

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Raumzeiger und Raumzeigerdifferentialgleichungen.....</b>	<b>1</b>
1.1	Begriff des Raumzeigers.....	1
1.2	Reelle Komponentenschreibweise.....	8
1.3	Transformationsbeziehungen zwischen Phasen- und Raumzeigergrößen.....	9
1.4	Raumzeigertransformation zwischen ortsfesten und rotierenden Bezugssystemen.....	12
1.5	Transformation von Phasengrößendifferentialgleichungen.....	16
1.6	Transformation von Raumzeigerdifferentialgleichungen.....	26
1.7	Leistungsberechnung mithilfe von Raumzeigern.....	27
1.8	Darstellung von Raumzeigergleichungen durch komplexe Strukturbilder.....	30
<b>2</b>	<b>Dynamisches Verhalten permanentmagneteregter Synchronmaschinen.....</b>	<b>33</b>
2.1	Grundlegende Beschreibung des Synchronmaschinenverhaltens.....	33
2.1.1	Beschreibung im statorfesten $\alpha$ - $\beta$ -Koordinatensystem bei symmetrischem Magnetkreis.....	33
2.1.2	Beschreibung im rotorfesten d-q-Koordinatensystem.....	42
2.2	Zeitkontinuierliches Zustandsraummodell der Synchronmaschine.....	47
2.3	Prinzipielle Regelungsstrategie für permanentmagneteregte Synchronmaschinen.....	51
2.3.1	Gesteuerte und geregelte Drehmomenteinprägung.....	51
2.3.2	Vorgabe der Statorstromsollwertkomponenten .....	52
2.3.3	Transformation der Statorphasenströme in das rotorfeste d-q-Koordinatensystem .....	60
2.3.4	Rücktransformation der Stromreglerausgangsgrößen in Phasengrößen .....	61
2.3.5	Gesamtstruktur des Statorstromregelkreises.....	62
2.3.6	Feldschwächung.....	64
2.3.7	Drehzahl- und Lageregelung.....	79
2.4	Synchronmaschinenspezifische Besonderheiten.....	81
2.4.1	Bremsmomenterzeugung durch Kurzschluss der Storklemmen... ..	81
2.4.2	Rastmomente und Rastmomentkompensation.....	82
2.4.3	Identifikation der Polradlage.....	84

<b>3</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Asynchronmaschinen.....</b>	<b>91</b>
3.1	Grundlegende Beschreibung des Asynchronmaschinenverhaltens.....	91
3.1.1	Beschreibung im statorfesten $\alpha$ - $\beta$ -Koordinatensystem.....	91
3.1.2	Beschreibung im rotorflussfesten d-q-Koordinatensystem.....	108
3.2	Zeitkontinuierliches Zustandsraummodell der Asynchronmaschine.....	113
3.3	Prinzipielle Regelungsstrategie für Asynchronkäfigläufermaschinen.....	118
3.3.1	Parallelen zur Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen.....	118
3.3.2	Vorgabe der Statorstromsollwertkomponenten .....	119
3.3.3	Gesamtstruktur des Statorstromregelkreises.....	120
3.3.4	Maschinenmodelle.....	120
3.3.5	Feldschwächung.....	126
3.3.6	Magnetisierungsstromregelung.....	134
3.3.7	Drehzahl- und Lageregelung.....	136
3.4	Asynchronmaschinenspezifische Besonderheiten.....	138
3.4.1	Sättigung.....	138
3.4.2	Orientierungsfehler durch eine fehlerhaft angenommene Rotorzeitkonstante.....	144
<b>4</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Netzwechselrichtern und Netzfiltern.....</b>	<b>149</b>
4.1	Grundlegende Beschreibung des Verhaltens der Netzankopplung.....	150
4.1.1	Beschreibung bei einphasiger Netzeinspeisung.....	150
4.1.2	Netzphasenfeste Beschreibung bei dreiphasiger Netzeinspeisung.....	155
4.1.3	Netzsynchrone Beschreibung bei dreiphasiger Netzeinspeisung...	160
4.2	Zeitkontinuierliches Zustandsraummodell der Netzankopplung.....	166
4.3	Raumzeigerbasierte Beschreibung bei einphasigen Netzwechselrichtern..	170
4.3.1	Grundsätzliche Überlegungen.....	170
4.3.2	Virtuelle Komplementärphase und netzphasenfeste Systembeschreibung mittels Raumzeigern.....	171
4.3.3	Netzsynchrone Beschreibung bei einphasiger Netzeinspeisung...	176
4.4	Prinzipielle Regelungsstrategie für Netzwechselrichter.....	178
4.4.1	Grundsätzliche Überlegungen.....	178
4.4.2	Vorgabe der Ausgangsstromsollwertkomponenten .....	178
4.4.3	Transformation der Netzwechselrichterausgangsströme in das netzsynchrone d-q-Koordinatensystem .....	179
4.4.4	Rücktransformation der Stromreglerausgangsgrößen in Phasengrößen .....	180
4.4.5	Gesamtstruktur des Ausgangsstromregelkreises.....	181
4.4.6	Zwischenkreisspannungsregelung.....	183
4.4.7	Dämpfungsregler.....	184

