

# EINFUHRUNG IN DIE THEORIE GEREGLER DREHSTROMANTRIEBE

HANSRUEDIBUHLER

PROFESSOR AN DER EIDG. TECHNISCHEN HOCHSCHULE LAUSANNE

BAND 1  
GRUNDLAGEN



1977

BIRKHÄUSER VERLAG BASEL  
UND STUTTGART

# INHALTSVERZEICHNIS

Band 1

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	17
1.1	<i>Uebersicht</i>	17
1.2	<i>Möglichkeiten zur Drehzahlverstellung bei Synchronmaschinen</i>	19
1.21	Allgemeines	19
1.22	Drehzahländerung durch veränderliche Speisefrequenz	20
1.221	Speisung aus Direktumrichter	20
1.222	Speisung aus Zwischenkreisumrichter	21
1.3	<i>Möglichkeiten zur Drehzahlverstellung bei Asynchronmaschinen</i>	23
1.31	Allgemeines	23
1.32	Drehzahländerung durch Beeinflussung des Schlupfes	24
1.321	Schlupfänderung durch Reduktion der Statorspannung mittels Drehstromsteller	24
1.322	Schlupfänderung durch Erhöhung des Rotorwiderstandes mittels pulsgesteuertem Widerstand	25
1.323	Schlupfänderung durch Zwischenkreisumrichter	27
1.324	Schlupfänderung durch Direktumrichter	28
1.33	Drehzahländerung durch veränderliche Speisefrequenz	30
<b>2</b>	<b>Das statische und dynamische Verhalten der Drehstrommaschinen</b>	32
2.1	<i>Uebersicht</i>	32
2.2	<i>Die Grundlagen zur Behandlung des statischen und dynamischen Verhaltens der Drehstrommaschinen</i>	33
2.21	Allgemeines	33
2.22	Komplexe Raumvektoren des Dreiphasensystems	33
2.221	Definition	33
2.222	Die Spannungsgleichung	35
2.223	Die Koordinatentransformation	36
2.224	Die Transformation der Spannungsgleichung	37
2.225	Der Momentanwert der Leistung	3g
2.226	Der Momentanwert des Drehmomentes	38
2.23	Bezogene Grossen	40
2.231	Allgemeine Grundlagen	40
2.232	Umformung der Spannungsgleichung	41
2.233	Umformung der Flussverkettung	43
2.234	Umformung des Drehmomentes	45
2.3	<i>Die Synchronmaschine</i>	45
2.31	Die Zweiachsentheorie der Synchronmaschine	45
2.311	Schematische Darstellung und Ersatzschaltbild	45

2.312	Umrechnung des Dreiphasensystems auf Längs- und Querachse. . . . .	48
2.313	Die Spannungsgleichungen. . . . .	51
2.314	Die Flussverkettungen. . . . .	54
2.315	Das Drehmoment und die Bewegungsgleichung. . . . .	57
2.316	Zusammenstellung des Gleichungssystems. . . . .	59
2.32	Umformung des Gleichungssystems der Synchronmaschine. . . . .	59
2.321	Allgemeines. . . . .	59
2.322	Die Flussverkettung der Querachse. . . . .	60
2.323	Die Flussverkettung der Längsachse. . . . .	61
2.324	Der Erregerstrom. . . . .	65
2.325	Zusammenstellung des Gleichungssystems. . . . .	65
2.33	Das Strukturdiagramm der Synchronmaschine. . . . .	66
2.331	Allgemeines. . . . .	66
2.332	Das Strukturdiagramm bei Vorgabe der Statorspannung. . . . .	66
2.333	Das Strukturdiagramm bei Vorgabe des Statorstromes. . . . .	71
2.34	Das Verhalten der Synchronmaschine im stationären Betrieb. . . . .	73
2.341	Das Gleichungssystem für den stationären Betrieb. . . . .	73
2.342	Das Zeigerdiagramm der Synchronmaschine. . . . .	73
2.343	Die Kennlinien der Synchronmaschine. . . . .	76
2.344	Die Statorspannung bei veränderlicher Speisefrequenz. . . . .	83
2.4	<i>Die Asynchronmaschine. . . . .</i>	84
2.41	Die komplexe Einachsentheorie der Asynchronmaschine. . . . .	84
2.411	Schematische Darstellung und Ersatzschaltbild. . . . .	84
2.412	Umrechnung des Dreiphasensystems auf das komplexe Einachsensystem. . . . .	88
2.413	Die Spannungsgleichungen. . . . .	91
2.414	Die Flussverkettungen. . . . .	91
2.415	Das Drehmoment und die Bewegungsgleichung. . . . .	92
2.416	Zusammenstellung des Gleichungssystems. . . . .	93
2.42	Umformung des Gleichungssystems der Asynchronmaschine. . . . .	93
2.421	Allgemeines. . . . .	93
2.422	Stator- und Rotorspannungen vorgegeben. . . . .	94
2.423	Statorstrom vorgegeben. . . . .	96
2.424	Rotorstrom vorgegeben. . . . .	97
2.43	Das Strukturdiagramm der Asynchronmaschine. . . . .	98
2.431	Allgemeines. . . . .	98
2.432	Das Strukturdiagramm des Kurzschlussläufermotors bei Vorgabe der Statorspannung. . . . .	99
2.433	Das Strukturdiagramm des Kurzschlussläufermotors bei Vorgabe des Statorstromes. . . . .	103
2.434	Das Strukturdiagramm des Schleifringläufermotors bei Vorgabe der Stator- und Rotorspannung. . . . .	105
2.435	Das Strukturdiagramm des Schleifringläufermotors bei Vorgabe der Statorspannung und des Rotorstromes. . . . .	107
2.44	Das Verhalten der Asynchronmaschine im stationären Betrieb. . . . .	109
2.441	Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine im stationären Betrieb. . . . .	109
2.442	Das Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine als Kurzschlussläufermotor. . . . .	112
2.443	Die Kennlinien des Kurzschlussläufermotors. . . . .	113
2.444	Die Statorspannung des Kurzschlussläufermotors bei veränderlicher Speisefrequenz. . . . .	118

