

Inhalt

| | |
|--------------|---|
| Vorwort..... | 5 |
| 1 | Entwicklungsgeschichte geregelter Elektroantriebe..... 13 |
| 2 | Elektromechanische Grundlagen..... 21 |
| 2.1 | Rotation und Translation..... 22 |
| 2.2 | Vierquadrantbetrieb..... 27 |
| 2.3 | Elektrische Maschinen und Stromrichter..... 29 |
| 2.3.1 | Gleichstromantriebe..... 30 |
| 2.3.2 | Asynchronantriebe..... 35 |
| 2.3.3 | Synchronantriebe..... 42 |
| 2.4 | Dezentrales Energiemanagement..... 46 |
| 3 | Konventioneller Reglerentwurf im Frequenzbereich..... 49 |
| 3.1 | Zustandsgleichungen und Laplace-Transformation..... 50 |
| 3.2 | Regelungstechnisches Strukturbild..... 53 |
| 3.3 | Übertragungsfunktionen und Stabilität..... 54 |
| 3.3.1 | Führungsverhalten..... 55 |
| 3.3.2 | Störverhalten..... 60 |
| 3.4 | Klassische Kaskadenregelung..... 61 |
| 3.4.1 | Frequenzkennlinien..... 63 |
| 3.4.2 | Unterlagerter Stromregelkreis..... 67 |
| 3.4.2.1 | Bode-Diagramm..... 69 |
| 3.4.2.2 | Nichols-Diagramm..... 71 |
| 3.4.3 | Überlagerter Drehzahlregelkreis..... 73 |
| 3.4.4 | Berechnung der Reglerparameter..... 78 |
| 3.4.5 | Technische Realisierung der Kaskadenregelung..... 81 |
| 3.4.5.1 | Analoge Regelstruktur mit Operationsverstärkern..... 82 |
| 3.4.5.1.1 | Beschaltung eines PI-Reglers..... 82 |
| 3.4.5.1.2 | Aufbau und Dynamik..... 83 |
| 3.4.5.2 | Digitale Regelstruktur mit Mikroprozessoren..... 88 |
| 3.4.5.2.1 | PI-Algorithmus..... 89 |
| 3.4.5.2.2 | Software-Timing..... 92 |
| 3.4.5.2.3 | Hardware-Aufbau..... 97 |
| 3.5 | Überlagerte Positionsregelung..... 100 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 4 | Modellgestützte Regeltheorien im Zeitbereich | 103 |
| 4.1 | Antriebskonzepte im Zustandsraum | 103 |
| 4.1.1 | Zustandsgleichungen und Matrizendarstellung..... | 106 |
| 4.1.1.1 | Steuerbarkeit | 109 |
| 4.1.1.2 | Beobachtbarkeit..... | 110 |
| 4.1.1.3 | Beobachtungsnormalform | 111 |
| 4.1.2 | Entwurf von Zustandsbeobachtern | 117 |
| 4.1.2.1 | Zustandsbeobachter voller Ordnung..... | 121 |
| 4.1.2.2 | Zustandsbeobachter reduzierter Ordnung | 124 |
| 4.1.3 | Zustandsvektorrückführung..... | 127 |
| 4.1.3.1 | Reglerentwurf durch Polvorgabe | 128 |
| 4.1.3.2 | Zustandsregelung eines Gleichstromantriebs..... | 130 |
| 4.2 | Antriebskonzepte im Binärmode | 133 |
| 4.2.1 | Entwurf binärer Beobachter..... | 137 |
| 4.2.1.1 | Periodische Zustandsgrößen | 138 |
| 4.2.1.2 | Fourier-Reihenentwicklung | 140 |
| 4.2.1.3 | Mittelwerte welliger Zustandsgrößen | 143 |
| 4.2.2 | Binäre Beobachter in netzgeführten Stromrichtern | 147 |
| 4.2.2.1 | Wechselstrombrückenschaltung (B2)..... | 149 |
| 4.2.2.1.1 | Binärer Gleichspannungsbeobachter..... | 151 |
| 4.2.2.1.2 | Binärer Gleichstrombeobachter..... | 158 |
| 4.2.2.1.3 | Binärer Netzstrombeobachter | 165 |
| 4.2.2.2 | Drehstrombrückenschaltung (B6)..... | 170 |
| 4.2.3 | Binäre Beobachter in kommutierungslosen Stromrichtern..... | 176 |
| 4.2.3.1 | Binärer Wechselspannungsbeobachter..... | 178 |
| 4.2.3.2 | Binärer Wechselstrombeobachter..... | 181 |
| 4.2.4 | Binäre Beobachter in selbstgeführten Stromrichtern | 184 |
| 4.2.4.1 | Binärer Chopper-Spannungsbeobachter..... | 184 |
