



Kamprath-Reihe

Prof. Prof. h. c. Dr.-Ing. Peter F. Brosch

# Moderne Stromrichterantriebe

Leistungselektronik und Maschinen,  
Arbeitsweise drehzahlveränderbarer Antriebe  
mit Stromrichtern und Antriebsvernetzung

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	5
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	13
1.1 Stand der Antriebstechnik . . . . .	13
1.2 Besondere Eigenschaften . . . . .	14
1.3 Qual der Auswahl . . . . .	15
1.4 Komponenten . . . . .	16
1.5 Direkt und ohne Mechanik – dezentral installiert . . . . .	17
1.6 Gleichstrom- oder Drehstromlösung? . . . . .	17
<b>2 Das moderne Antriebspaket</b> . . . . .	19
2.1 Bestimmungsgrößen bei der Auswahl . . . . .	19
2.2 Mikrorechner sorgen für Wirtschaftlichkeit . . . . .	20
2.3 Vorteile der veränderbaren Drehzahl . . . . .	22
2.4 Antriebsbeispiele . . . . .	22
2.5 Drehzahlveränderbare Antriebe im Vergleich . . . . .	23
<b>3 Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik</b> . . . . .	27
3.1 Grundsystem des Antriebs . . . . .	27
3.2 Physikalische Gesetze . . . . .	28
3.3 Antriebsmomente elektrischer Maschinen . . . . .	30
3.4 Grundtypen der Lastkennlinien (Arbeitsmaschinen) . . . . .	33
3.5 Stabiler Betriebspunkt (Arbeitspunkt des Antriebs) . . . . .	33
3.6 Erwärmung . . . . .	36
3.7 Kühlung . . . . .	39
3.8 Zeitkonstanten . . . . .	40
3.9 Betriebsarten . . . . .	41
3.10 Äquivalente Belastung (mittlere Belastung) . . . . .	46
3.11 Mechanische Übergangsvorgänge . . . . .	47
3.12 Energieumsatz . . . . .	50
3.13 Wachstumsgesetze . . . . .	53
<b>4 Stromrichter-Komponenten</b> . . . . .	55
4.1 Versorgung über Stromrichter . . . . .	55
4.2 Ventile: elektronische Leistungsschalter . . . . .	56
4.3 Grundlagen der Halbleitertechnik . . . . .	59
4.4 Schutz von Halbleiterschaltern . . . . .	65
4.5 Signalelektronik . . . . .	70
<b>5 Elektrische Maschinen</b> . . . . .	77
5.1 Allgemeine Grundlagen . . . . .	77
5.2 Erzeugung einer kontinuierlichen Drehbewegung . . . . .	78
5.3 Bauformen . . . . .	81
5.4 Schutzarten . . . . .	81
5.5 Leistungsschild . . . . .	84
5.6 Lager und Schmierung . . . . .	84
5.7 Dauermagnetwerkstoffe . . . . .	87
5.8 Bürstenstandzeiten . . . . .	88
5.9 Linearantriebe . . . . .	88
5.10 Transversalflußmotor . . . . .	90
<b>6 Stromrichterantriebe mit Stromwendermaschinen</b> . . . . .	91
6.1 Gleichstromantriebe mit Stromrichtern . . . . .	91
6.1.1 Gleichstrommaschine . . . . .	91
6.1.1.1 Aufbau . . . . .	91

