

Liviu Constantinescu-Simon
Alexandru Fransua
Karl Saal

Elektrische Maschinen und Antriebssysteme

Komponenten, Systeme, Anwendungen

Mit 454 Abbildungen



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Formelzeichenverzeichnis | XIII |
| 1 Grundbegriffe und Bauelemente der elektrischen Antriebssysteme | 1 |
| 1.1 Allgemeines über die Antriebssysteme | 1 |
| 1.2 Elektrische Maschinen: Definitionen, Betriebsarten, Verluste, Thermik | 3 |
| 1.3 Auswahl elektrischer Maschinen nach den Betriebsverhältnissen | 7 |
| 1.3.1 Betriebsarten | 8 |
| 1.3.2 Aufstellungsort, Schutzgrade und Schutzarten..... | 12 |
| 1.4 Mechanische Kennlinien der elektrischen Motoren | 14 |
| 1.5 Mechanische Kennlinien der Arbeitsmaschinen..... | 15 |
| 1.6 Stationäre Zustände elektrischer Antriebssysteme. Statische Stabilität..... | 17 |
| 1.7 Dynamische Zustände der elektrischen Antriebssysteme..... | 21 |
| 1.8 Elektromagnetische Steuerungs- und Schutzgeräte..... | 23 |
| 1.8.1 Elektromagnetisches Relais..... | 23 |
| 1.8.2 Steuerschütz | 28 |
| 1.8.3 Überstromauslöser..... | 31 |
| 1.8.4 Schmelzsicherungen..... | 31 |
| 1.9 Elektronische Leistungselemente | 32 |
| 1.9.1 Dioden..... | 32 |
| 1.9.2 Transistoren..... | 33 |
| 1.9.2.1 Der Bipolartransistor | 33 |
| 1.9.2.2 Der MOS-Transistor | 35 |
| 1.9.2.3 IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor..... | 36 |
| 1.9.2.4 Intelligente Powermodule (IPM) | 36 |
| 1.9.3 Thyristoren | 36 |
| 1.9.4 Triac und Diac..... | 41 |
| 1.9.5 Z-Diode | 42 |
| 1.9.6 Leistungsstromrichter..... | 42 |
| 1.10 Mechanische Übertragungssysteme | 44 |
| 1.11 Übungen | 51 |
| 2 Gleichstrommotoren in elektrischen Antriebssystemen | 73 |
| 2.1 Bauelemente der Gleichstrommotoren | 73 |
| 2.2 Erregerfeld, induzierte Spannung, Drehmoment | 78 |
| 2.2.1 Das magnetische Feld der Hauptpole..... | 78 |
| 2.2.2 Die induzierte elektromagnetische Spannung in einer Spule der Läuferwicklung | 82 |
| 2.2.3 Gleichstromwicklungen | 85 |
| 2.2.4 Die elektromotorische Spannung des Gleichstrommotors | 90 |
| 2.2.5 Das elektromagnetische Drehmoment des Gleichstrommotors..... | 94 |
| 2.3 Die magnetische Ankerrückwirkung | 96 |
| 2.4 Energetische Arbeitsbetriebe – stationäre und dynamische Zustände..... | 101 |
| 2.4.1 Der Motorbetrieb..... | 101 |
| 2.4.2 Generatorbetrieb..... | 105 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.4.3 | Elektrischer Bremsbetrieb | 108 |
| 2.4.4 | Gleichungen der dynamischen Betriebszustände | 111 |
| 2.4.5 | Einteilung der Gleichstrommaschinen nach Erregungsart | 113 |
| 2.5 | Kennlinien der Gleichstrommotoren | 114 |
| 2.5.1 | Motoren mit Fremd- oder Nebenschlußerregung | 114 |
| 2.5.2 | Motor mit Reihenschlußerregung | 123 |
| 2.6 | Anlauf der Gleichstrommotoren – automatisierte Anlaufstromkreise | 129 |
| 2.6.1 | Direkter Anlauf | 129 |
