Elektrische Antriebe - Grundlagen

Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben

Bearbeitet von
Dierk Schröder

1. Auflage 2013. Buch. XXV, 775 S. Softcover
ISBN 978 3 642 30470 5
Format (B x L): 16,8 x 24 cm
Gewicht: 1320 g

Weitere Fachgebiete > Technik > Technik Allgemein

Zu Leseprobe

schnell und portofrei erhältlich bei

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.
Einführung

1 Antriebsanordnungen: Grundlagen

1.1 Mechanische Grundgesetze ........................................... 9
1.1.1 Analogien zwischen Translation und Rotation ..................... 9
1.1.2 Übertragungsstellen und Getriebe .................................... 13
1.1.3 Drehmomentbilanz im Antriebssystem ................................. 17
1.1.4 Normierung der Gleichungen und Differentialgleichungen ....... 18
1.2 Zeitliches Verhalten des rotierenden mechanischen Systems ...... 21
1.2.1 Analytische Behandlung ............................................. 21
1.2.2 Graphische Behandlung von Bewegungsvorgängen ................. 24
1.2.3 Numerische Lösung über Differenzengleichung ..................... 27
1.3 System Arbeitsmaschine–Antriebsmaschine .......................... 28
1.3.1 Stationäres Verhalten der Arbeitsmaschine ........................ 28
1.3.1.1 Widerstandsraum \( M_W = \text{const.} \) .......................... 28
1.3.1.2 Widerstandsraum \( M_W = f(N, V) \) ............................ 29
1.3.1.3 Widerstandsraum \( M_W = f(\varphi) \) ........................... 30
1.3.1.4 Widerstandsraum \( M_W = f(r) \) ............................... 30
1.3.1.5 Widerstandsraum \( M_W = f(t) \) ............................... 31
1.3.2 Stationäres Verhalten der Antriebsmaschinen: \( M_M = f(N, \varphi) \) .... 31
1.3.2.1 Asynchrones bzw. Nebenschluß-Verhalten ......................... 32
1.3.2.2 Konstant-Moment-Verhalten .................................... 33
1.3.2.3 Synchrones Verhalten ........................................... 33
1.3.2.4 Beispiel: Gleichstrom–Nebenschlußmaschine ..................... 34
1.3.3 Statische Stabilität im Arbeitspunkt .................................. 36
1.3.3.1 Graphische Methoden ........................................... 36
1.3.3.2 Rechnerische Stabilitätsprüfung über die linearisierte Differentialgleichung im Arbeitspunkt ......................... 37
1.3.3.3 Stabilitätsprüfung über die Laplace-Transformation ................ 38
1.3.4 Benessung der Antriebsanordnung ................................... 40
1.3.4.1 Arbeitsmaschinen ............................................. 40
1.3.4.2 Antriebsmaschinen ............................................. 41
II Inhaltsverzeichnis

2 Verluste und Erwärmung im Antriebssystem

2.1 Verluste an der Übertragungsstelle ........................................... 44
2.1.1 Leistungsbilanz ................................................................. 44
2.1.2 Verlustarbeit an der Übertragungsstelle „Motor“ ..................... 47
2.1.3 Verluste beim Beschleunigen ................................................. 49
2.2 Erwärmung elektrischer Maschinen ............................................. 52
2.2.1 Verlustleistung und Temperatur .............................................. 52
2.2.2 Rechengang: mathematische Grundlagen ................................ 56
2.2.3 Strombelastung und Verlustleistung ....................................... 57
2.2.4 Normen und Betriebsarten .................................................... 59
2.2.4.1 Betriebsarten und Bemessungsdaten .................................. 61
2.2.4.2 Dauerbetrieb (Betriebsart S1) .......................................... 62
2.2.4.3 Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2) ...................................... 62
2.2.4.4 Aussetzbetrieb (Betriebsart S3) ........................................ 63
2.2.4.5 Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs (Betriebsart S4) 65
2.2.4.6 Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S5) ..... 66
2.2.4.7 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung (Betriebsart S6) ............................................................ 66
2.2.4.8 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S7) ............................................................ 66
2.2.4.9 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahländerungen (Betriebsart S8) ..................................................... 68
2.2.4.10 Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Drehzahländerung (Betriebsart S9) .................................................... 68
2.2.4.11 Betrieb mit diskretem konstantem Belastungszustand (Betriebsart S10) ................................................................. 69
2.2.5 Mittelwertbetrieb bei periodischer Belastung ................................ 69
2.3 Maschinen mit mehreren Bemessungsbetrieben ............................. 72
2.4 Aufstellungshöhe, Temperatur und Kühlmittel ................................ 72
2.4.1 Belüftung und Kühlung .......................................................... 73
2.4.2 Elektrische Bedingungen ....................................................... 74

