

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Raumzeiger und Raumzeigerdifferentialgleichungen..... | 1 |
| 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 |
| 2 | Dynamisches Verhalten permanentmagneterregter Synchronmaschinen..... | 33 |
| 2.1 | Grundlegende Beschreibung des Synchronmaschinenverhaltens..... | 33 |
| 2.1.1 | Beschreibung im statorfesten α - β -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 permanentmagneterregte 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 | Bremsmomentenerzeugung durch Kurzschluss der Statorklemmen...81 | |
| 2.4.2 | Rastmomente und Rastmomentkompensation..... | 82 |
| 2.4.3 | Identifikation der Polradlage..... | 84 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3 | Dynamisches Verhalten von Asynchronmaschinen..... | 91 |
| 3.1 | Grundlegende Beschreibung des Asynchronmaschinenverhaltens..... | 91 |
| 3.1.1 | Beschreibung im statorfesten α - β -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 |
| 4 | Dynamisches Verhalten von Netzwechselrichtern und Netzfiltern..... | 149 |
| 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 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5 | Regelung der Ausgangsströme von Motor- und Netzwechselrichtern.. | 187 |
| 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 |
| 6 | Entwurf überlagerter Regler..... | 315 |
| 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 |
| 7 | Beobachterentwurf..... | 405 |
| 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 |
| 8 | Ermittlung von Maschinenparametern..... | 449 |
| 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 |
| | Anhang..... | 481 |
| 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 |
| | Literaturverzeichnis..... | 537 |
| | Stichwortverzeichnis..... | 549 |