

Fritz Kümmel

Elektrische Antriebstechnik

Teil 3: Antriebsregelung -
feldorientiert geregelte Drehstromantriebe
Busvernetzungen

Inhaltsverzeichnis

1	Anlagentechnische Gesichtspunkte	21
1.1	Ungeregelte/geregelte Antriebe	21
1.1.1	Antriebe unveränderlicher Drehzahl	21
1.1.1.1	Anwendungsbereiche	22
1.1.1.2	Antriebe großer Leistung	22
1.1.1.3	Anlauf/Stillsetzung	23
1.1.2	Gesteuerte Antriebe	23
1.1.2.1	Vorteile und Nachteile	23
1.1.2.2	Industrieller Einsatz	24
1.1.2.3	Schaltungsvarianten	24
1.1.2.4	Einschwingstörungen gesteuerter Antriebe	26
1.1.2.5	Gesteuerte Umrichterantriebe	27
1.1.3	Geregelte Antriebe	27
1.1.3.1	Funktionsgruppen	27
1.1.3.2	Regelungstechnische Anforderungen	29
1.1.3.3	Sonderbetriebsarten	31
1.2	Allgemeine Entwurfsgesichtspunkte	31
1.2.1	Randbedingungen	32
1.2.1.1	Wirkungsgrad	32
1.2.1.2	Mechanische Zeitglieder	33
1.2.1.3	Elektromechanische Zeitglieder	33
1.2.1.4	Beschleunigungsbetrieb	34
1.2.2	Das Anforderungsprofil	34
1.2.2.1	Umfeld	35
1.2.2.2	Betriebskenndaten	36

1.2.2.3	Netzkonstanten	38
1.2.2.4	Lastkonstanten	39
1.2.2.5	Nutzen-/Kostenanalyse	39
1.2.3	Motorentwurf	41
1.2.3.1	Fremderregter Gleichstrommotor	41
1.2.3.2	Schleifringläufermotor	41
1.2.3.3	Käfigläufermotor	42
1.2.3.4	Synchronmotor	43
1.2.4	Leistungselektronische Stellglieder	43
1.2.4.1	Netzgeführte Stromrichter	43
1.2.4.2	Gleichstromsteller	46
1.2.4.3	Selbstgeführte Umrichter	47
 Übertragungsglieder		51
2.1	Modellbildung	52
2.1.1	Zusammenfassung von PTI-Gliedern	52
2.1.2	Blockaufteilung	52
2.1.2.1	Rückwirkungsfreiheit	53
2.1.2.2	Zeitinvarianz	54
2.1.2.3	Linearisierung	54
2.1.3	Normierung der Regelkreis-Kenndaten	57
2.1.3.1	Bezogene Konstanten	57
2.1.3.2	Nenn-Signalpegel	59
2.2	Elementare Übertragungsglieder	59
2.2.1	Proportionalglied	59
2.2.2	Verzögerungsglied erster Ordnung	60
2.2.2.1	Differentialgleichung und Übergangsfunktion	60
2.2.2.2	Mechanische Verzögerungsanordnung	62
2.2.3	Integrierglied	63
2.2.4	Totzeitglied	65
2.2.4.1	Beispiele in der Antriebstechnik	65
2.2.4.2	Anwendung der Pade-Näherung	67
2.2.4.3	Einfluß auf den Regelkreis	68
2.2.5	Differenzierglied	69
2.2.6	Vorhaltglied	71