| 2.6.2 | Anlauf mit Widerstandsanlasser | 133 |
| 2.6.3 | Anlauf bei verringerter Ankerspannung ohne Widerstandsanlasser | 135 |
| 2.6.4 | Automatischer Anlaufvorgang | 135 |
| 2.6.5 | Handumschaltergesteuerter Anlasser | 140 |
| 2.7 | Anwendung der Gleichstrommaschine als Bremse in den elektrischen Antrieben | 142 |
| 2.7.1 | Gegenstrombremsen | 142 |
| 2.7.2 | Bremsung im Generatorbetrieb mit Energierückgewinnung (Nutzbremsung) | 145 |
| 2.7.3 | Bremsung im Generatorbetrieb ohne Energierückgewinnung (Widerstandsbremsung) | 147 |
| 2.8 | Drehzahlsteuerung der Gleichstrommotoren | 148 |
| 2.8.1 | Drehzahlstellen über die Ankerspannung U_A | 148 |
| 2.8.2 | Feldsteuerung | 150 |
| 2.8.3 | Leonard-Umformer | 151 |
| 2.9 | Übungen | 156 |
| 3 | Leistungselektronische Stellglieder für Gleichstromantriebe | 195 |
| 3.1 | Gleichstrom-Stromrichter als Stellglieder | 195 |
| 3.1.1 | Einwegstromrichter (Einwegschaltung) | 195 |
| 3.1.2 | Brückenschaltung (Wechselstrom-Zweipulsleichrichter) | 201 |
| 3.2 | Drehstrom-Stromrichter | 208 |
| 3.2.1 | Dreipulsstromrichter (Zweiquadranten Sternschaltung) | 208 |
| 3.2.2 | Umkehrstromrichter (Dreipulsstromrichter in Vierquadranten-Sternschaltung) | 215 |
| 3.2.3 | Drehstrombrückenschaltung (Sechspulsstromrichter) | 221 |
| 3.3 | Energetische Betrachtungen über Stromrichter | 223 |
| 3.4 | Kommutierungsvorgänge in Stromrichtern | 227 |
| 3.5 | Analoge Steuergeräte für netzgeführte Stromrichter | 234 |
| 3.6 | Gleichspannungssteller | 242 |
| 3.6.1 | Schaltung eines Gleichspannungsstellers mit Löschthyristor | 244 |
| 3.6.2 | Steller mit Nutzbremsung | 249 |
| 3.6.3 | Brems-Chopper (Pulsschalter) | 253 |
| 3.7 | Übungen | 253 |
| 4 | Elektrische Transformatoren in Antriebssystemen | 281 |
| 4.1 | Grundaufbauten des elektrischen Transformators | 281 |
| 4.1.1 | Wicklungen des Wechselstromtransformators | 283 |
| 4.1.2 | Ölkessel | 284 |
| 4.2 | Erregerfeld, Rückwirkungsfeld, Gleichungssystem, Ersatzschaltbild | 284 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.1 | Magnetisches Feld..... | 284 |
| 4.2.2 | Gleichungssystem des dynamischen Betriebs..... | 288 |
| 4.2.3 | Stationäres Betriebsverhalten – Ersatzschaltbild, Zeigerbild..... | 292 |
| 4.2.4 | Leistungsbilanz..... | 299 |
| 4.2.5 | Vereinfachtes Ersatzschaltbild..... | 302 |
| 4.3 | Kennlinien des Wechselstromtransformators..... | 302 |
| 4.4 | Drehstromtransformatoren..... | 309 |
| 4.5 | Spartransformatoren..... | 318 |
| 4.6 | Übungen..... | 321 |
| 5 | Asynchronmotoren in elektrischen Antriebssystemen..... | 343 |
| 5.1 | Bauelemente der Drehstrom-Asynchronmaschine..... | 343 |
| 5.1.1 | Allgemeines..... | 343 |
| 5.1.2 | Aufbau..... | 343 |
| 5.2 | Erregerfeld, induzierte Spannung, elektromagnetisches Drehmoment..... | 347 |
| 5.2.1 | Das magnetische Feld einer Wechselstromwicklung..... | 348 |