<b>3</b>	<b>Das statische und dynamische Verhalten der Frequenzumrichter</b>	<b>123</b>
3.1	<i>Uebersicht</i>	123
3.2	<i>Der Direktumrichter</i>	124
3.21	Schaltung und Funktionsweise	124
3.211	Prinzipieller Aufbau	124
3.212	Die Steuerung einer Umrichterphase	125
3.213	Die Bildung des Dreiphasensystems	127
3.22	Der Einweg-Stromrichter	128
3.221	Natürliche Kommutierung	128
3.222	Der Mittelwert der Gleichspannung	131
3.223	Bezogene Grossen	133
3.224	Das Ersatzschaltbild des Stromrichters als stetiges System	133
3.225	Die Steuerung des Stromrichters	136
3.226	Die Kennlinien im stationären Betrieb	139
3.23	Der Umkehr-Stromrichter	140
3.231	Das Ersatzschaltbild des Umkehr-Stromrichters als stetiges System	140
3.232	Die Steuerung des Umkehr-Stromrichters	142
3.233	Die Kennlinien des Umkehr-Stromrichters im stationären Betrieb	143
3.24	Der dreiphasige Direktumrichter	144
3.241	Definition der Bezugsgrössen	144
3.242	Einführung komplexer Raumvektoren	144
3.243	Das Ersatzschaltbild des dreiphasigen Direktumrichters als stetiges System	145
3.244	Die Steuerung des dreiphasigen Direktumrichters	146
3.245	Das Strukturdiagramm des dreiphasigen Direktumrichters	150
3.3	<i>Der Zwischenkreisumrichter mit natürlicher Kommutierung</i>	152
3.31	Schaltung und Funktionsweise	152
3.311	Prinzipieller Aufbau	152
3.312	Die Steuerung des Zwischenkreisumrichters	153
3.32	Der maschinengeführte Stromrichter	155
3.321	Maschinengeführte Kommutierung	155
3.322	Der Mittelwert der Gleichspannung	159
3.323	Bezogene Grossen	160
3.324	Das Ersatzschaltbild des maschinengeführten Stromrichters als stetiges System	162
3.325	Die Steuerung des maschinengeführten Stromrichters	164
3.33	Der Zwischenkreisumrichter	169
3.331	Definition der Bezugsgrössen	169
3.332	Das Ersatzschaltbild des Zwischenkreisumrichters als stetiges System	169
3.333	Die Steuerung des Zwischenkreisumrichters	172
3.334	Die Kennlinien des Zwischenkreisumrichters im stationären Betrieb	172
3.335	Einführung komplexer Raumvektoren	173
3.336	Das Strukturdiagramm des Zwischenkreisumrichters	176
3.4	<i>Der Zwischenkreisumrichter mit Zwangskommutierung</i>	178
3.41	Schaltung und Funktionsweise	178
3.411	Prinzipieller Aufbau	178
3.412	Das Prinzip der Zwangskommutierung	••• 179

