.2	Transformator-Bauleistung	66
2.5	Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3)	71
2.5.1	M3-Schaltung mit Netztrafo in Dy-Schaltung	71
2.5.2	M3-Schaltung mit Netztrafo in Yz-Schaltung	78

2.6	Brückenschaltungen	80
2.6.1	Zweipuls-Brückenschaltung (B2)	81
2.6.2	Sechspuls-Brückenschaltung (B6)	84
2.6.3	Gegenüberstellung von Mittelpunkt- und Brückenschaltungen	89
2.7	Höherpulsige Schaltungen	90
2.7.1	Sechspuls-Mittelpunktschaltung (M6)	90
2.7.2	Zwölfpuls-Brückenschaltung	91
2.7.3	Zwölfpuls-Saugdrosselschaltung	93
2.8	Umkehrstromrichter	96
2.8.1	Kreisstromfreie Gegenparallelschaltung	97
2.8.2	Kreisstrombehaftete Kreuzschaltung	99
2.8.3	H-Schaltung	103
2.9	Blindleistungssparende Schaltungen	108
2.9.1	Schaltungen mit Freilaufdiode	110
2.9.2	Halbgesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6H)	115
2.9.3	Zu- und Gegenschaltung von Teilstromrichtern	121
2.9.4	B6-Schaltung mit Hilfsthystoren	126
2.9.5	Halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltungen (B2H)	130
2.9.6	Folgesteuerung von Teilstromrichtern	133
2.9.7	Löschbare unsymmetrische Brückenschaltungen	139
2.9.7.1	Sektorsteuerung	139
2.9.7.2	Löschbare unsymmetrische Brückenschaltung (LUB)	141
3	Direktumrichter	144
3.1	Trapezumrichter	145
3.1.1	Einphasiger Trapezumrichter	145
3.1.2	Mehrphasiger Trapezumrichter	146
3.1.3	Frequenzelastischer Trapezumrichter	148
3.2	Steuerumrichter	149
3.3	Schaltungsvarianten des Direktumrichters	152
3.3.1	Wahl der Umkehrstromrichter	152
3.3.2	Schaltung der Last	152
3.3.3	Schaltungsvarianten des Umrichters	155
3.3.4	Matrix-Umrichter	161
3.4	Frequenzbeschränkung beim Direktumrichter	163
3.5	Auslegungskriterien	176
3.6	Regelung der direktumrichter-gespeisten Synchronmaschine	177
3.6.1	Stationäres Flußmodell	180
3.6.2	Dynamisches Flußmodell	183
3.6.3	Stromregelkreise	186
3.6.4	Trapezbetrieb	187
3.6.5	Synchronmaschine	187

4	Untersynchrone Stromrichtererkaskade (USK)	189
4.1	Aufbau und Funktion	189
4.2	Quasistationäre Regelung der untersynchronen Kaskade	204
4.3	Die USK und Netzzrückwirkungen	210
4.4	Auslegung der untersynchronen Kaskade	213
4.4.1	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	213
4.4.2	Anlaßwiderstand	217
4.4.3	Gleichrichterbrücke	222
4.4.4	Wechselrichterbrücke	224
4.4.5	Zwischenkreisdrossel	229
4.4.6	Blindleistungskompensation	231
4.4.7	Schaltspannungsschutz	232
4.4.8	Vorfluten der Dioden	233
4.5	Sonderausführungen	235
4.5.1	Umschaltbare Kaskade	235
4.5.2	Zwölfpulsige Ausführung	237
4.5.3	Schaltungen bei Netzunterbrechungen und Netzs Umschaltungen	239
4.6	Zusammenfassung	239
5	Stromrichtermotor	241
5.1	Prinzipielle Funktion	241
5.1.1	Drehmomentverlauf	247
5.1.2	Einfluß der Zwischenkreisdrossel	250
5.1.3	Erregung der Synchronmaschine	252
5.2	Steuerung und Auslegung	253
5.2.1	Lastgeführte Kommutierung	254
5.2.2	Auslegung des Systems	258
5.2.3	Schonzeitregelung der Thyristoren	263
5.3	Regelung des Stromrichtermotors	264
6	Selbstgeführte Wechselrichter mit eingprägtem Strom (I-Umrichter)	268
6.1	Prinzipielles Systemverhalten	268
6.2	Kommutierung des selbstgeführten Wechselrichters	270
6.3	Auslegungsgang beim I-Umrichter mit Phasenfolgelöschung	283
6.3.1	Kritische Betriebszustände	283
6.3.2	Beanspruchung der Umrichterelemente	287
6.3.2.1	Kommutierungs-Kondensator	287
6.3.2.2	Thyristoren	289
6.3.2.3	Dioden	291
6.3.2.4	Kommutierungsdrosseln, Stufendrosseln	291
6.3.2.5	Entlastungsschaltungen (TSE-Beschaltungen)	293
6.3.2.6	Umrichter mit Zusatzschaltung	296