| 5.2.2 | Drehfeld, das magnetische Feld der Drehstromwicklung..... | 361 |
| 5.2.3 | Spannungsinduktion durch die Drehfelder..... | 368 |
| 5.2.4 | Das elektromagnetische Drehmoment der Drehstrommaschine..... | 374 |
| 5.3 | Das magnetische Rückwirkungsfeld..... | 376 |
| 5.4 | Stationäre und dynamische Arbeitszustände..... | 378 |
| 5.4.1 | Motorbetrieb..... | 378 |
| | Leistungsfaktor des Motors..... | 381 |
| 5.4.2 | Der Generatorbetrieb..... | 382 |
| 5.4.3 | Bremsbetrieb..... | 385 |
| 5.4.4 | Gleichungen des stationären Zustandes..... | 387 |
| 5.4.5 | Gleichungen des dynamischen Zustandes..... | 399 |
| 5.5 | Kennlinien des Drehstrom-Asynchronmotors..... | 411 |
| 5.5.1 | Die Mechanische Kennlinie des Asynchronmotors mit Schleifringläufer..... | 411 |
| 5.5.2 | Mechanische Kennlinien des Asynchronmotors mit Kurzschlußläufer..... | 416 |
| 5.5.3 | Wirkungsgradkennlinie..... | 421 |
| 5.5.4 | Leistungsfaktorkennlinie..... | 422 |
| 5.6 | Anlauf von Asynchronmotoren..... | 422 |
| 5.6.1 | Direkter Anlauf..... | 423 |
| 5.6.2 | Stern-Dreieck-Anlauf..... | 426 |
| 5.6.3 | Anlauf mit Drosselspulen im Ständerstromkreis..... | 428 |
| 5.6.4 | Anlauf mit Spartransformator..... | 429 |
| 5.6.5 | Anlauf des Asynchronmotors mit Schleifringläufer..... | 430 |
| 5.7 | Bremsen der Asynchronmaschine..... | 433 |
| 5.7.1 | Bremsschaltung im Bremsbetrieb..... | 433 |
| | 5.7.1.1 Bremsbetrieb durch Reversierung..... | 433 |
| | 5.7.1.2 Bremsbetrieb durch Änderung der Strangfolge im Ständer..... | 435 |
| 5.7.2 | Bremsung im Generatorbetrieb mit Energierückgewinnung..... | 436 |
| 5.7.3 | Bremsung im Generatorbetrieb ohne Energierückgewinnung..... | 437 |
| 5.8 | Drehzahlstellen von Asynchronmotoren..... | 439 |
| 5.8.1 | Ständerspannungssteuerung..... | 440 |
| 5.8.2 | Polumschaltung..... | 441 |
| 5.8.3 | Frequenzsteuerung..... | 443 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.8.3.1 | Drehzahlstellung durch die Konstanthaltung des Ständerflusses | 443 |
| 5.8.3.2 | Drehzahlstellung durch Konstanthaltung des Luftspaltflusses ... | 446 |
| 5.8.3.3 | Drehzahlstellung durch Konstanthaltung der Läuferflußamplitude | 447 |
| 5.8.3.4 | Drehzahlstellung durch Konstanthaltung des Ständerstromes.... | 448 |
| 5.8.3.5 | Zusammenfassung | 450 |
| 5.8.4 | Widerstandssteuerung im Läuferstromkreis | 450 |
| 5.8.5 | Läuferspannungssteuerung durch Einfügen eines variablen Drehspannungssystems in den Läuferkreis | 451 |
| 5.8.6 | Läuferspannungssteuerung durch eine in den Läuferkreiseingefügte Drehstromquelle variablen Stromes und variabler Frequenz (doppeltgespeister Motor) | 454 |
| 5.9 | Wechselstrom-Asynchronmotor | 456 |
| 5.10 | Übungen | 460 |
| 6 | Synchronmaschinen in elektrischen Antriebssystemen | 487 |
| 6.1 | Bauelemente der Synchronmaschine | 487 |
| 6.2 | Erregungsvorgang, induzierte Spannung, elektromagnetisches Drehmoment | 490 |