3.42	Der zwangskommutierte Stromrichter . . . . .	180
3.421	Zwangskommutierung . . . . .	180
3.422	Der Mittelwert der Gleichspannung. . . . .	185 "
3.423	Bezogene Grossen . . . . .	187
3.424	Das Ersatzschaltbild des zwangskommutierten Stromrichters als stetiges System . . . . .	189
3.425	Die Steuerung des zwangskommutierten Stromrichters. . . . .	190
3.43	Der Zwischenkreisumrichter. . . . .	193
3.431	Allgemeines . . . . .	193
3.432	Das Ersatzschaltbild des Zwischenkreisumrichters als stetiges System . . . . .	193
3.433	Das Strukturdiagramm. . . . .	194
3.5	<i>Zwangskommutierter Frequenzumrichter mit Gleichspannungszwischenkreis.</i> . . . .	195
3.51	Schaltung und Funktionsweise. . . . .	195
3.511	Prinzipieller Aufbau . . . . .	195
3.512	Der Dreiphasen-Wechselrichter in Brückenschaltung. . . . .	197
3.513	Der Dreiphasen-Wechselrichter aufgebaut aus drei Einphasen-Wechselrichtern. . . . .	199
3.514	Die Steuerung des Pulswechselrichters. . . . .	202
3.515	Die Rechtecksteuerung . . . . .	204
3.52	Der Wechselrichterzweig mit Einzellöschung . . . . .	206
3.521	Zwangskommutierung . . . . .	206
3.522	Der Mittelwert der Ausgangsspannung . . . . .	208
3.523	Bezogene Grossen. . . . .	213
3.524	Das Ersatzschaltbild des Wechselrichterzweiges. . . . .	213
3.525	Die Steuerung des Wechselrichterzweiges. . . . .	217
3.526	Die Kennlinien im stationären Betrieb. . . . .	219
3.53	Der Wechselrichterzweig mit Phasenlöschung . . . . .	220
3.531	Zwangskommutierung . . . . .	220
3.532	Der Mittelwert der Ausgangsspannung . . . . .	227
3.533	Bezogene Grossen. . . . .	232
3.534	Das Ersatzschaltbild des Wechselrichterzweiges. . . . .	232
3.535	Die Steuerung des Wechselrichterzweiges. . . . .	236
3.536	Die Kennlinien im stationären Betrieb. . . . .	236
3.54	Der Frequenzumrichter. . . . .	237
•3.541	Definition der Bezugsgrössen . . . . .	237
3.542	Einführung komplexer Raumvektoren . . . . .	239
3.543	Die Steuerung des Frequenzumrichters nach dem Pulsverfahren . . . . .	242
3.544	Die Steuerung des Frequenzumrichters nach dem Rechteckverfahren ....	244
3.545	Der Gleichspannungszwischenkreis. . . . .	246
3.546	Das Strukturdiagramm des Frequenzumrichters. . . . .	250
	Verzeichnis der verwendeten Buchstabensymbole . . . . .	253
	Literaturverzeichnis. . . . .	259
	Sachverzeichnis . . . . .	263

Band 2

<b>4 Die direktumrichtergespeiste Synchronmaschine</b> .....	13
4.1 <i>Uebersicht</i> .....	13
4.2 <i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> .....	14
4.21 Die Synchronmaschine mit Direktumrichter .....	14
4.211 Die Eigenschaften der direktumrichtergespeisten Synchronmaschine .....	14
4.212 Die statischen Kennlinien .....	15
4.22 Die Regelkreise .....	19
4.221 Prinzipielle Anordnung und Funktionsweise .....	19
4.222 Die Definition der Regelstrecke .....	22
4.223 Der Zusammenhang zwischen Synchronmaschine und Direktumrichter ..	23
4.224 Das Blockschaltbild der Regelstrecke .....	24
4.225 Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise .....	26
4.3 <i>Die Stromregelkreise</i> .....	29
4.31 Die Regelstrecke .....	29
4.311 Das Gleichungssystem der Synchronmaschine .....	29
4.312 Das Gleichungssystem des Direktumrichters .....	29
4.313 Das Gleichungssystem der Regelstrecke .....	31
4.314 Die Uebertragungsfunktionen der Regelstrecke .....	31
4.32 Die Welligkeit des Stator- und des Erregerstromes .....	37
4.321 Die Grundbeziehungen .....	37
4.322 Die Spannungswelligkeit .....	39
4.323 Die Welligkeit des Statorstromes .....	45
4.324 Die Welligkeit des Erregerstromes .....	46
4.33 Die Regler und Stellorgane .....	47
4.331 Die Statorstromregler .....	47
4.332 Die Stellorgane für den Statorstrom .....	50
4.333 Der Regler und das Stellorgan für den Erregerstrom .....	53
4.34 Die Untersuchung der Stromregelkreise .....	55
4.341 Das Signalflussdiagramm und die Grundbeziehungen der Stromregelkreise	55
4.342 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Statorstromregelung .....	58
4.343 Die Welligkeit am Ausgang der Statorstromregler .....	60
4.344 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Erregerstromregelung .....	61
4.345 Die Stabilitätsuntersuchung der gekoppelten Stromregelkreise .....	66
4.346 Die Uebertragungsfunktion der geschlossenen Stromregelkreise .....	68
4.347 Die Genauigkeit der Statorstromregelung im stationären Betrieb .....	69
4.4 <i>Der Drehzahlregelkreis</i> .....	75
4.41 Die Regelstrecke .....	75
4.411 Das Gleichungssystem der Synchronmaschine .....	75
4.412 Die Uebertragungsfunktionen der Synchronmaschine .....	77
4.42 Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises .....	77
4.421 Die Uebertragungsfaktoren der Strom-Sollwertgeber .....	77
4.422 Das Signalflussdiagramm und die Uebertragungsfunktionen des Drehzahl- regelkreises .....	79
4.423 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung .....	84
4.424 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises ...	85