2.3	Verzögerungsglied 2.Ordnung	72
2.3.1	PT2-Glieder bei Antrieben	72
2.3.1.1	Funktionsbeispiele	72
2.3.1.2	Hubwerk mit elastischem Seil	73
2.3.1.3	Aufstellung der Differentialgleichung	74
2.3.1.4	Frequenzgang	75
2.3.1.5	Transformation in den Zeitbereich	76
2.3.1.6	Wirkschalbild	77
2.3.2	Periodische Dämpfung	77
2.3.3	Aperiodische Dämpfung	80
2.3.4	Frequenzgang-Darstellung	80
2.3.5	Ortskurvendarstellung	81
2.3.6	Näherung durch zwei PT1-Glieder	82
2.4	Elektromagnetischer Störschutz der Steuerelektronik	86
2.4.1	Elektromagnetische Störeinflüsse	87
2.4.2	Potentialverbindungen	89
3	Kombination von Übertragungsgliedern	91
3.1	Frequenzkennlinien-Darstellung	91
3.1.1	Betrags- und Phasenkennlinien	92
3.1.2	Elementarglieder	95
3.1.3	Frequenzkennlinien des PT2-Gliedes	97
3.1.4	Reihenanordnungen	98
3.1.5	Verhältnis Phasen- und Betragskennlinie	100
3.2	Geschlossener Regelkreis	101
3.2.1	Gegenkopplung	101
3.2.2	Stabilität und Dämpfung	102
3.2.3	Bezugsregelkreis	104
3.2.4	Kenngößen offener Regelkreise	109
3.2.5	Veränderung der Konstanten	109
3.3	Umformung von Wirkschaltungen	111
3.3.1	Zusammenfassung von Blöcken	113
3.3.2	Verschieben von Summier- und Verzweigungspunkten	114
3.3.3	Entflechtung von Gegenkopplungskreisen	116
3.3.4	Berücksichtigung mehrerer Einflußgrößen	118
3.3.5	Dynamikverbesserung durch Störgrößenaufschaltung	120

Einstellbare Regelkreisglieder	125
4.1 Analog-Regler	125
4.1.1 Gegengekoppelter Regel Verstärker	126
4.1.2 PID-Regler	127
4.1.2.1 Spannungssummierung	127
4.1.2.2 Stromsummierung	128
4.1.2.3 Frequenzkennlinien und Übergangsfunktion	129
4.1.2.4 Unabhängig einstellbare Komponenten	130
4.1.3 PI-Regler	131
4.1.3.1 Beschattung und Betriebsverhalten	131
4.1.3.2 Anpassung an die Regelstrecke	133
4.1.4 PD-Regler	135
4.1.4.1 Beschaltung und Frequenzkennlinien	135
4.1.4.2 Anwendungsbereich	136
4.2 Adaptive Analog-Regler	137
4.2.1 Prinzipschaltungen	139
4.2.1.1 Gesteuerte Adaption	139
4.2.1.2 Geregelte Adaption	141
4.2.2 Anwendungsbereiche	142
4.2.3 Kompensation des Einflusses von lückendem Strom	144
4.2.3.1 Zeitverhalten Stromregelkreis	144
4.2.3.2 Adaptionsschaltungen	146
4.2.4 Regelkreisanpassung an variables Trägheitsmoment	149
4.2.4.1 Trägheitsmoment-Einfluß ohne Adaption	150
4.2.4.2 Einfluß einer gesteuerten Adaption	151
4.2.4.3 Vorteile der geregelten Adaption	153
4.2.4.4 Hochpaßfilter	154
4.2.4.5 Identifizierungsschaltung	154
4.2.4.6 Adaptionsregelung	155
4.3 Filter	155
4.3.1 Tiefpaßfilter	156
4.3.1.1 Schaltungen	156
4.3.1.2 Optimale Einstellung	158
4.3.2 Bandsperfilter	159