6.1.1.2	Betriebsverhalten der fremderregten Gleichstrom-Maschine (fGM)	94
6.1.1.3	Besonderheiten	95
6.1.1.4	Kennlinien	97
6.2	Netzgeführte Stromrichter	99
6.2.1	Übersicht	99
6.2.2	Schaltungen netzgeführter Stromrichter	102
6.2.3	Ausgangsspannung mit ungesteuerten Ventilen	104
6.2.4	Steuerung der Ausgangsspannung mit steuerbaren Ventilen	107
6.2.5	Steuerkennlinie	108
6.2.6	Kommutierung	110
6.2.7	Betriebskennlinien	113
6.2.8	Arbeitspunkt des Antriebs	115
6.2.9	Glättungsmittel	116
6.2.10	Netzurückwirkungen	120
6.2.11	Regelung des netzgeführten Stromrichters	126
6.2.12	Betrieb in den 4 Quadranten	132
6.2.13	4-Q-Diagramm	136
6.2.14	Umstuvorgang	137
6.2.15	Umkehrstromrichter mit Kreisstrom und Brückenmodulation	139
6.2.16	Stromrichterbetrieb im Feldschwächbereich	140
6.3	Gleichstromsteller (Chopper)	140
6.3.1	Tiefsetzsteller	140
6.3.2	1-Quadranten-Betrieb (Tiefsetzsteller)	142
6.3.3	4-Quadranten-Betrieb	143
6.3.4	Umsetzung der Bremsenergie	145
6.3.5	Regelung beim Steller	146
6.3.6	Netzurückwirkungen	146
6.3.7	Übersetzungsverhältnis beim Gleichstrom-Tiefsetzsteller	148
6.4	Reihenschlußmotor mit Wechselstromsteller	149
6.4.1	Reihenschlußmotor	149
6.4.1.1	Aufbau	149
6.4.1.2	Betriebsverhalten	150
6.4.1.3	Phasenanschnittsteuerung des Reihenschlußmotors	151
6.5	Kleinmaschinen	152
6.6	Pulsbetrieb der Reihenschlußmaschine	153
7	<b>Stromrichterantriebe mit Drehfeldmaschinen</b>	157
7.1	Übersicht	157
7.1.1	Entwicklung der AC-Antriebe	158
7.1.1.1	AC-Bewegungsantriebe	158
7.1.1.2	AC-Kompaktantriebe als dezentrale Antriebe	160
7.1.1.3	AC-Positionierantriebe	161
7.1.1.4	Drehende und lineare AC-Direktantriebe	161
7.2	Drehfeldmaschinen	163
7.2.1	Aufbau der Drehstrommaschinen in der Übersicht	163
7.2.2	Drehstrom-Asynchronmaschine	163
7.2.2.1	Aufbau	163
7.2.2.2	Allgemeiner Betrieb	165
7.2.2.3	50-Hz-Betrieb	166
7.2.2.4	Betrieb mit variabler Speisefrequenz	168
7.2.2.5	Asynchron-Servomaschinen	170
7.2.2.6	Linearantrieb	170
7.2.3	Drehstrom-Synchronmaschine	170
7.2.3.1	Aufbau und 50-Hz-Betrieb	170
7.2.3.2	Betrieb mit variabler Frequenz	170
7.2.3.3	Synchron-Linearantriebe	172
7.2.4	Reluktanzmaschine	172
7.2.4.1	Aufbau und Betrieb mit 50 Hz	172
7.2.4.2	Betrieb mit variabler Frequenz	172