<b>5</b>	<b>Regelung der Ausgangsströme von Motor- und Netzwechselrichtern..</b>	<b>187</b>
5.1	Betrachtete leistungselektronische Stellglieder und Steuerstrategien.....	187
5.2	Zeitdiskrete Beschreibung von Stromregelstrecken.....	188
5.2.1	Grundsätzliche Betrachtungen anhand eines einführenden Beispiels .....	188
5.2.2	Einfluss des Stromerfassungszeitpunkts auf die Regelgüte.....	192
5.2.3	Einfluss des Stromerfassungszeitpunkts auf den Strommittelwert	194
5.2.4	Einfluss der Rechenzeit auf die Modellbildung.....	197
5.2.5	Verallgemeinerung auf ohmsch-induktive und dreiphasige Lasten.....	198
5.2.6	Die permanentmagneterregte, magnetisch unsymmetrische Synchronmaschine als Sonderfall.....	204
5.2.7	Zeitdiskrete Maschinenmodelle der Asynchronkäfigläufermaschine.....	214
5.3	Stromreglerentwurf.....	217
5.3.1	Grundsätzliche Überlegungen.....	217
5.3.2	Symmetrischer Stromreglerentwurf ohne Berücksichtigung einer Rechentotzeit.....	218
5.3.3	Symmetrischer Stromreglerentwurf bei Berücksichtigung einer Rechentotzeit von einem Abtastintervall.....	227
5.3.4	Stellgrößenbegrenzung und Stromsollwertkorrektur.....	235
5.3.5	Verriegelungstotzeit und deren Kompensation.....	257
5.3.6	Achsenunsymmetrischer Stromreglerentwurf .....	263
5.3.7	Stromreglerentwurf für den Sonderfall einer permanentmagneterregten, magnetisch unsymmetrischen Synchronmaschine.....	278
5.3.8	Berücksichtigung von Sättigungseffekten beim Stromreglerentwurf für die permanentmagneterregte Synchronmaschine.....	284
5.3.9	Verbesserung des Führungsverhaltens durch Sollwertfilterung....	295
5.3.10	Anpassung des Stromreglerentwurfs an Systeme mit Überabtastung.....	304
<b>6</b>	<b>Entwurf überlagerter Regler.....</b>	<b>315</b>
6.1	Allgemeine Betrachtungen.....	315
6.2	Drehzahlreglerentwurf.....	316
6.2.1	Klassischer Drehzahlregler.....	316
6.2.2	Drehzahlregler mit Referenzmodell.....	323
6.2.3	Dynamische Vorsteuerung des Querstromsollwerts.....	327
6.2.4	Drehzahlzustandsregler für Antriebe mit starrer Mechanik.....	333
6.2.5	Drehzahlzustandsregler für Zweimassenschwinger.....	350
6.2.6	Stellgrößenbegrenzung und Drehzahlsollwertkorrektur.....	360
6.2.7	Drehzahlsollwertfilter.....	375
6.2.8	Lastmomentaufschaltung.....	385
6.3	Lagereglerentwurf.....	387