4.3.2.1	Anwendungsbereich . . . . .	.159
4.3.2.2	Bandsperrfütter-Schaltung . . . . .	.160
4.3.2.3	Wirkung des Sperrfilters. . . . .	.164
4.3.2.4	Fehlanpassung . . . . .	.165
Regelstrukturen und ihre Beeinflussung		169
5.1	Elementare Regelkreisstrukturen . . . . .	.169
5.1.1	Struktur: PID - REG. + PT1 + PT1 + PT1 . . . . .	.170
5.1.1.1	Frequenzgang . . . . .	.170
5.1.1.2	Übergangsfunktion . . . . .	.172
5.1.2	Struktur: PI - REG. + PT1 + PT1 . . . . .	.173
5.1.2.1	Kompensation der großen Zeitkonstanten . . . . .	.173
5.1.2.2	Unvollkommene Kompensation der großen Zeitkonstanten . . . . .	.174
5.1.3	Struktur: PI - REG. + PT1 + PT1 + TOT. . . . . .	.175
5.1.3.1	Totzeitnäherung . . . . .	.176
5.1.3.2	Ortskurve . . . . .	.176
5.1.3.3	Übergangsfunktion. . . . .	.176
5.1.4	Struktur: PID/PI - REG. + PT1 + PT2. . . . . .	.177
5.1.4.1	Kreis mit PID-Regler. . . . .	.178
5.1.4.2	Kreis mit PI-Regler. . . . .	.179
5.1.5	Struktur: PI - REG. + 1 + PT1. . . . . .	.181
5.1.5.1	Stabilitätsbetrachtungen . . . . .	.181
5.1.5.2	Regelstruktur. . . . .	.181
5.1.5.3	Übergangsfunktionen . . . . .	.182
5.1.6	Struktur: PI - REG. + 1 + PT1 + TOT. . . . . .	.183
5.1.7	Struktur: P/PD - REG. + 1 + PT2. . . . . .	.185
5.1.7.1	Ortskurven . . . . .	.185
5.1.7.2	Übergangsfunktion. . . . .	.187
5.1.8	Struktur: PD - REG. + 1 + PT2 + TOT. . . . . .	.187
5.2	Antriebsspezifische Regelungsprobleme . . . . .	.192
5.2.1	Begrenzung der Führungsgrößen-Änderungsgeschwindigkeit . . . . .	.192
5.2.1.1	Führungsgrößenverlauf und Regelkreisschwingung . . . . .	.193

5.2.1.2	Einstellung des Schritt-Sollwerts	195
5.2.2	Erhöhung der Eigenfrequenz von Schwingungsgliedern	196
5.2.2.1	Schwach gedämpfter Zweimassenschwinger	197
5.2.2.2	Optimierung bei niedriger Eigenfrequenz	199
5.2.3	Lastverhalten drehzahl geregelter Antriebe.	201
5.2.3.1	Lastfrequenzgang	202
5.2.3.2	Abhängigkeit des Regelgrößeneinbruches vom Lastträgheitsmoment	205
5.2.3.3	Last-Störgrößenaufschaltung	207
Steuerverfahren geregelter Wechselstromantriebe		209
6.1	Konventionelle Umrichtersteuerung von Asynchronmotoren	209
6.1.1	Unterschiede gegenüber netzgespeisten Asynchronmo- toren*	209
6.1.2	Kennzeichen des Unirichterbetriebes.	210
6.1.3	Ermittlung der Ersatzschaltungsdaten.	211
6.1.4	Kennzeichen der Frequenzsteuerung	217
6.1.5	Führungs-und Lastverhalten des ASM.	218
6.1.6	Der Asynchronmotor im geschlossenen Regelkreis	224
6.1.7	Übergangsfunktionen.	226
6.1.8	Frequenzkennlinien	229
6.1.9	Verringerung der periodischen Schwingungen.	230
6.2	Entwicklungstendenzen geregelter Käfigläuferantriebe	231
6.3	Funktionselemente.	234
6.3.1	Raumzeiger.	234
6.3.2	Raumzeiger-Dreher.	235
6.3.3	Flußverkettung	236
6.3.4	Pulsumrichter für Antriebe.	237
6.3.4.1	Energieversorgung und Gleichstromzwischen- kreis.	237
6.3.4.2	Pulswechselrichter.	240
6.4	Feldorientierte Steuerung eines ASM.	242
6.4.1	Angestrebte Motoreigenschaften.	242
6.4.2	Ermittlung der wirksamen Läuferflußkenngrößen	244
6.4.3	Zeigerdiagramm des ASM bei Feldorientierter Steuerung	245