3 Gleichstrommaschine

3.1 Einführung ................................................................. 80
3.2 Theorie der Felder .......................................................... 81
3.2.1 Elektrostatisches Feld, Coulomb-Kraft ................................ 82
3.2.2 Magnetfeld - Lorentzkraft .................................................. 84
3.2.3 Magnetfeld - Induktionsspannung ...................................... 87
3.2.3.1 Wechselwirkungen zwischen Ladungen – Lenz’sche Regel ...... 90
3.2.4 Magnetische Feldstärke ...................................................... 90
3.2.5 Magnetische Flussdichte .................................................... 94
3.2.5.1 Lorentzkraft ................................................................. 94
3.2.5.2 Materialabhängigkeit der Lorentzkraft bzw. magnetischen Flussdichte .......................................................... 95
3.2.5.3 Magnetische Flussdichte in nicht ferromagnetischen Materialien ................................................................. 100
3.2.5.4 Magnetische Flussdichte in ferromagnetischen Materialien (Hysterese Kurve) .................................................. 100
3.2.6 Wichtige Eigenschaften des magnetischen Feldaes für das Verständnis elektrischer Maschinen ......................... 106
3.2.6.1 Magnetfeldbindende Wirkung ferromagnetischer Materialien ........................................................................ 106
3.2.6.2 Quellenfreiheit des magnetischen Feldaes ......................................................................................... 107
3.2.6.3 Kraft auf bewegte Ladungen im Luftspalt zwischen ferromagnetischen Materialien ...................................... 108
3.2.6.4 Oberflächenströme ................................................................................................................ 109
3.2.6.5 Wechselwirkung zwischen ferromagnetischen Werkstoffen ................................................................. 110
3.2.6.6 Magnetischer Kreis .............................................................................................................. 114
3.2.6.7 Grenzflächenkräfte: magnetischer Querdruck und Längszug ............................................................... 120
3.2.6.8 Brechungsgesetze für magnetische Feldlinien .................................................................................. 126
3.2.7 Zusammenfassung ........................................................................................................................................ 137
3.3 Physikalisches Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine .................................................................................. 138
3.3.1 Prinzip der Momenterzeugung – Ableitung der Momenten-Grundgleichung .................................................... 139
3.3.1.1 Betrachtung der Gleichstrommaschine als magnetischen Kreis ........................................................................ 139
3.3.1.2 Kommutator ............................................................................................................................................ 143
3.3.1.3 Ableitung der Momenten-Grundgleichung .................................................................................. 147
3.3.1.4 Rotor mit Nuten ................................................................................................................................ 148
3.3.2 Beschleunigung des Rotors – Ableitung der Mechanik-Grundgleichung ....................................................... 152
3.3.3 Entstehung einer Gegenspannung – Ableitung der Bewegungsinduktions-Grundgleichung ......................... 152
3.3.4 Eigeninduktivität des Rotors – Ableitung der Ankerkreis-Grundgleichung ......................................................... 155
3.4 Signalflußplan der Gleichstrom–Nebenschlußmaschine .................................................................................. 157
3.4.1 Ankerkreis .................................................................................................................................................. 157
3.4.2 Feldkreis, Erregerkreis .......................................................................................................................... 163
3.4.3 Zusammenfassung von Ankerkreis und Erregerkreis .................................................................................. 170
3.5 Signalflußpläne, Übergangsverhalten ............................................................................................................... 176
3.5.1 Führungsverhalten und Führungs–Übertragungsfunktion ........................................................................ 176
3.5.2 Lastverhalten und Stör–Übertragungsfunktion .................................................................................. 179
3.5.3 Einfluß von ψ auf n (Feldschwächung) ........................................................................................................ 179
3.5.4 Zusammengefaßter Plan (linearisiert, überlagert, vereinfacht) ............................................................... 182
3.6 Steuerung der Drehzahl .................................................................................................................................. 184
3.6.1 Drehzahlsteuerung durch die Ankerspannung .................................................................................. 184
3.6.2 Steuerung durch den Fluß .................................................................................................................. 186
3.6.3 Steuerung durch Ankerspannung und Feld .......................................................................................... 187
Stellglieder und Regelung für die Gleichstrommaschine