6.3.3	Auslegung der Einspeisung	297
6.3.3.1	Netzgeführter Stromrichter	297
6.3.3.2	Zwischenkreisdrossel	299
6.3.4	Auslegung der Asynchronmaschine	306
6.3.4.1	Betrieb mit Normmotoren	306
6.3.4.2	Stern- bzw. Dreieckschaltung der Maschine	309
6.3.4.3	Kleiner Stromhub	310
6.3.4.4	Beanspruchung der Motorisolation	311
6.3.5	Anwendungsbeispiele	312
6.4	Steuer- und Regelverfahren	315
6.5	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter	318
6.5.1	I-Umrichter mit abschaltbaren Bauelementen	318
6.5.2	Schaltzustände im I-Wechselrichter mit abschaltbaren Bauelementen	323
6.5.3	Schaltentlastung für die GTOs	325
6.5.4	Kommutierungsvorgang	326
6.6	Abschließende Bemerkungen	331
7	Gleichspannungswandler (Gleichstromsteller)	333
7.1	Prinzip des Gleichstromstellers (Tiefsetzsteller)	334
7.2	Gleichstromsteller mit nicht abschaltbaren Bauelementen	336
7.2.1	Gleichstromsteller-Grundschialtung (Träger-Schialtung)	336
7.2.2	Sperrspannungsfreie Gleichstromsteller-Schialtung	342
7.2.3	Weitere Schaltungs-Abwandlungen mit Löschkreis	350
7.3	Gleichstromsteller mit abschaltbaren Bauelementen	354
7.3.1	Gleichstromsteller-Grundschialtung mit GTO	355
7.3.2	Gleichstromsteller mit GTO und RCD-Beschaltung	357
7.3.3	Schialtung mit zusätzlichem Spannungsbegrenzer	362
7.3.4	Verlustfreie Entlastungsschaltungen nach Boehringer	366
7.3.4.1	Verlustfreie Entlastungsschialtung (1) nach Boehringer	368
7.3.4.2	Verlustfreie Ausschalt-Entlastung (2) nach Boehringer	372
7.3.4.3	Verlustfreie Entlastungsschialtung (3) nach Boehringer	375
7.3.5	Verlustfreie Entlastungsschialtung nach Marquardt	381
7.3.6	Zusammenfassung Entlastungsschaltungen	386
7.4	Grundlegende Steuerung und Regelung von Gleichstromstellern	387
7.4.1	Pulsweitensteuerung	388
7.4.2	Pulsfolgesteuerung	389
7.4.3	Zweipunktregelung des Gleichstromstellers	391
7.5	Gleichstromsteller für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb	392
7.5.1	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb	392
7.5.2	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb	394
7.5.3	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerstromumkehr	397
7.5.4	Zwei-Quadrant-Betrieb mit Ankerspannungsumkehr	398
7.5.5	Vier-Quadrant-Betrieb	402