<b>5</b>	<b>Der Stromrichtermotor</b> .....	88
5.1	<i>Uebersicht</i> .....	88
5.2	<i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> .....	89
5.2.1	Die Synchronmaschine mit Zwischenkreisumrichter .....	89
5.2.11	Die Eigenschaften des Stromrichtermotors .....	89
5.2.12	Das Anfahrproblem .....	92
5.2.13	Die Steuerung des maschinengeführten Stromrichters .....	94
5.2.14	Die statischen Kennlinien des Stromrichtermotors .....	99
5.2.2	Die Regelkreise .....	105
5.2.21	Prinzipielle Anordnung und Funktionsweise .....	105
5.2.22	Die Definition der Regelstrecke .....	108
5.2.23	Der Zusammenhang zwischen Synchronmaschine und Zwischenkreisumrichter .....	109
5.2.24	Das Blockschaltbild der Regelstrecke .....	110
5.2.25	Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise .....	111
5.3	<i>Die Stromregelkreise</i> .....	112
5.3.1	Die Regelstrecke .....	112
5.3.11	Das Gleichungssystem der Synchronmaschine .....	112
5.3.12	Das Gleichungssystem des Zwischenkreisumrichters .....	112
5.3.13	Das Gleichungssystem der Regelstrecke .....	113
5.3.14	Die Uebertragungsfunktionen der Regelstrecke .....	115
5.3.2	Die Welligkeit des Zwischenkreis- und des Erregerstromes .....	127
5.3.21	Die Grundbeziehungen .....	127
5.3.22	Die Welligkeit des Zwischenkreisstromes .....	129
5.3.23	Die Dimensionierung der Zwischenkreisdrossel .....	132
5.3.24	Die Welligkeit des Erregerstromes .....	132
5.3.3	Die Untersuchung der Stromregelkreise .....	133
5.3.31	Das Signalflussdiagramm der Stromregelkreise .....	133
5.3.32	Die Bestimmung der Reglerparameter für die Regelung des Zwischenkreisstromes .....	134
5.3.33	Die Welligkeit am Ausgang des Reglers für den Zwischenkreisstrom .....	136
5.3.34	Die resultierende Uebertragungsfunktion für die Erregerstromregelung .....	138
5.3.35	Die Bestimmung der Reglerparameter für die Erregerstromregelung .....	141
5.3.36	Die Uebertragungsfunktionen der geschlossenen Stromregelkreise .....	144
5.4	<i>Der Drehzahlregelkreis</i> .....	147
5.4.1	Die Regelstrecke .....	147
5.4.11	Das Gleichungssystem der Synchronmaschine .....	147
5.4.12	Die Uebertragungsfunktionen der Synchronmaschine .....	149
5.4.2	Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises .....	151
5.4.21	Die Uebertragungsfaktoren der Strom-Sollwertgeber .....	151
5.4.22	Das Signalflussdiagramm und die Uebertragungsfunktionen des Drehzahlregelkreises .....	153
5.4.23	Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung .....	155
5.4.24	Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises .....	158

<b>6 Die untersynchrone Stromrichter-kaskade</b> .....	160
6.1 <i>Uebersicht</i> .....	160
6.2 <i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> .....	161
6.21 Der Schleifringläufer-Asynchronmotor mit Zwischenkreisumrichter .....	161
6.211 Die Eigenschaften der untersynchronen Stromrichter-kaskade .....	161
6.212 Das Anfahrproblem .....	164
6.213 Die statischen Kennlinien der untersynchronen Stromrichter-kaskade .....	164
6.22 Die Regelkreise .....	172
6.221 Prinzipielle Anordnung und Funktionsweise .....	172
6.222 Die Definition der Regelstrecke und deren Blockschaltbild .....	172
6.223 Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise .....	174
6.3 <i>Der Stromregelkreis</i> .....	176
6.31 Die Regelstrecke .....	176
6.311 Das Gleichungssystem des Schleifringläufer-Asynchronmotors .....	176
6.312 Das Gleichungssystem des Zwischenkreisumrichters .....	178
6.313 Das Gleichungssystem der Regelstrecke .....	179
6.314 Die Uebertragungsfunktion der Regelstrecke .....	181
6.32 Die Welligkeit des Zwischenkreisstromes .....	183
6.321 Die Stromwelligkeit .....	183
6.322 Die Dimensionierung der Zwischenkreisdrossel .....	188
6.33 Die Untersuchung des Stromregelkreises .....	188
6.331 Das Signalfussdiagramm des Stromregelkreises .....	188
6.332 Die Bestimmung der Reglerparameter .....	188
6.333 Die Welligkeit am Ausgang des Stromreglers .....	191
6.334 Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen Stromregelkreises .....	193
6.4 <i>Der Drehzahlregelkreis</i> .....	194
6.41 Die Regelstrecke .....	194
6.411 Das Gleichungssystem des Schleifringläufer-Asynchronmotors .....	194
6.412 Die Uebertragungsfunktion des Schleifringläufer-Asynchronmotors .....	196
6.42 Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises .....	199
6.421 Das Signalfussdiagramm und die Uebertragungsfunktion des Drehzahlregelkreises .....	199
6.422 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung .....	200
6.423 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises .....	202
<b>7 Die umrichtergespeiste Asynchronmaschine</b> .....	206
7.1 <i>Uebersicht</i> .....	206
7.2 <i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> .....	207
7.21 Die Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter .....	207
7.211 Die Eigenschaften der umrichtergespeisten Asynchronmaschine .....	207
7.212 Die statischen Kennlinien bei Speisung aus einem Pulsumrichter .....	210
7.213 Die statischen Kennlinien bei Speisung aus einem Stromzwischenkreis-Umrichter .....	213