| 6.2.1 | Erregerfeld | 490 |
| 6.2.2 | Die induzierte Spannung (Polradspannung) | 494 |
| 6.2.3 | Das elektromagnetische Drehmoment | 495 |
| 6.3 | Das magnetische Rückwirkungsfeld | 497 |
| 6.4 | Die Synchronmaschine im stationären und im dynamischen Zustand | 498 |
| 6.4.1 | Motorbetrieb | 498 |
| 6.4.2 | Generatorbetrieb | 501 |
| 6.4.3 | Gleichungen des stationären Zustands des Synchronmotors | 502 |
| 6.4.4 | Gleichungen des dynamischen Zustandes | 507 |
| 6.5 | Kennlinien des Synchronmotors | 524 |
| 6.5.1 | Mechanische Kennlinie | 525 |
| 6.5.2 | Die V-Kennlinien der Synchronmaschine | 525 |
| 6.5.3 | Die Kennlinie des Polradwinkels. Statische und dynamische Stabilität.... | 527 |
| 6.5.3.1 | Die statische Stabilität | 529 |
| 6.5.3.2 | Die dynamische Stabilität | 533 |
| 6.6 | Anlauf, Bremsung und Drehzahlsteuerung von Synchronmotoren | 539 |
| 6.6.1 | Direkter Anlauf | 542 |
| 6.6.2 | Indirekter Anlauf über Ständerdrosseln | 542 |
| 6.6.3 | Indirekter Anlauf über Spartransformator | 544 |
| 6.6.4 | Die Bremsung von Synchronmotoren | 545 |
| 6.6.5 | Drehzahlstellung von Synchronmotoren | 545 |
| 6.7 | Übungen | 546 |
| 7 | Leistungselektronik bei Drehstromantrieben | 565 |
| 7.1 | Drehzahlsteuerung von Asynchronmotoren durch Gleichstromsteller und Widerstand im Läuferkreis | 565 |
| 7.2 | Drehzahlsteuerung von Drehstrommotoren mittels statischer Umrichter | 568 |
| 7.2.1 | Direkte Umrichter | 569 |
| 7.2.2 | Indirekte Umrichter (Zwischenkreisumrichter) | 575 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.2.2.1 | Spannungswechselrichter ohne getrennten Löschkreis | 576 |
| 7.2.2.2 | Spannungswechselrichter mit Einzellöschkreis und Ausgangsspannungsänderung | 589 |
| 7.2.2.3 | Spannungswechselrichter mit Abschaltthyristoren (GTO) | 592 |
| 7.2.2.4 | Spannungswechselrichter mit Leistungstransistoren | 593 |
| 7.2.2.5 | Stromwechselrichter ohne getrennten Löschkreis | 606 |
| 7.2.2.6 | Stromwechselrichter mit Einzellöschkreis | 613 |
| 7.2.2.7 | Stromwechselrichter mit GTO-Thyristoren | 614 |
| 7.3 | Untersynchrone Stromrichter-kaskade (Scherbius-Kaskade) | 615 |
| 7.4 | Übungen | 619 |
| 8 | Elektrische Sondermaschinen in Antriebssystemen | 637 |
| 8.1 | Gleichstrommaschinen mit Dauermagneten | 637 |
| 8.1.1 | Dauermagnetmotoren mit zylindrischem Läufer | 638 |
| 8.1.2 | Dauermagnetmotoren mit Scheibenläufer | 643 |
| 8.1.3 | Dauermagnetmotoren mit Glockenläufer | 644 |
| 8.2 | Zweiphasen-Asynchronstellmotor | 645 |
| 8.3 | Reluktanzsynchronmotor | 652 |
| 8.4 | Hysteresemotor | 654 |
| 8.5 | Synchronmaschinen mit Dauermagneten | 659 |
| 8.6 | Bürstenloser Gleichstrommotor, selbstgesteuerter Synchronmotor | 661 |
| 8.7 | Schrittmotoren | 669 |
| 8.8 | Geschaltete Reluktanzmotoren (mit elektronischer Kommutierung) | 678 |
| | Bibliographie | 681 |
| | Sachwortverzeichnis | 689 |