

Prof. Dr.-Ing. Hermann Merz

Elektrische Maschinen und Antriebe

Grundlagen und Berechnungsbeispiele
für Einsteiger

VDE VERLAG • Berlin • Offenbach

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitender Überblick..... | 13 |
| 2 | Grundbegriffe der Elektrotechnik..... | 17 |
| 2.1 | Elektrische Ladung..... | 17 |
| 2.2 | Elektrisches Potential und Spannung..... | 18 |
| 2.3 | Elektrischer Strom..... | 20 |
| 2.4 | Spannungsfall..... | 20 |
| 2.5 | Elektrischer Grundstromkreis..... | 21 |
| 2.6 | Elektrischer Widerstand..... | 21 |
| 2.7 | Elektrische Energie (im Gleichstromkreis)..... | 22 |
| 2.8 | Elektrische Leistung (im Gleichstromkreis)..... | 23 |
| 2.9 | Wirkungsgrad..... | 23 |
| 2.10 | Bezugspfeile für Strom und Spannung..... | 24 |
| 2.10.1 | Spannungsbezugspfeile..... | 24 |
| 2.10.2 | Strombezugspfeile..... | 25 |
| 2.11 | Erzeuger- und Verbraucherpfilsystem (EPS und VPS)..... | 26 |
| 3 | Lineare Gleichstromnetzwerke..... | 29 |
| 3.1 | Begriffsdefinitionen..... | 29 |
| 3.2 | Komponenten linearer Gleichstromnetzwerke..... | 30 |
| 3.2.1 | Ohmscher Widerstand/Leitwert..... | 31 |
| 3.2.2 | Ideale Energiequellen..... | 32 |
| 3.3 | Netzwerktopologie..... | 34 |
| 3.3.1 | Knoten und Zweige..... | 35 |
| 3.3.2 | Maschen und Bäume..... | 35 |
| 3.3.3 | Topologische Grundstrukturen..... ; | 36 |
| 3.4 | Fundamentale Berechnungsmethoden..... | 39 |
| 3.4.1 | Ohmsches Gesetz..... | 39 |
| 3.4.2 | Kirchhoffsche Regeln..... | 39 |
| 3.5 | Lineare Quellen..... | 41 |
| 3.5.1 | Verhalten realer Energiequellen..... | 41 |
| 3.5.2 | Modelle realer Energiequellen..... | 42 |
| 3.5.3 | Hinweise zur Modellierung realer Quellen..... | 45 |
| 3.5.4 | Umwandlung linearer Quellen..... | 46 |
| 3.5.5 | Leistungsanpassung bei linearen Quellen..... | 47 |
| 3.6 | Methoden zur Umformung von Netzwerken..... | 50 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.6.1 | Widerstandersatzschaltungen..... | 50 |
| 3.6.2 | Punkte gleichen Potentials..... | 56 |
| 3.6.3 | Quellenersatzschaltungen..... | 57 |
| 3.7 | Berechnung von Serien- und Parallelschaltungen..... | 61 |
| 3.7.1 | Spannungsteilerregel..... | 61 |
| 3.7.2 | Stromteilerregel..... | 63 |
| 3.8 | Berechnung stark verzweigter Netzwerke..... | 64 |
| 3.8.1 | Zweigstromanalyse..... | 65 |
| 3.8.2 | Überlagerungssatz..... | 70 |
| 3.8.3 | Zweipoltheorie..... | 72 |
| 4 | Elektrische und magnetische Felder..... | 77 |
| 4.1 | Grundlagen der Feldtheorie..... | 77 |
| 4.1.1 | Experimentelle Erfahrungen..... | 78 |
| 4.1.2 | Der (physikalische) Feldbegriff..... | 79 |
| 4.1.3 | Lokale und globale (integrale) Feldgrößen..... | 80 |
| 4.1.4 | Feldlinien..... | 94 |
| 4.2 | Die Maxwell'schen Gleichungen..... | 97 |
| 4.2.1 | Die Feldgleichungen..... | 99 |
| 4.2.2 | Die Kontinuitätsgleichungen (Quellen und Wirbel)..... | 112 |
| 4.2.3 | Die Materialgleichungen..... | 114 |
| 4.3 | Kondensator und Kapazität..... | 115 |
| 4.3.1 | Kondensator..... | 115 |
| 4.3.2 | Kapazität..... | 116 |
| 4.3.3 | Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten..... | 117 |
| 4.3.4 | Der Kondensator als Energiespeicher..... | 119 |
| 4.4 | Spule und Induktivität..... | 123 |
| 4.4.1 | Spule..... | 124 |
| 4.4.2 | Selbstinduktion und (Selbst-)Induktivität..... | 125 |
| 4.4.3 | Magnetisch gekoppelte Spulen..... | 129 |