4

Einleitung Leistungselektronik
Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler
Tiefsetzsteller
Steuerverfahren für Gleichstromsteller
Pulsweitensteuerung (T konstant)
Pulsfolgesteuerung (T variabel)
Hysterese-Regelung des Gleichstromstellers
Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb von Gleichstrommaschinen
Prinzip des Tiefsetzstellers (Buck-Wandler)
Prinzip des Hochsetzstellers (Boost-Wandler)
Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb
Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb
Zwei-Quadrant-Betrieb
Vier-Quadrant-Betrieb
Antriebssystem Gleichstromsteller–Gleichstrommaschine
Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder
Grundprinzip
Dreiphasen-Mittelpunktschaltung
Dreiphasen-Brückenschaltung (B6-Schaltung)
Netzstrom, Verschiebungs faktor \( \cos \varphi_1 \) und Leistungs faktor \( \lambda \)
Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine
Verfahren zur Drehmomentumkehr bei Stromrichtern
Drehmomentumkehr durch Wenden des Ankerstroms
Drehrichtungsumkehr eines Gleichstromantriebes, der von einem kreisstromfreien Umkehrstromrichter gespeist wird
Drehmomentumkehr durch Wenden des Feldstroms
Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine
Ankerstromregelung
5 Drehfeldmaschinen

4.4.2 Drehzahlregelung ........................................... 265
4.4.3 Querverweise Gleichstrommaschine - Regelung ........ 268
4.4.4 Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen ........ 271

5 Drehfeldmaschinen .............................................. 277

5.1 Einführung ...................................................... 277
5.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen ................ 278
5.2.1 Erzeugung eines Drehfeldes im Luftspalt durch den Stator 279
5.2.2 Spannungsinduktion im Rotor ............................. 290
5.2.3 Stromaufbau im Rotor ..................................... 295
5.2.4 Entstehung des Drehmoments, stationäre Drehzahl-Drehmoment-
Kennlinie ........................................................... 297
5.2.5 Höhere Polpaarzahlen ...................................... 299
5.3 Raumzeiger-Darstellung ........................................ 301
5.3.1 Definition eines Raumzeigers ............................ 302
5.3.2 Rücktransformation auf Momentanwerte ................. 305
5.3.3 Koordinatensysteme .......................................... 306
5.3.4 Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem .... 308
5.4 Allgemeine Drehfeldmaschine ................................ 309
5.5 Asynchronmaschine: Signalflußplan mit Verzögerungsgliedern . 323
5.6 Asynchronmaschine im stationären Betrieb ................ 325
5.6.1 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine . 326
5.6.2 Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb ......... 333
5.6.2.1 Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine ........... 333
5.6.2.2 Stromortskurve des Statorstroms ....................... 334
5.7 Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb .................. 338
5.7.1 Steuerverfahren bei Statorflußorientierung ............... 339
5.7.2 Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung ............... 350
5.7.3 Asynchronmaschine am Umrichter mit eingeprägtem Statorstrom . 359