7.22	Die Regelung der Asynchronmaschine . . . . .	215
7.221	Allgemeines. . . . .	215
7.222	Die Stromregelung des Pulsumrichters. . . . .	218
7.223	Die Stromregelung des Stromzwischenkreis-Umrichters. . . . .	222
7.224	Die Drehzahlregelung mit indirekter Flussführung über eingepprägten Statorstrom. . . . .	222
7.225	Die Drehzahlregelung mit Flussführung durch feldorientierte Regelung—	225
7.226	Die Definition der Regelstrecke und deren Blockschaltbild bei Speisung aus einem Pulsumrichter. . . . .	227
7.227	Die Definition der Regelstrecke und deren Blockschaltbild bei Speisung aus einem Stromzwischenkreis-Umrichter. . . . .	228
7.228	Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise. . . . .	230
7.3	<i>Die Stromregelkreise bei einem Pulsumrichter.</i> . . . . .	231
7.31	Die Regelstrecke. . . . .	231
7.311	Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine. . . . .	231
7.312	Das Gleichungssystem des Pulsumrichters. . . . .	232
7.313	Das Gleichungssystem der Regelstrecke. . . . .	234
7.314	Die komplexe Uebertragungsfunktion der Regelstrecke. . . . .	236
7.32	Die Welligkeit des Statorstromes. . . . .	239
7.321	Die Grundbeziehungen. . . . .	239
7.322	Die Spannungswelligkeit. . . . .	241
7.323	Die Stromwelligkeit. . . . .	245
7.33	Die Untersuchung der dreiphasigen Stromregelkreise. . . . .	249
7.331	Die komplexe Uebertragungsfunktion der dreiphasigen Stromregler. . . . .	249
7.332	Das Signalfussdiagramm und die Grundbeziehungen des komplexen Stromregelkreises. . . . .	250
7.333	Die Stabilitätsuntersuchung bei komplexen Uebertragungsfunktionen. . . . .	251
7.334	Die Bestimmung der Reglerparameter. . . . .	253
7.335	Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen komplexen Stromregelkreises. . . . .	256
7.336	Die Genauigkeit der Stromregelung im stationären Betrieb. . . . .	258
7.34	Die Untersuchung der zweiachsigigen Stromregelkreise. . . . .	261
7.341	Das Signalfussdiagramm und die Grundbeziehungen des komplexen Stromregelkreises. . . . .	261
7.342	Die Bestimmung der Reglerparameter. . . . .	262
7.343	Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen komplexen Stromregelkreises. . . . .	265
7.344	Die Entkopplung der zweiachsigigen Stromregelkreise. . . . .	267
7.35	Die Untersuchung der dreiphasigen Stromregelkreise mit Zweipunktreglern. . . . .	270
7.351	Die Grundbeziehungen. . . . .	270
7.352	Das Verhalten im stationären Betrieb. . . . .	274
7.353	Das Verhalten bei Sollwertänderungen. . . . .	277
7.4	<i>Der Stromregelkreis bei einem Stromzwischenkreis-Umrichter.</i> . . . . .	281
7.41	Die Regelstrecke. . . . .	281
7.411	Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine. . . . .	281
7.412	Das Gleichungssystem des Stromzwischenkreis-Umrichters. . . . .	281
7.413	Das Gleichungssystem der Regelstrecke. . . . .	282
7.414	Die Uebertragungsfunktion der Regelstrecke. . . . .	285

7.42 Die Welligkeit des Zwischenkreisstromes. . . . .	288
7.421 Der Einfluss der Zwangskommutierung auf die Welligkeit des Zwischenkreisstromes. . . . .	288
7.422 Die Stromwelligkeit. . . . .	290
7.423 Die Dimensionierung der Zwischenkreisdrossel. . . . .	291
7.43 Die Untersuchung des Stromregelkreises. . . . .	292
7.431 Das Signalflussdiagramm und die Grundbeziehungen des Stromregelkreises. . . . .	292
7.432 Die Bestimmung der Reglerparameter. . . . .	293
7.433 Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen Stromregelkreises. . . . .	295
7.5 <i>Der Drehzahlregelkreis bei indirekter Flussführung.</i> . . . . .	296
7.51 Die Regelstrecke. . . . .	296
7.511 Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine. . . . .	296
7.512 Die Uebertragungsfunktionen der Asynchronmaschine. . . . .	297
7.52 Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises. . . . .	301
7.521 Der Uebertragungsfaktor des Strom-Sollwertgebers. . . . .	301
7.522 Das Signalflussdiagramm und die Uebertragungsfunktionen des Drehzahlregelkreises. . . . .	302
7.523 Die Bestimmung der Reglerparameter. . . . .	307
7.524 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises. . . . .	309
7.6 <i>Der Drehzahlregelkreis bei feldorientierter Regelung.</i> . . . . .	312
7.61 Die Regelstrecke. . . . .	312
7.611 Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine. . . . .	312
7.612 Die Uebertragungsfunktionen der Asynchronmaschine bei Feldorientierung auf Statorfluss. . . . .	313
7.613 Die Uebertragungsfunktionen der Asynchronmaschine bei Feldorientierung auf Rotorfluss. . . . .	318
7.62 Die Untersuchung des Drehzahl- und Flussregelkreises. . . . .	320
7.621 Die indirekte Messung des Rotorflusses. . . . .	320
7.622 Die Entkopplung der Stromregelkreise. . . . .	324
7.623 Das Signalflussdiagramm des Drehzahl- und Flussregelkreises. . . . .	326
7.624 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Flussregelung. . . . .	327
7.625 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung. . . . .	329
7.626 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises. . . . .	329
Verzeichnis der verwendeten Buchstabensymbole. . . . .	333
Literaturverzeichnis. . . . .	339
Sachverzeichnis. . . . .	343