7.6	Leistungsfaktor-Korrektur	405
7.7	Weitere Abwandlungen der Gleichstromsteller-Schaltungen . . .	415
8	Selbstgeführte Wechselrichter mit eingepprägter Spannung (U-Umrichter)	416
8.1	Einführung	416
8.2	Mehrphasige Wechselrichter mit eingepprägter Spannung	417
8.2.1	Grundfrequenztaktung und Drehspannungssystem	417
8.2.2	Spannungssteuerung	422
8.2.3	Kommutierungsschaltungen	424
8.3	Pulsverfahren, Pulsweitenmodulation	426
8.3.1	Randbedingungen	426
8.3.2	Zweipunktregelung	426
8.3.3	Pulsweitenmodulation	428
8.3.4	Unterschwingungsverfahren	431
8.3.5	Optimierte Pulsverfahren	447
8.3.6	Pulsweitenmodulation und Übersteuerung	450
8.4	U-Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung	454
8.4.1	U-Umrichter mit Gleichstromsteller	456
8.4.1.1	Ungesteuerte netzseitige Diodenbrücke	456
8.4.1.2	Gleichstromsteller	456
8.4.1.3	Wechselrichter	457
8.4.2	Kommutierung des Wechselrichters mit Summenlöschung	461
8.4.3	Netzgeführter Stromrichter als Einspeise-Stellglied	464
8.5	Dreipunkt-Wechselrichter	465
8.5.1	Prinzipielle Funktion	465
8.5.2	Pulsweitenmodulation	471
8.5.3	Nullpunkt-Stabilisierung	478
8.5.4	Spannungsbeanspruchung und Leistung	479
8.6	Auslegung eines Drehstromantriebs mit Pulswechselrichter . . .	480
8.6.1	Bemessung der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine	480
8.6.2	Dimensionierung der Pulswechselrichter	482
8.6.3	Pulsationsmomente	484
8.6.4	Gleichspannungs-Zwischenkreis	484
8.6.5	Eingangsschaltungen und Bremsbetrieb	486
8.6.6	Anwendungsbereiche der Pulswechselrichter	488
8.7	Selbstgeführte Thyristor-Wechselrichter mit Phasenlöschung . .	489
8.7.1	Schaltung und Arbeitsweise	490
8.7.2	Dimensionierung der Schaltung (Übersicht)	496
8.7.3	Grundgleichungen der Kommutierung	498
8.7.4	Kommutierungsbedingung	500
8.7.5	Thermische Belastung der Lastthyristoren	502
8.7.5.1	Schalt- und Kommutierungsstromverluste	502
8.7.5.2	Laststromverluste (Durchlaßverluste)	503

8.7.5.3	Gesamte Verlustleistung in den Lastthyristoren	507
8.7.6	Bestimmung der Kommutierungselemente	508
8.7.7	Kriterien zur Auswahl der Kommutierungselemente	508
8.8	Beschaltung von Leistungshalbleitern	512
8.8.1	RCD-Schutzbeschaltung mit Überlaufkondensator	512
8.8.1.1	Einschaltvorgang	514
8.8.1.2	Ausschalten großer Lastströme	515
8.8.1.3	Ausschalten kleiner Lastströme	517
8.8.2	Unsymmetrische Beschaltung	519
8.8.2.1	Einschaltvorgänge	519
8.8.2.2	Ausschalten großer positiver Lastströme	522
8.8.2.3	Ausschalten großer negativer Lastströme	524
8.8.2.4	Ausschalten kleiner Lastströme	525
8.8.3	Symmetrische Schutzbeschaltung	527
8.8.3.1	Einschaltvorgang	527
8.8.3.2	Ausschalten großer Lastströme	529
8.8.3.3	Ausschalten kleiner Lastströme	530
8.8.4	Vergleich der Schutzbeschaltungen	532
8.8.5	Abschließende Hinweise	533
8.9	Auslegungsbeispiel für einen GTO-U-Wechselrichter	536
8.9.1	Einführung	536
8.9.2	Orientierende Festlegung der Zwischenkreisspannung	537
8.9.3	Weiterführende Überlegungen zur Bestimmung der Sperrspannung der Halbleiter	541
8.9.4	Schutzkonzept eines U-Umrichters	542
8.9.5	Orientierende Festlegung des abzuschaltenden Stroms	543
8.9.6	Weiterführende Überlegungen zum abschaltbaren Strom der GTOs und zur Beschaltung	544
8.9.7	Quervergleich der bisherigen Ergebnisse	548
8.9.8	Auslegung des Zwischenkreiskondensators	549
8.9.9	Sicherheitsfaktoren	550
8.9.10	Verluste, Schaltfrequenzen, Kühlung	551
8.9.11	Zusammenfassung	562
9	Resonant schaltentlastete Wandler	563
9.1	Die Zellenstruktur der Gleichspannungswandler	566
9.2	Resonante Schaltentlastung: Grundüberlegungen	572
9.2.1	Einführung	572
9.2.2	Nullspannungsschalter (ZVS)	573
9.2.3	Nullstromschalter (ZCS)	577
9.2.4	Quasi-resonante und multi-resonante Wandler — Eine Gegenüberstellung	579
9.3	Quasi-resonante Zellwandler	581
9.3.1	Die quasi-resonanten Wandlerzellen in der Phasenebene	581