| 4.2.4.2 | Binärer Chopper-Strombeobachter | 190 |
| 4.2.4.3 | Binärer Strangstrombeobachter | 194 |
| 4.3 | Antriebskonzepte mit Raumzeigern..... | 197 |
| 4.3.1 | Raumzeigermodulation in Wechselrichtern..... | 198 |
| 4.3.2 | Raumzeigermodell der Asynchronmaschine..... | 204 |
| 5 | Antriebskonzepte mit Fuzzy-Logik | 209 |
| 5.1 | Fuzzifizierung von Prozessgrößen..... | 212 |
| 5.2 | Interferenz und Regelbasis..... | 214 |
| 5.3 | Defuzzifizierung der Stellgröße | 217 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | Antriebsbeispiele für die Low-Cost-Automation | 221 |
| 6.1 | Vierquadrant-Gleichstromantrieb | 222 |
| 6.1.1 | Sensorlose Ankerstromregelung | 224 |
| 6.1.1.1 | Linearisierung im Lückbetrieb | 224 |
| 6.1.1.2 | Synchronisation der Steuerimpulse | 227 |
| 6.1.1.3 | Umschaltlogik | 229 |
| 6.1.1.4 | Dynamisches Verhalten | 230 |
| 6.1.2 | Sensorlose Drehzahlregelung | 232 |
| 6.1.2.1 | Drehzahlbeobachter | 233 |
| 6.1.2.2 | Dynamisches Verhalten | 235 |
| 6.2 | Vierquadrant-Chopper-Antrieb | 237 |
| 6.3 | Einquadrant-Drehstromantrieb | 241 |
| 6.3.1 | Spannungssteuerung der Asynchronmaschine | 241 |
| 6.3.2 | Dynamisches Verhalten | 244 |
| 6.3.3 | Sensorlose Festwert-Stromregelung | 245 |
| 6.4 | Vierquadrant-Drehstromantrieb | 246 |
| 6.4.1 | Frequenzsteuerung der Asynchronmaschine | 247 |
| 6.4.1.1 | Steuerkennlinie für konstanten Hauptfluss | 249 |
| 6.4.1.2 | Dynamisches Verhalten | 250 |
| 6.4.1.3 | Sensorlose Frequenzsteuerung | 252 |
| 6.4.2 | Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine | 253 |
| 6.4.2.1 | Vektorstromregelung | 254 |
| 6.4.2.2 | Drehzahlregelkreis | 258 |
| 6.4.2.3 | Dynamisches Verhalten | 259 |
| 6.4.2.4 | Sensorlose Vektorstromregelung | 260 |
| 6.4.3 | Feldorientierte Regelung der Synchronmaschine | 261 |
| 6.4.3.1 | Zweipunkt-Stromregelung | 263 |
| 6.4.3.2 | Dynamisches Verhalten | 265 |
| 6.5 | Sensorlose Energierückspeisung in Frequenzumrichtern | 267 |
| 6.6 | Sensorlose Temperaturregelung in elektrischen Verbrauchern | 269 |
| 6.7 | Redundante Regelung elektrischer Antriebe | 272 |
| 7 | Genauigkeit digitaler Regelungen | 277 |
| 7.1 | Mess- und Abtastfehler | 277 |
| 7.2 | Rechenungenauigkeiten | 280 |
| 7.3 | Parameterschwankungen und Modellfehler | 284 |
| 8 | Verzeichnis der Formelzeichen | 287 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9 | Mathematischer Anhang | 293 |
| 9.1 | Regeln der komplexen Rechnung. | 293 |
| 9.2 | Trigonometrische Umformungen | 294 |
| 9.3 | Lösungsintegrale | 297 |
| 9.4 | Ableitungen (Differenziale) | 298 |
| 9.5 | Laplace-Transformation (Korrespondenzen) | 300 |
| 9.6 | Matrizenoperationen | 302 |
| 9.7 | Fourier-Transformation periodischer Größen. | 304 |
| 9.8 | Arithmetische und effektive Mittelwerte | 305 |
| | | |
| 10 | Englische Fachausdrücke | 307 |
| 10.1 | Deutsch – Englisch | 307 |
| 10.2 | Englisch – Deutsch | 323 |
| | | |
| 11 | Literatur | 339 |
| | | |
| 12 | Übungs- und Testaufgaben | 345 |
| 12.1 | Konventionelle Regelungstechnik (KRT) | 345 |
| 12.2 | Moderne, modellgestützte Regelungstechnik (MRT) | 350 |
| 12.3 | Antriebsregelungen aus der Praxis (ATR) | 354 |
| | | |
| | Stichwortverzeichnis | 361 |