	6.4.4	Beziehungen Betriebskenndaten/Ständerstrom	247
fc	6.5	Feldsteuer-Grundsaltungen des ASM.	250
	6.5.1	Kompensation der Läuferfuß-Gegenkopplung	250
	6.5.2	Läuferfeldbestimmung über ein Flußmodell	251
f _r	6.5.3	Funktion von Stromregelkreis und Feldregelkreis	253
	6.5.4	Übergangsfunktion des Drehzaldregelkreises.	255
	6.5.5	Phasenumwandlung und Ständerstromregelung	257
6.6		Synchronmotoren für den Stellbetrieb.	257
	6.6.1	Ersatz von Gleichstrommotoren.	257
	6.6.2	Einfluß der Motor-Hauptabmessungen auf die Antriebs- dynamik	258
	6.6.3	Motorerregung über Permanentmagnete.	259
	6.6.3.1	Hartmagnetische Werkstoffe.	260
	6.6.3.2	Bemessung der Magnete.	263
	6.6.3.3	Stoß-Entmagnetisierung von permanenterreg- ten Motoren.	264
	6.6.3.4	Permanent erregte Synchronmotoren.	264
	6.6.4	Frequenzgeregelte Führung des Synchronmotors	266
	6.6.5	Synchronmotor bei einfacher Ständerspeisung	268
6.7		Feldorientiertes Steuerverfahren von Synchronmotoren	271
	6.7.1	Flußorientierte Steuerung mit blockförmigem Wechsel- strom	271
	6.7.2	Funktion des Resolvers.	274
	6.7.3	Feldorientierte Regelung des Synchronmotors.	275
	6.7.4	Regelverhalten des feldorientiert geregelten SM	280
6.8		Gesamtschaltung des feldorientiert geregelten SM.	282
	6.8.1	Polradwinkel-Übertragung und Auswertung.	282
	6.8.2	Digitale Funktionsglieder.	282
	6.8.3	Ständerstromregelung	283
	6.8.4	Feldorientierte Steuerg.umschaltbar für SYM/ASM	283
7		Optimale Einstellung von Regelkreisen	285
	7.1	Optimierungsverfahren	285
	7.1.1	Stabilitätsprüfung nach dem Nyquist-Kriterium	285
	7.1.1.1	Regelkreis mit P-Regler.	287

7.1.1.2	Regelkreis mit I-Regler	288
7.1.1.3	Regelkreis mit PI-Regler.	289
7.1.2	Phasenrand-Optimum (PHO).	290
7.1.2.1	Optimierungsebene: Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises.	290
7.1.2.1.1	Frequenzbewertung	292
7.1.2.1.2	Übertragung F _s -Ebene \Rightarrow F-Ebene	293
7.1.2.1.3	Durchtrittsbereich	293
7.1.2.2	Integrale Regelkreise mit PT1-Gliedern	294
7.1.2.2.1	Systemvereinfachung	294
7.1.2.2.2	Einstellung der Betriebskenngrößen über K_s	294
7.1.2.2.3	Bezugssystem	296
7.1.2.2.4	Phasenrand	296
7.1.2.2.5	Durchtrittsbereich-Anpassung	298
7.1.2.2.6	Optimale Reglereinstellung bei großem Phasenrand	300
7.1.2.2.7	Optimale Reglereinstellung bei klei- nem Phasenrand	304
7.1.2.3	Integrale Regelkreise m.PT1- u. Totzeitgliedern	304
7.1.2.3.1	Auftreten von Totzeitgliedern	304
7.1.2.3.2	Totzeit-Regelstruktur.	305
7.1.2.4	Optimierung über Totzeitkompensation	307
7.1.2.4.1	Summen-Phasenrand	307
7.1.2.4.2	Reglerkonstante als Funktion von Tot- zeit und Phasenrand	309
7.1.2.5	Optimierung über Totzeitnachbildung	309
7.1.2.5.1	Nachbildungsgrenzen	309
7.1.2.5.2	Übergangsfunktionen.	310
7.1.2.5.3	Keimlimenkombination zur Reglerein- stellung	310
7.1.3	Betrags-Optimum (BTO).	314
7.1.3.1	Optimierungsprinzip.	314
7.1.3.2	Betragsoptim.Einstell.von:PI-R,egl.-(-PT1+PT1	314
7.1.3.2.1	Kompensation der kleinen Zeitkon- stanten T_K	314