7.2.5	Elektronisch kommutierte Maschine (EKM, AC-Servo) . . . . .	172
7.2.5.1	Aufbau . . . . .	172
7.2.5.2	Betrieb mit variabler Drehzahl . . . . .	175
7.2.5.3	EK-Servomaschinen . . . . .	175
7.2.5.4	EK-Linearantriebe . . . . .	175
7.2.6	Geschaltete Reluktanzmaschine (gRM) . . . . .	176
7.2.6.1	Aufbau und Betrieb . . . . .	176
7.2.6.2	Einsatz . . . . .	177
7.2.7	Schrittmotoren . . . . .	177
7.2.7.1	Aufbau . . . . .	177
7.2.7.2	Positionierbetrieb . . . . .	177
7.3	Umrichter mit <i>U</i> - und <i>I</i> -Zwischenkreis . . . . .	179
7.3.1	Übersicht: Maschinen und Umrichter . . . . .	179
7.3.2	Elektronische Drehspannungserzeugung . . . . .	179
7.3.2.1	Umrichterarten . . . . .	179
7.3.2.2	Aufbau der Zwischenkreisumrichter . . . . .	181
7.3.3	Umrichter mit Spannungszwischenkreis ( <i>U</i> -Umrichter) . . . . .	182
7.3.3.1	Drehspannungserzeugung . . . . .	182
7.3.3.2	Drehspannungen . . . . .	183
7.3.3.3	Spannungsraumzeiger . . . . .	183
7.3.3.4	Drehfeld . . . . .	185
7.3.3.5	Realisierung der <i>U/f</i> -Kennlinie beim <i>U</i> -Umrichter . . . . .	185
7.3.4	Umrichter mit Stromzwischenkreis ( <i>I</i> -Umrichter) . . . . .	188
7.3.4.1	Drehfelderzeugung beim <i>I</i> -Umrichter . . . . .	188
7.3.4.2	Strompulsen . . . . .	189
7.3.4.3	<i>U/f</i> -Kennlinie beim <i>I</i> -Umrichter . . . . .	191
7.3.4.4	Vorteile der «Sinus»-Pulsung . . . . .	193
7.3.5	Modulationsverfahren bei <i>U</i> -Umrichtern . . . . .	193
7.3.5.1	Allgemeines Ziel . . . . .	193
7.3.5.2	Anforderungen an die Ventilsteuerung . . . . .	194
7.3.5.3	Blockbetrieb . . . . .	195
7.3.5.4	Unterschwingungsverfahren (PWM, Sinus- $\Delta$ -Modulation) . . . . .	195
7.3.5.5	Verwandte Modulationsverfahren (Voltage-Vector-Control, Überlagerungsverfahren) . . . . .	197
7.3.5.6	Pulserzeugung in der Steuerung . . . . .	199
7.3.5.7	Raum-Zeiger-Modulation (RZM, SZM) . . . . .	200
7.3.5.8	Hysterese-Strom-Modulation (HSM, Pulsen mit Stromvorgabe, Toleranzbandregelung) . . . . .	203
7.3.5.9	Steuerbausteine und Grenzen . . . . .	204
7.3.6	Steuerteil und Software der Umrichter . . . . .	204
7.3.6.1	Software . . . . .	204
7.3.6.2	Schnittstellen, Parameter und Funktionen . . . . .	207
7.3.6.3	Wichtige Parameter und Auswirkungen . . . . .	209
7.3.7	Drehzahl- und Drehmomentregelung (Verfahren) . . . . .	216
7.3.7.1	Allgemeines . . . . .	216
7.3.7.2	<i>U/f</i> -Kennliniensteuerung bzw. Frequenzregelung . . . . .	217
7.3.7.3	Mehrmaschinenantriebe . . . . .	217
7.3.7.4	Entwicklung der Drehmomentregelung . . . . .	217
7.3.7.5	Feldorientierte Regelung (FOR, «Vektor»-Regelung) . . . . .	218
7.3.7.6	Direkte Selbstregelung (DSR) . . . . .	225
7.3.7.7	FOR-Regelung beim <i>I</i> -Umrichter . . . . .	227
7.3.7.8	Gegenüberstellung der Regelverfahren . . . . .	228
7.4	Sonderfragen bei Umrichterantrieben . . . . .	230
7.4.1	Erwärmung bei Umrichterbetrieb . . . . .	230
7.4.2	Netzurückwirkungen . . . . .	230
7.4.2.1	Allgemeiner Vergleich der Stromrichter . . . . .	231
7.4.2.2	<i>U</i> -Umrichter . . . . .	231
7.4.2.3	<i>I</i> -Umrichter . . . . .	234