# EINFÜHRUNG IN DIE THEORIE GEREGLTER DREHSTROMANTRIEBE

HANSRUEDI BUHLER

PROFESSOR AN DER EIDG. TECHNISCHEN HOCHSCHULE LAUSANNE

BAND 2  
ANWENDUNGEN



1977

BIRKHÄUSER VERLAG BASEL  
UND STUTT GART

# INHALTSVERZEICHNIS

Band 2

<b>4 Die direktumrichtergespeiste Synchronmaschine</b> .....	13
4.1 <i>Uebersicht</i> .....	13
4.2 <i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> .....	14
4.21 Die Synchronmaschine mit Direktumrichter .....	14
4.211 Die Eigenschaften der direktumrichtergespeisten Synchronmaschine .....	14
4.212 Die statischen Kennlinien .....	15
4.22 Die Regelkreise .....	19
4.221 Prinzipielle Anordnung und Funktionsweise .....	19
4.222 Die Definition der Regelstrecke .....	22
4.223 Der Zusammenhang zwischen Synchronmaschine und Direktumrichter .....	23
4.224 Das Blockschaltbild der Regelstrecke .....	24
4.225 Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise .....	26
4.3 <i>Die Stromregelkreise</i> .....	29
4.31 Die Regelstrecke .....	29
4.311 Das Gleichungssystem der Synchronmaschine .....	29
4.312 Das Gleichungssystem des Direktumrichters .....	29
4.313 Das Gleichungssystem der Regelstrecke .....	31
4.314 Die Uebertragungsfunktionen der Regelstrecke .....	31
4.32 Die Welligkeit des Stator- und des Erregerstromes .....	37
4.321 Die Grundbeziehungen .....	37
4.322 Die Spannungswelligkeit .....	39
4.323 Die Welligkeit des Statorstromes .....	45
4.324 Die Welligkeit des Erregerstromes .....	46
4.33 Die Regler und Stellorgane .....	47
4.331 Die Statorstromregler .....	47
4.332 Die Stellorgane für den Statorstrom .....	50
4.333 Der Regler und das Stellorgan für den Erregerstrom .....	53
4.34 Die Untersuchung der Stromregelkreise .....	55
4.341 Das Signalflussdiagramm und die Grundbeziehungen der Stromregelkreise .....	55
4.342 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Statorstromregelung .....	58
4.343 Die Welligkeit am Ausgang der Statorstromregler .....	60
4.344 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Erregerstromregelung .....	61
4.345 Die Stabilitätsuntersuchung der gekoppelten Stromregelkreise .....	66
4.346 Die Uebertragungsfunktion der geschlossenen Stromregelkreise .....	68
4.347 Die Genauigkeit der Statorstromregelung im stationären Betrieb .....	69
4.4 <i>Der Drehzahlregelkreis</i> .....	75
4.41 Die Regelstrecke .....	75
4.411 Das Gleichungssystem der Synchronmaschine .....	75

4.412	Die Uebertragungsfunktionen der Synchronmaschine	77
4.42	Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises	77
4.421	Die Uebertragungsfaktoren der Strom-Sollwertgeber	77
4.422	Das Signalfussdiagramm und die Uebertragungsfunktionen des Drehzahlregelkreises	79
4.423	Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung	84
4.424	Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises	85
<b>5</b>	<b>Der Stromrichtermotor</b>	<b>88</b>
5.1	<i>Uebersicht</i>	88
5.2	<i>Die Leistungs- und Regelkreise</i>	89
5.21	Die Synchronmaschine mit Zwischenkreisumrichter	89
5.211	Die Eigenschaften des Stromrichtermotars	89
5.212	Das Anfahrproblem	92
5.213	Die Steuerung des maschinengeführten Stromrichters	94
5.214	Die statischen Kennlinien des Stromrichtermotars	99
5.22	Die Regelkreise	105
5.221	Prinzipielle Anordnung und Funktionsweise	105
5.222	Die Definition der Regelstrecke	108
5.223	Der Zusammenhang zwischen Synchronmaschine und Zwischenkreisumrichter	109
5.224	Das Blockschaltbild der Regelstrecke	110
5.225	Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise	111
5.3	<i>Die Stromregelkreise</i>	112
5.31	Die Regelstrecke	112
5.311	Das Gleichungssystem der Synchronmaschine	112
5.312	Das Gleichungssystem des Zwischenkreisumrichters	112
5.313	Das Gleichungssystem der Regelstrecke	113
5.314	Die Uebertragungsfunktionen der Regelstrecke	115
5.32	Die Welligkeit des Zwischenkreis- und des Erregerstromes	127
5.321	Die Grundbeziehungen	127
5.322	Die Welligkeit des Zwischenkreisstromes	129
5.323	Die Dimensionierung der Zwischenkreisdrossel	132
5.324	Die Welligkeit des Erregerstromes	132
5.33	Die Untersuchung der Stromregelkreise	133
5.331	Das Signalfussdiagramm der Stromregelkreise	133
5.332	Die Bestimmung der Reglerparameter für die Regelung des Zwischenkreisstromes	134
5.333	Die Welligkeit am Ausgang des Reglers für den Zwischenkreisstrom	136
5.334	Die resultierende Uebertragungsfunktion für die Erregerstromregelung	138
5.335	Die Bestimmung der Reglerparameter für die Erregerstromregelung	141
5.336	Die Uebertragungsfunktionen der geschlossenen Stromregelkreise	144
5.4	<i>Der Drehzahlregelkreis</i>	147
5.41	Die Regelstrecke	147
5.411	Das Gleichungssystem der Synchronmaschine	147
5.412	Die Uebertragungsfunktionen der Synchronmaschine	149