9.3.2	Quasi-Resonant Zero-Voltage-Switching (QR ZVS)	583
9.3.3	Quasi-Resonant Zero-Current-Switching (QR ZCS)	603
9.3.4	Die Gleichungen aller quasi-resonanten Zellen	616
9.3.5	Bewertung der quasi-resonanten Zellen	617
9.4	Multi-resonante Zellwandler	627
9.4.1	Die multi-resonante ZVS-Wandlerzelle im Phasenraum	628
9.4.2	Die vier Betriebsmodi	634
9.5	Resonante Brückenschaltungen	656
9.5.1	Serien-Parallel-Resonanz-Brückenschaltung	661
9.5.2	Serien-Parallel-Resonanz-Brückenschaltung mit konstanter Schaltfrequenz	662
9.5.3	Analyse resonanter Schaltungen	663
9.5.4	Serien-Resonanz-Wandler	666
9.5.5	Serien-Parallel-Resonanz-Wandler	671
9.5.6	Zusammenfassung resonante Gleichspannungswandler	677
9.6	Transient-resonante Gleichspannungswandler	677
9.6.1	Einführung	677
9.6.2	Die transient-resonanten Schalter	678
9.6.3	Transient-resonante Zellwandler	681
9.6.4	Transient-resonante Brückenwandler	695
9.7	Dreiphasige resonante Wechselrichter	712
9.7.1	Einführung	712
9.7.2	Der ARCPI (Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter)	724
9.7.3	Der NLRPI (Non Linear Resonant Pole Inverter)	730
9.7.4	Der MACRDCI (Modified Active Clamped Resonant DC Link Inverter)	736
9.7.5	Der PRDCLI (Parallel Resonant DC Link Inverter)	740
9.7.6	Zusammenfassung resonanter Dreiphasen-Wechselrichter	743
10	Leistungselektronische Blindleistungs-Kompensation	745
10.1	Einführung: Verbraucher-Kompensation in Industrienetzen	745
10.2	Spannungsstabilisierung in Übertragungsnetzen	752
10.3	Blindleistungsquellen	758
10.3.1	Synchronmaschinen	758
10.3.2	Parallelkondensatoren	759
10.3.3	Serienkondensatoren	759
10.4	Dynamische Blindleistungsquellen	760
10.4.1	Sättigbare Drosselspulen	760
10.4.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder	767
10.4.3	Thyristor-geschaltete Kondensatoren	767
10.4.4	Thyristor-gesteuerte Drosselspule (TCR)	769
10.5	Herkömmliche Steuer- und Regelverfahren	770
10.6	Weiterführende Überlegungen — Stellglieder	779
10.7	Aktive Filter	782

10.8	Flexible AC Transmission Systems (FACTS)	785
10.9	Weitere Überlegungen — Prädiktive Signalverarbeitung	788
11	Sondergebiete der Leistungselektronik	797
11.1	Nahverkehrs-Antriebe	799
11.2	Fernverkehrs-Antriebe	807
11.3	Steuerungs- und Regelungs-Anforderungen bei Fahrtrieben	816
11.4	Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen	822
11.4.1	Einführung	822
11.4.2	Lichterzeugung und Gliederung wichtiger Lichtquellen	823
11.4.3	Grundlagen zum Betrieb von Entladungslampen	831
11.4.4	Konventionelle Betriebsgeräte (Vorschaltgeräte) für Entladungslampen	834
11.4.5	Elektronische Betriebsgeräte für Entladungslampen	839
11.4.6	Elektronische Transformatoren für Niedervolt-Halogen- glühlampen	868
12	Simulation von leistungselektronischen Schaltungen	871
	Variablenübersicht	878
	Literaturverzeichnis	889
	Allgemeine Literatur (Bücher)	889
	Netzgeführte Stromrichter	893
	Direktumrichter	898
	Untersynchrone Kaskade	901
	Stromrichtermotor	903
	I-Umrichter	906
	Gleichspannungswandler	910
	Leistungsfaktor-Korrektur	912
	Entlastungsschaltungen	912
	U-Umrichter	916
	Dreipunkt-Wechselrichter	925
	Resonant schaltentlastete Wandler	927
	Spannungsstabilisierung	932
	Aktive Filter	936
	FACTS	937
	Traktions-Antriebe	939
	Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen	946
	Simulation von leistungselektronischen Schaltungen	948
	Sachverzeichnis	951