7.4.3	Bremsbetrieb	236
7.4.3.1	Allgemeines	236
7.4.3.2	U-Umrichter	236
7.4.3.3	I-Umrichter – nur Nutzbremsen	244
7.4.4	Pendelmomente	245
7.4.5	Geräusche	246
7.4.6	Vergleich U-Umrichter gegen I-Umrichter	247
7.5	Sondereinsatz von Umrichterantrieben	249
7.5.1	Energieeinsparung	249
7.5.2	Hochwirkungsgradmotoren	250
7.5.3	Betrieb am IT-Netz – keine Unterbrechung	250
7.5.4	Gleichlauf – elektronisches Getriebe, Kurvenscheibe usw.	253
7.5.5	Asynchron-Servomaschinen	253
7.6	Umrichter und elektronisch kommutierte Maschine	255
7.6.1	Entwicklung und Einsatz	255
7.6.2	Arbeitsweise der EK-Maschine	255
7.6.2.1	Blockstrom	256
7.6.2.2	Sinusstrom	256
7.6.2.3	Vergleich: Blockbetrieb und Sinusbestromung	257
7.6.3	Gebersysteme	257
7.6.4	Kennlinien der EK-Maschine	262
7.6.5	Stromrichtereinheit und Regelung	262
7.7	Umrichter und «geschaltete Reluktanzmaschine» (gRM)	262
7.8	Drehstromsteller und Drehstrom-Asynchronmaschine	265
7.8.1	Arbeitsweise und Einsatzmöglichkeiten	265
7.8.2	Steller als Sanftanlaufgerät	266
7.8.3	Steller als Sanftauslaufgerät	267
7.8.4	Elektronische KUSA-Schaltung	267
7.8.5	Betrieb mit variabler Drehzahl	267
7.8.5.1	Gesteuerter Betrieb	267
7.8.5.2	Geregelter Betrieb mit Spannungsdosierung	269
7.8.6	Grenzen des Betriebs	269
7.8.7	Verluste bei Belastung	271
7.8.8	Argumente für den Einsatz	272
7.8.9	Energiesparfunktion	272
7.9	Stromrichterantriebe mit Schleifringläufern	272
7.9.1	Untersynchrone Stromrichtererkaskade (USK)	274
7.9.1.1	Arbeitsweise	274
7.9.1.2	Bemessung	274
7.9.2	Doppeltgespeister Schleifringläufer	275
7.10	Stromrichter und Schrittmotoren	275
7.10.1	Positionieren mit Schrittmotoren	275
7.10.2	Betrieb und Ansteuerung	276
7.10.2.1	Blockbestromung	277
7.10.2.2	Sinusbestromung	277
7.10.2.3	Kennlinien	282
7.10.2.4	Steuerung	285
7.11	Stromrichter-AC-Direktantriebe	286
7.11.1	Maschine und Mechanik	286
7.11.2	Elektroniksteuerung	286
7.11.3	Direkte Linearantriebe	286
7.11.3.1	Aufbau	286
7.11.3.2	Typische Einsatzgebiete	287
7.11.4	Direkte Drehantriebe	287
7.11.4.1	Aufbau	287
7.11.4.2	Typische Einsatzgebiete	288
7.12	Antriebe im Vergleich	288
7.12.1	Bewegungsantriebe	288
7.12.2	Positionierantriebe	291