	7.1.3.2.2	Betragsoptimierung ohne Kompensation.	316
	7.1.3.3	Störgrößenverhalten bei Betragsoptimierung	320
7.1.4		Optimierung doppelt integraler Regelkreise.	321
	7.1.4.1	Symmetrischer und unsymmetrischer Durchtrittsbereich	321
	7.1.4.2	Geradennäherung der Betragskennlinie	323
	7.1.4.3	Phasenkennlinie im Durchtrittsbereich	324
	7.1.4.4	Einschwingverhalten des geschlossenen Regelkreises.	328
	7.1.4.5	Verkleinerung der Anregelzeit	328
	7.1.4.6	Doppeltintegrierter Regelkreis mit Sollwertverzögerung	330
7.2		Kaskadenschaltung von Regelkreisen.	332
	7.2.1	Schaltungsprinzip.	332
	7.2.2	Eigenschaften der Kaskadenschaltung	333
	7.2.3	Einstellung des unterlagerten Regelkreises.	334
	7.2.3.1	Ersatzfunktion für den unterlagerten Regelkreis	342
	7.2.3.2	Überlagerter Drehzahl-Regelkreis.	345
	7.2.3.3	Äußerster Weg-Regelkreis.	348
7.3		Kaskadenregelung von FOS-Drehstrommotoren.	350
	7.3.1	Regelung des ASM/FOS.	351
	7.3.1.1	Regelungstechn. Unterschied GS-/FOS-ASM-Antr.	351
	7.3.1.2	Das Zeitverhalten des ASM/FOS.	352
	7.3.1.3	Die Blockschaltung des ASM/FOS.	353
	7.3.1.3.1	Unterlagerter Stromregelkreis	353
	7.3.1.3.2	Überlagerter Drehzahlregelkreis	355
	7.3.2	Regelung eines feldorientiert gesteuerten Synchronmotors	356
	7.3.2.1	Abgrenzung zwischen ASM/FOS und SYM/FOS	356
	7.3.2.2	Regelung von SYM/FOS-Stellantrieben	357
	7.3.2.2.1	Drehzahlregelkreis.	357
	7.3.2.2.2	Wegregelkreis	360

Digitale Regelung	363
8.1 Abgrenzung gegenüber analoger Regelung	363
8.1.1 Teil- und Voll-Digitalisierung	363
8.1.2 Störverhalten	364
8.1.2.1 Analoge Systeme	364
8.1.2.2 Digitale Systeme	364
8.1.3 Aufwand für digitale Regelung	366
8.2 Abtastverfahren	367
8.2.1 Rahmenbedingungen für die digitale Regelung	367
8.2.2 Abtastschalter	368
8.2.3 Summierung der Einzelimpulse	369
8.2.4 Halteglied	371
8.2.5 Übergang Differentialgleichung zu Differenzgleichung	373
8.2.6 Die Z-Transformation	374
8.2.6.1 Kennzeichnung der Impulsstellung	374
8.2.6.2 Z-Übertragungsfunktion der Regler	375
8.2.6.3 Z-Regelstrecke-Übertragungsfunktion	378
8.2.6.4 Totzeitglieder	379
8.3 Geschlossene digitale Regelkreise	380
8.3.1 Vergleich von digitalem und kontinuierlichem Regelkreis	380
8.3.2 Regelungsablauf	382
8.3.3 Rechnersimulation eines digitalen Regelkreises	386
8.3.4 Einfluß der Abtastzyklusse auf das Zeitverhalten	387
8.3.4.1 Schwach gedämpfte PT2-Regelstrecke	388
8.3.4.2 Periodisch stark gedämpfte PT2-Regelstrecke	392
8.3.4.3 Aperiodisch gedämpfte PT2-Regelstrecke	394
8.3.5 Zielstoß-(Deadbeat-)Regelung	397
8.3.5.1 Vorteile gegenüber konventioneller Regelung	397
8.3.5.2 Voraussetzungen	400
8.3.5.3 Bestimmung der Betriebsgrößen	401
8.3.5.3.1 Übergang auf die Z-Funktion	402
8.3.5.4 Ansteuerung über Sprungfunktion	404
8.3.5.4.1 Bestimmungsgleichungen	404
8.3.5.4.2 Beispiel-Konstanten	40, ^c