5.42 Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises . . . . .	151
5.421 Die Uebertragungsfaktoren der Strom-Sollwertgeber . . . . .	151
5.422 Das Signalfussdiagramm und die Uebertragungsfunktionen des Drehzahlregelkreises . . . . .	153
5.423 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung . . . . .	155
5.424 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises . . . . .	158
<b>6 Die untersynchrone Stromrichter-kaskade . . . . .</b>	<b>160</b>
6.1 <i>Uebersicht</i> . . . . .	160
6.2 <i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> . . . . .	161
6.21 Der Schleifringläufer-Asynchronmotor mit Zwischenkreisumrichter . . . . .	161
6.211 Die Eigenschaften der untersynchronen Stromrichter-kaskade . . . . .	161
6.212 Das Anfahrproblem . . . . .	164
6.213 Die statischen Kennlinien der untersynchronen Stromrichter-kaskade . . . . .	164
6.22 Die Regelkreise . . . . .	172
6.221 Prinzipielle Anordnung und Funktionsweise . . . . .	172
6.222 Die Definition der Regelstrecke und deren Blockschaltbild . . . . .	172
6.223 Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise . . . . .	174
6.3 <i>Der Stromregelkreis</i> . . . . .	176
6.31 Die Regelstrecke . . . . .	176
6.311 Das Gleichungssystem des Schleifringläufer-Asynchronmotors . . . . .	176
6.312 Das Gleichungssystem des Zwischenkreisumrichters . . . . .	178
6.313 Das Gleichungssystem der Regelstrecke . . . . .	179
6.314 Die Uebertragungsfunktion der Regelstrecke . . . . .	181
6.32 Die Welligkeit des Zwischenkreisstromes . . . . .	183
6.321 Die Stromwelligkeit . . . . .	183
6.322 Die Dimensionierung der Zwischenkreisdrossel . . . . .	188
6.33 Die Untersuchung des Stromregelkreises . . . . .	188
6.331 Das Signalfussdiagramm des Stromregelkreises . . . . .	188
6.332 Die Bestimmung der Reglerparameter . . . . .	188
6.333 Die Welligkeit am Ausgang des Stromreglers . . . . .	191
6.334 Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen Stromregelkreises . . . . .	193
6.4 <i>Der Drehzahlregelkreis</i> . . . . .	194
6.41 Die Regelstrecke . . . . .	194
6.411 Das Gleichungssystem des Schleifringläufer-Asynchronmotors . . . . .	194
6.412 Die Uebertragungsfunktion des Schleifringläufer-Asynchronmotors . . . . .	196
6.42 Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises . . . . .	199
6.421 Das Signalfussdiagramm und die Uebertragungsfunktion des Drehzahlregelkreises . . . . .	199
6.422 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung . . . . .	200
6.423 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises . . . . .	202