6 Synchronmaschine .................................................. 360

6.1 Funktionsweise von Synchronmaschinen .................. 360
6.2 Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung .... 365
6.2.1 Beschreibendes Gleichungssystem ......................... 365
6.2.2 Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung . 370
6.2.3 Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine –
Spannungseinprägung ............................................. 374
6.2.4 Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Stromeinprägung 378
6.2.5 Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine .... 380
6.3 Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung ............... 382
6.4 Synchron-Vollpolmaschine .................................. 386
6.4.1 Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußpläne .... 386
6.4.2 Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine ........ 392
<table>
<thead>
<tr>
<th>XXII</th>
<th>Inhaltsverzeichnis</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>6.4.3</td>
<td>Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung</td>
</tr>
<tr>
<td>6.5</td>
<td>Permanentmagneterregte Maschinen</td>
</tr>
<tr>
<td>7</td>
<td>Transversalflußmaschine</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. H. Weh</td>
</tr>
<tr>
<td>7.1</td>
<td>Die neueren Entwicklungen in der Antriebstechnik</td>
</tr>
<tr>
<td>7.2</td>
<td>Magnetkreise bei Longitudinalfluß (LF)- und Transversalfluß (TF)-Anordnung</td>
</tr>
<tr>
<td>7.2.1</td>
<td>Longitudinalfluß-Anordnung (LF) mit Permanentmagneten</td>
</tr>
<tr>
<td>7.2.2</td>
<td>Zahlenbeispiel</td>
</tr>
<tr>
<td>7.3</td>
<td>Magnetkreise der Transversalfluß-Familie (TF)</td>
</tr>
<tr>
<td>7.3.1</td>
<td>Übergang von der Flachmagnet- zur Sammleranordnung</td>
</tr>
<tr>
<td>7.3.2</td>
<td>Zu erwartende TFM-Ergebnisse</td>
</tr>
<tr>
<td>8</td>
<td>Geschaltete Reluktanzmaschinen</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Prof. Dr. H. Bausch, Universität d. Bundeswehr München</td>
</tr>
<tr>
<td>8.1</td>
<td>Einleitung</td>
</tr>
<tr>
<td>8.2</td>
<td>Aufbau</td>
</tr>
<tr>
<td>8.3</td>
<td>Betriebsverhalten</td>
</tr>
<tr>
<td>8.4</td>
<td>Energieumwandlung</td>
</tr>
<tr>
<td>8.5</td>
<td>Stromrichterschaltungen</td>
</tr>
<tr>
<td>8.6</td>
<td>Steuerung und Regelung</td>
</tr>
<tr>
<td>9</td>
<td>Linearmotoren</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Prof. Dr. G. Henneberger, RWTH Aachen</td>
</tr>
<tr>
<td>9.1</td>
<td>Einführung</td>
</tr>
<tr>
<td>9.2</td>
<td>Technik von Linearmotoren</td>
</tr>
<tr>
<td>9.3</td>
<td>Industrielle Anwendungsmöglichkeiten</td>
</tr>
<tr>
<td>9.4</td>
<td>Hochgeschwindigkeits-Anwendungen</td>
</tr>
<tr>
<td>10</td>
<td>Lagerlose Permanentmagnetmotoren</td>
</tr>
</tbody>
</table>
|       | Prof. Dr. W. Amrhein; Dr. S. Silber
|       | ACCM/ Johannes Kepler Universität Linz |
| 10.1  | Einleitung | 469 |
| 10.2  | Kraft- und Drehmomentberechnung | 473 |
| 10.2.1 | Magnetische Koenergie | 474 |
| 10.2.2 | Maxwellscher Spannungstensor | 474 |
| 10.2.2.1 | Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen | 478 |
| 10.2.2.2 | Drehmomentberechnung | 480 |
| 10.2.2.3 | Kraftberechnung | 481 |
| 10.2.2.4 | Interpretation der Ergebnisse | 482 |
11 Kleinantriebe

11.1 Schrittmotoren
11.1.1 Einführung, Funktionsprinzip
11.1.2 Grundtypen von Schrittmotoren
11.1.2.1 Reluktanz-Schrittmotor
11.1.2.2 Permanentmagneterregter Schrittmotor
11.1.2.3 Hybrid-Schrittmotor
11.1.3 Gegenüberstellung Drehfeld–Schrittfeld
11.1.4 Betriebskennlinien, Betriebsverhalten
11.1.4.1 Statischer Drehmomentverlauf
11.1.4.2 Statisches Lastverhalten
11.1.4.3 Einzelschritt-Fortschaltung
11.1.4.4 Grenzkennlinien, Betriebsbereiche
11.1.5 Ansteuerung, Leistungselektronik
11.1.5.1 Ersatzschaltbild eines Motorstrangs
11.1.5.2 Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen
11.1.5.3 Leistungstreiber
11.1.5.4 Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb
11.1.5.5 Bestromungstabelle
11.1.6 Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler
11.1.7 Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen
11.1.7.1 Parametrische Anregung
11.1.7.2 Dämpfung
11.1.8 Modellbildung
11.1.9 Auslegung von Schrittmotorantrieben
11.1.9.1 Ermittlung der Startgrenzfrequenz
11.1.9.2 Berechnung von linearen Frequenzrampen
11.2 Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine

12 Umrichterantriebe

12.1 Direktumrichter
12.1.1 Matrix-Umrichter
12.2 Untersynchrone Stromrichterkaskade (USK)
12.2.1 Querverweise untersynchrone Stromrichterkaskade, USK
12.3 Stromrichtermotor
12.3.1 Prinzipielle Funktion
12.3.2 Lastgeführte Kommutierung
12.3.3 Anfahrvorgang
12.3.4 Drehmomentpendelungen
XXIV Inhaltsverzeichnis

| 12.3.5 | Regelung des Stromrichtermotors ........................................... | 561 |
| 12.3.6 | Querverweise Stromrichtermotor ........................................... | 563 |
| 12.4   | Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenfolgelöschung und einge-prägtem Strom ........................................... | 564 |
| 12.4.1 | Prinzipielles Systemverhalten ........................................... | 564 |
| 12.4.2 | Kommutierung des selbstgeführten Stromrichters ....................... | 566 |
| 12.4.3 | Steuer- und Regelverfahren ........................................... | 575 |
| 12.4.4 | Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter .................. | 577 |
| 12.4.5 | Querverweise I-Umrichter ........................................... | 578 |
| 12.5   | Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis .......... | 580 |
| 12.5.1 | Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung .......................... | 581 |
| 12.5.2 | Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung (Pulsumrichter) .......... | 585 |
| 12.5.3 | Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern ................................ | 588 |
| 12.5.3.1 | Zweipunktregelung (Prinzipdarstellung) ................................ | 588 |
| 12.5.3.2 | Pulsweitenmodulation (PWM) ........................................... | 589 |
| 12.5.3.3 | Raumzeiger-Darstellung ........................................... | 595 |
| 12.5.4 | Bewertung „U-Umrichter - I-Umrichter“ .................................. | 597 |
| 12.5.5 | Mehrpunkt-Wechselrichter ........................................... | 600 |
| 12.5.6 | Leistungsfaktor-Korrektur (PFC) ........................................... | 606 |

| 13 | Grundsätzliche Überlegungen zur Regelung von Drehfeldmaschinen .......... | 607 |
| 13.1 | Entkopplung ........................................... | 608 |
| 13.1.1 | Querverweise Entkopplung ........................................... | 611 |
| 13.2 | Feldorientierung ........................................... | 612 |
| 13.2.1 | Querverweise Feldorientierung ........................................... | 616 |

Übungsaufgaben 618

Prüfungsaufgaben 659

Variablenübersicht 686

Literaturverzeichnis 702

Kompendium ........................................... 702
Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher) ........................................... 705
Elektroantrieb allgemein ........................................... 710
Leistungshalbleiter ........................................... 711
Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung ........................................... 714
Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler ........................................... 715
Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung ........................................... 717
Netzgeführte Stromrichter: Regelung ........................................ 719
Direktumrichter ........................................................................ 724
Untersynchrone Kaskade (USK) .................................................. 726
Stromrichtermotor ....................................................................... 728
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter) ................................ 730
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter) ....................... 732
Asynchronmaschine: Regelung ................................................... 734
Synchronmaschine ..................................................................... 739
Reluktanzmaschine ..................................................................... 740
Geberlose Reluktanzmaschine .................................................... 746
Linearmotoren ......................................................................... 747
Lagerlose Permanentmagnetmotoren ........................................... 749
Kleinantriebe ........................................................................... 754

Stichwortverzeichnis ............................................................... 758
Elektrische Antriebe - Grundlagen
Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben
Schröder, D.
2013, XXV, 775 S. Mit Online-Extras., Softcover
ISBN: 978-3-642-30470-5