8.3.5.5	Uliverzögerter Zielstoß	406
8.3.5.6	Verzögerter Zielstoß bei konstanter D-Bewertung	407
8.3.5.7	Einschwingverhalten in Abhängigkeit von der Verzögerung	409
8.3.5.7.1	Übertragungsfunktionen und Regelalgorithmus.	409
8.3.5.7.2	Übergangsfunktion beim Einheitsstoß-Sollwert	411
8.3.5.8	Verzögerter Zielstoß mit variabler D-Bemessung	413
8.3.5.8.1	Ermittlung der Differenzgleichung	413
8.3.5.8.2	Wirkung einer Führungs-Sprungfunktion	414
8.3.5.8.3	Aufteilung der Bewertungs-Konstanten	415

Kommunikationsnetze für Antriebssysteme 419

9.1	Örtliche Regelung mit konstanten Koeffizienten	419
9.2	Aufgaben des Echtzeitrechners.	420
9.2.1	Zentralrechnerlösung	421
9.3	Echtzeitrechner.	422
9.3.1	Mikrotechnik	422
9.3.2	Komponenten des Echtzeitrechners.	423
9.3.3	Busstruktur.	424
9.3.4	Daten-,Adress-und Signal-Informationen.	425
9.4	Multiuser-und Multitasking-Betrieb.	426
9.4.1	Prioritätssteuerung	426
9.4.2	Echtzeitrechner-Systeme.	426
9.4.3	Hierarchisch Struktur.	426
9.4.4	Prozeßleitebene.	427
9.4.5	Zellen-Ebene.	428
9.4.6	Feld-Ebene.	428
9.4.7	Maschinen-Elektronik.	430
9.5	Echtzeit-Betriebssystem UNIX.	430
9.5.1	Abgrenzung, gegenüber PC-Anwendung	431
9.5.2	Entwicklung von UNIX	431
9.5.3	Anpassung an Echtzeitanwendung	432
9.6	Einheits-Parallelbusse.	432

9.6.1	MultibusII	434
9.6.2	VMEbus	434
9.7	Serielle Einheits-Busse	435
9.7.1	Übertragungsleitungen	435
9.7.2	Intel-BITbus	437
9.7.3	Interims	438
9.7.3.1	Zyklische Daten	438
9.7.3.2	Betriebs-Anweisungen/Informationen	439
9.7.3.3	Summenrahmen-Telegramm	439
9.7.4	PROFIBUS	441
9.7.4.1	Zielsetzung	441
9.7.4.2	Token-Steuerung	441
9.7.4.3	Master-Slave-Verbindung	442
9.7.4.4	Übertragungskapazität	443
9.7.4.5	Telegrammaufbau	443
9.7.5	PROFIBUS für die Antriebstechnik	444
9.7.5.1	Profilierung des Profibusses	444
9.7.5.2	Beispiel: Quatro-Kaltblech-Walzstraße (QKW)	446
9.7.6	Feldbus-Profibus (DP)	450
9.7.7	Feldbusentlastung	451
9.7.8	Arbeitsweise des Antriebsbusses	451
9.7.9	Telegrammauswahl	453
9.7.10	Übertragungszyklus	454
9.7.11	Stellglieder im Automatisierungssystem	454
9.7.11.1	Leistungselektronische Vielfalt	454
9.7.11.2	Überlastverhalten von Leistungsstellgliedern	455
9.7.12	Grundbetriebsfunktionen	455
9.7.12.1	Steuerwort-Aufruf	456
9.7.12.2	Statuswort-Meldungen	457
	Anhang	472 bis 498