<b>7 Die umrichter gespeiste Asynchronmaschine</b> . . . . .	206
7.1 <i>Uebersicht</i> . . . . .	206
7.2 <i>Die Leistungs- und Regelkreise</i> . . . . .	207
7.21 Die Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter . . . . .	207
7.211 Die Eigenschaften der umrichter gespeisten Asynchronmaschine . . . . .	207
7.212 Die statischen Kennlinien bei Speisung aus einem Pulsumrichter . . . . .	210
7.213 Die statischen Kennlinien bei Speisung aus einem Stromzwischenkreis-Umrichter . . . . .	213
7.22 Die Regelung der Asynchronmaschine . . . . .	215
7.221 Allgemeines . . . . .	215
7.222 Die Stromregelung des Pulsumrichters . . . . .	218
7.223 Die Stromregelung des Stromzwischenkreis-Umrichters . . . . .	222
7.224 Die Drehzahlregelung mit indirekter Flussführung über eingepprägten Statorstrom . . . . .	222
7.225 Die Drehzahlregelung mit Flussführung durch feldorientierte Regelung . . . . .	225
7.226 Die Definition der Regelstrecke und deren Blockschaltbild bei Speisung aus einem Pulsumrichter . . . . .	227
7.227 Die Definition der Regelstrecke und deren Blockschaltbild bei Speisung aus einem Stromzwischenkreis-Umrichter . . . . .	228
7.228 Grundsätzliches zur Untersuchung der Regelkreise . . . . .	230
7.3 <i>Die Stromregelkreise bei einem Pulsumrichter</i> . . . . .	231
7.31 Die Regelstrecke . . . . .	231
7.311 Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine . . . . .	231
7.312 Das Gleichungssystem des Pulsumrichters . . . . .	232
7.313 Das Gleichungssystem der Regelstrecke . . . . .	234
7.314 Die komplexe Uebertragungsfunktion der Regelstrecke . . . . .	236
7.32 Die Welligkeit des Statorstromes . . . . .	239
7.321 Die Grundbeziehungen . . . . .	239
7.322 Die Spannungswelligkeit . . . . .	241
7.323 Die Stromwelligkeit . . . . .	245
7.33 Die Untersuchung der dreiphasigen Stromregelkreise . . . . .	249
7.331 Die komplexe Uebertragungsfunktion der dreiphasigen Stromregler . . . . .	249
7.332 Das Signalflussdiagramm und die Grundbeziehungen des komplexen Stromregelkreises . . . . .	250
7.333 Die Stabilitätsuntersuchung bei komplexen Uebertragungsfunktionen . . . . .	251
7.334 Die Bestimmung der Reglerparameter . . . . .	253
7.335 Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen komplexen Stromregelkreises . . . . .	256
7.336 Die Genauigkeit der Stromregelung im stationären Betrieb . . . . .	258
7.34 Die Untersuchung der zweiachsigen Stromregelkreise . . . . .	261
7.341 Das Signalflussdiagramm und die Grundbeziehungen des komplexen Stromregelkreises . . . . .	261
7.342 Die Bestimmung der Reglerparameter . . . . .	262
7.343 Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen komplexen Stromregelkreises . . . . .	265
7.344 Die Entkopplung der zweiachsigen Stromregelkreise . . . . .	267

7.35 Die Untersuchung der dreiphasigen Stromregelkreise mit Zweipunktreglern . . . . .	270
7.351 Die Grundbeziehungen . . . . .	270
7.352 Das Verhalten im stationären Betrieb . . . . .	274
7.353 Das Verhalten bei Sollwertänderungen . . . . .	277
7.4 <i>Der Stromregelkreis bei einem Stromzwischenkreis-Umrichter</i> . . . . .	281
7.41 Die Regelstrecke . . . . .	281
7.411 Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine . . . . .	281
7.412 Das Gleichungssystem des Stromzwischenkreis-Umrichters . . . . .	281
7.413 Das Gleichungssystem der Regelstrecke . . . . .	282
7.414 Die Uebertragungsfunktion der Regelstrecke . . . . .	285
7.42 Die Welligkeit des Zwischenkreisstromes . . . . .	288
7.421 Der Einfluss der Zwangskommutierung auf die Welligkeit des Zwischenkreisstromes . . . . .	288
7.422 Die Stromwelligkeit . . . . .	290
7.423 Die Dimensionierung der Zwischenkreisdrossel . . . . .	291
7.43 Die Untersuchung des Stromregelkreises . . . . .	292
7.431 Das Signalfussdiagramm und die Grundbeziehungen des Stromregelkreises . . . . .	292
7.432 Die Bestimmung der Reglerparameter . . . . .	293
7.433 Die Uebertragungsfunktion des geschlossenen Stromregelkreises . . . . .	295
7.5 <i>Der Drehzahlregelkreis bei indirekter Flussführung</i> . . . . .	296
7.51 Die Regelstrecke . . . . .	296
7.511 Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine . . . . .	296
7.512 Die Uebertragungsfunktionen der Asynchronmaschine . . . . .	297
7.52 Die Untersuchung des Drehzahlregelkreises . . . . .	301
7.521 Der Uebertragungsfaktor des Strom-Sollwertgebers . . . . .	301
7.522 Das Signalfussdiagramm und die Uebertragungsfunktionen des Drehzahlregelkreises . . . . .	302
7.523 Die Bestimmung der Reglerparameter . . . . .	307
7.524 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises . . . . .	309
7.6 <i>Der Drehzahlregelkreis bei feldorientierter Regelung</i> . . . . .	312
7.61 Die Regelstrecke . . . . .	312
7.611 Das Gleichungssystem der Asynchronmaschine . . . . .	312
7.612 Die Uebertragungsfunktionen der Asynchronmaschine bei Feldorientierung auf Statorfluss . . . . .	313
7.613 Die Uebertragungsfunktionen der Asynchronmaschine bei Feldorientierung auf Rotorfluss . . . . .	318
7.62 Die Untersuchung des Drehzahl- und Flussregelkreises . . . . .	320
7.621 Die indirekte Messung des Rotorflusses . . . . .	320
7.622 Die Entkopplung der Stromregelkreise . . . . .	324
7.623 Das Signalfussdiagramm des Drehzahl- und Flussregelkreises . . . . .	326
7.624 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Flussregelung . . . . .	327
7.625 Die Bestimmung der Reglerparameter für die Drehzahlregelung . . . . .	329
7.626 Die Uebertragungsfunktionen des geschlossenen Drehzahlregelkreises . . . . .	329



Verzeichnis der verwendeten Buchstabensymbole .....	333
Literaturverzeichnis .....	339
Sachverzeichnis .....	343