7.12.3	Dezentrale Antriebe (Module) . . . . .	293
7.12.3.1	Dezentrale Intelligenz (Submodule) . . . . .	293
7.12.3.2	Subsysteme . . . . .	294
<b>8</b>	<b>Antriebsvernetzung und dezentrale Installation bei Stromrichtern</b> . . . . .	<b>295</b>
8.1	Antriebsvernetzung . . . . .	295
8.1.1	Einleitung . . . . .	295
8.1.2	Produktionsfaktor Information . . . . .	295
8.1.3	Trend . . . . .	297
8.1.3.1	Neue Impulse . . . . .	297
8.1.3.2	Verteilte Intelligenz in Modulen . . . . .	297
8.1.4	Frequenzumrichter als intelligenter Busteilnehmer . . . . .	297
8.1.5	Feldbussysteme . . . . .	298
8.1.5.1	Topologie . . . . .	298
8.1.5.2	Datenaustausch und Protokoll . . . . .	300
8.1.5.3	Industrie-Bussysteme (offene Systeme) . . . . .	300
8.1.5.4	Firmenspezifische Kommunikation . . . . .	300
8.1.6	Bussystem-Nutzergruppen . . . . .	302
8.1.7	Vorteile der Vernetzung . . . . .	302
8.1.8	Vergleich und Entscheidung . . . . .	303
8.2	Dezentrale Installation . . . . .	303
<b>9</b>	<b>Auswahl und Bemessung drehzahlveränderbarer Stromrichterantriebe</b> . . . . .	<b>307</b>
9.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	307
9.2	Netzdrosseln, Netztransformatoren und Filter . . . . .	308
9.2.1	Drosseln . . . . .	308
9.2.2	Netztransformatoren . . . . .	308
9.2.3	Filter . . . . .	308
9.3	Checklisten zur Festlegung der Antriebsdaten . . . . .	309
9.3.1	Netzgeführter Stromrichter und Gleichstrommaschine . . . . .	309
9.3.2	U-Umrichter und Drehstromasynchronmaschine . . . . .	309
9.3.3	Positionierantriebe . . . . .	309
9.4	Maschinendaten . . . . .	312
9.5	Fallbeispiele . . . . .	312
9.5.1	Mechanik . . . . .	312
9.5.2	Gleichstrom . . . . .	313
9.5.3	Drehstrom . . . . .	314
9.5.4	EK-Motor (Positionierantrieb) . . . . .	315
9.5.5	Schrittmotor (Positionierantrieb) . . . . .	318
9.6	Klemmenkennzeichnung . . . . .	320
9.7	DC / AC-Listenpreise . . . . .	321
9.8	Normen und Vorschriften . . . . .	322
<b>10</b>	<b>Messungen an drehzahlveränderbaren Stromrichterantrieben (Stromrichtermeßtechnik)</b> . . . . .	<b>323</b>
10.1	Messungen allgemein . . . . .	323
10.1.1	Besonderheiten . . . . .	323
10.1.2	Aliasing-Effekt . . . . .	324
10.1.3	Geräteanzeige . . . . .	325
10.2	Elektrische Messungen am Antrieb . . . . .	326
10.2.1	Netzgeführte Stromrichter . . . . .	326
10.2.2	Umrichter und Drehstromsteller . . . . .	326
10.2.2.1	Vorbemerkung . . . . .	326
10.2.2.2	Messungen am Umrichter . . . . .	327
10.3	Mechanische Messungen am Antrieb . . . . .	331
10.3.1	Drehzahl und Drehmoment . . . . .	331
10.3.2	Lagerschwingungen . . . . .	332
10.3.3	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) . . . . .	332
10.3.4	Erwärmungsmessungen . . . . .	334
10.4	Simulation . . . . .	334

<b>11</b>	<b>Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)</b> . . . . .	337
11.1	Gesetz zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) . . . . .	337
11.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) . . . . .	337
11.3	Ursache und Ausbreitung der Störungen bei Frequenzumrichtern . . . . .	338
11.4	Störfestigkeit und Entstörung . . . . .	339
11.4.1	Leitungsgebundene Störungen . . . . .	339
11.4.2	Nichtleitungsgebundene Störungen . . . . .	339
11.5	Neubeschaffung . . . . .	339
11.6	Messungen . . . . .	341
11.7	Anschlußhinweise . . . . .	344
	<b>Anhang (Tabellen)</b> . . . . .	345
	<b>Formelzeichen (Auswahl)</b> . . . . .	371
	<b>Abkürzungen und Begriffe (Auswahl)</b> . . . . .	373
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	375
	<b>Inserentenverzeichnis</b> . . . . .	380
	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	381