6.4	Zwischenkreisspannungsreglerentwurf.....	397
6.4.1	Modell der Zwischenkreisspannungsregelstrecke.....	397
6.4.2	Klassischer Zwischenkreisspannungs-P-Regler mit Leistungsvorsteuerung.....	398
6.4.3	Klassischer Zwischenkreisspannungs-PI-Regler ohne Leistungsvorsteuerung.....	401
6.4.4	Zwischenkreisspannungszustandsregler.....	404
<b>7</b>	<b>Beobachterentwurf.....</b>	<b>405</b>
7.1	Drehzahl- und Lastmomentbeobachter.....	405
7.1.1	Drehzahl- und Lastmomentbeobachter dritter Ordnung für Antriebe mit starrer Mechanik.....	406
7.1.2	Drehzahl- und Lastmomentbeobachter zweiter Ordnung für Antriebe mit starrer Mechanik.....	420
7.1.3	Drehzahl- und Lastmomentbeobachter erster Ordnung für Antriebe mit starrer Mechanik.....	429
7.1.4	Drehzahl- und Lastmomentbeobachter für Zweimassen- schwinger.....	430
7.2	Gegenspannungsbeobachter.....	436
7.3	Zwischenkreisspannungs- und Leistungsbeobachter.....	442
7.3.1	Zwischenkreisspannungs- und Leistungsbeobachter dritter Ordnung.....	442
7.3.2	Zwischenkreisspannungs- und Leistungsbeobachter zweiter Ordnung.....	446
<b>8</b>	<b>Ermittlung von Maschinenparametern.....</b>	<b>449</b>
8.1	Einführung und Themenabgrenzung.....	449
8.2	Abschätzung der Maschinenparameter aus den Typenschilddaten.....	450
8.2.1	Ermittlung der Parameter der Asynchronkäfigläufermaschine aus den Typenschilddaten.....	450
8.2.2	Ermittlung der Parameter der permanentmagneterregten Synchronkäfigläufermaschine aus den Typenschilddaten.....	464
8.3	Maschinenparameteridentifikation.....	467
8.3.1	Identifikation der totalen Streuinduktivität bzw. der Statorinduktivität.....	468
8.3.2	Identifikation des Statorwiderstands.....	472
8.3.3	Identifikation der Statorinduktivität der Asynchronkäfigläufer- maschine bei drehender Maschine.....	473
8.3.4	Identifikation des Trägheitsmoments.....	474
	<b>Anhang.....</b>	<b>481</b>
A.1	Zeitkontinuierliche Zustandsgleichungen.....	481
A.2	Modaltransformation der zeitkontinuierlichen Zustandsgleichungen.....	487
A.3	Lösung der Zustandsdifferentialgleichungen und Stabilität.....	493
A.4	Diskretisierung der Zustandsgleichungen.....	497
A.5	Modaltransformation und Stabilität eines zeitdiskreten Systems.....	499

---

A.6	Transformation der Zustandsgleichungen auf Regelungsnormalform.....	503
A.7	Zustandsreglerentwurf durch Vorgabe der Regelungseigenwerte.....	509
A.7.1	Vorbetrachtungen.....	509
A.7.2	Bestimmung der Vorfiltermatrix.....	511
A.7.3	Reglerentwurf für Regelstrecken mit einer einzigen Stellgröße.....	513
A.7.4	Reglerentwurf für Regelstrecken mit ebenso vielen Stellgrößen wie Zustandsgrößen.....	515
A.7.5	PI-Zustandsreglerentwurf bei schon vorhandenem P-Zustandsregler.....	516
A.7.6	Zustandsreglerentwurf für eine Regelstrecke mit Rechentotzeit bei schon vorhandenem Zustandsregler für das System ohne Rechentotzeit.....	520
A.7.7	Störgrößenaufschaltung bei Regelstrecken mit ebenso vielen Stellgrößen wie Zustandsgrößen.....	523
A.8	Transformation der Zustandsgleichungen auf Beobachtungsnormalform..	525
A.9	Beobachterentwurf durch Vorgabe der Beobachtereigenwerte.....	529
A.9.1	Vorbetrachtungen.....	529
A.9.2	Berücksichtigung von Störgrößen.....	532
A.9.3	Beobachterentwurf für Regelstrecken mit einer einzigen Ausgangsgröße.....	533
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>537</b>
	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>549</b>