| 4.4.4 | Reihen- und Parallelschaltung magnetisch nicht gekoppelter Spulen..... | 131 |
| 4.4.5 | Spule als Energiespeicher..... | 133 |
| 5 | Lineare Wechselstromnetzwerke..... | 139 |
| 5.1 | Begriffsdefinitionen und Überblick..... | 139 |
| 5.2 | Beschreibung sinusförmiger Spannungen und Ströme..... | 141 |
| 5.2.1 | Sinusförmige Größen, Linien- und Zeitdiagramm..... | 141 |
| 5.2.2 | Integrale Kennwerte sinusförmiger Größen..... | 147 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.3 | Komplexe Zeiger..... | 150 |
| 5.3 | Komponenten linearer Wechselstromnetzwerke..... | 160 |
| 5.3.1 | Ideale Wechselspannungsquellen..... | 160 |
| 5.3.2 | Komplexe Widerstände und Leitwerte..... | 160 |
| 5.3.3 | Reale Wechselspannungsquellen..... | 169 |
| 5.4 | Berechnung linearer Wechselstromnetzwerke..... | 169 |
| 5.4.1 | Fundamentale Berechnungsmethoden..... | 170 |
| 5.4.2 | Komplexe Widerstands- und Leitwertersatzschaltungen..... | 171 |
| 5.4.3 | Parallelschaltung..... | 174 |
| 5.4.4 | Effektivwertzeigerdiagramme..... | 176 |
| 5.4.5 | Komplexe Spannungsteilerregel..... | 177 |
| 5.4.6 | Komplexe Stromteilerregel..... | 179 |
| 5.5 | Leistung im Wechselstromnetzwerk..... | 180 |
| 5.5.1 | Momentanleistung am Verbraucher..... | 181 |
| 5.5.2 | Momentane Wirk- und Blindleistung..... | 183 |
| 5.5.3 | Mittlere Leistungen..... | 185 |
| 5.5.4 | Wirk-, Blind- und Scheinleistung, Leistungsfaktor..... | 186 |
| 5.5.5 | Komplexe Leistung..... | 187 |
| 5.5.6 | Blindleistungskompensation..... | 190 |
| 6 | Lineare Drehstromnetzwerke..... | 195 |
| 6.1 | Vorteile von Mehrphasensystemen..... | 195 |
| 6.2 | Symmetrische Dreiphasengeneratoren..... | 196 |
| 6.2.1 | Begriffsdefinition..... | 196 |
| 6.2.2 | Prinzip der Drehstromerzeugung..... | 197 |
| 6.2.3 | Verkettung..... | 199 |
| 6.3 | Drehstromverbraucher..... | 204 |
| 6.3.1 | Symmetrische und unsymmetrische Verbraucher..... | 204 |
| 6.3.2 | Drehstromverbraucher am 4- und 3-Leiter-Netz..... | 205 |
| 6.4 | Berechnung von Drehstromnetzwerken..... | 207 |
| 6.4.1 | Drehstromverbraucher am 4-Leiter-Netz..... | 207 |
| 6.4.2 | Drehstromverbraucher am 3-Leiter-Netz..... | 216 |
| 6.5 | Leistung im Drehstromnetzwerk..... | 216 |
| 6.5.1 | Überblick..... | 216 |
| 6.5.2 | Momentanleistung..... | 217 |
| 6.5.3 | Komplexe Leistung, Wirk-, Blind- und Scheinleistung..... | 218 |
| 6.5.4 | Drehstromleistung bei symmetrischer Last..... | 220 |
| 6.6 | Blindleistungskompensation im Drehstromnetzwerk..... | 222 |
| 6.6.1 | Problemstellung..... | 222 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.6.2 | Sternschaltung der Kondensatoren..... | 223 |
| 6.6.3 | Dreieckschaltung der Kondensatoren..... | 224 |
| 7 | Drehstromsynchrongenerator..... | 227 |
| 7.1 | Aufbau des Drehstromsynchrongenerators..... | 227 |
| 7.2 | Funktionsweise des Drehstromsynchrongenerators..... | 230 |
| 7.3 | Elektrisches Ersatzschaltbild..... | 232 |
| 7.4 | Betrieb am starren Netz..... | 234 |
| 7.4.1 | Synchronisierung mit dem Netz..... | 234 |
| 7.4.2 | Drehstromgenerator als Blindleistungserzeuger..... | 235 |
| 7.4.3 | Drehstromgenerator als Wirkleistungserzeuger..... | 236 |
| 8 | Transformator..... | 239 |
| 8.1 | Mechanischer Aufbau..... | 240 |
| 8.1.1 | Eisenkern..... | 241 |
| 8.1.2 | Wicklungen..... | 243 |
| 8.2 | Funktionsprinzip des Einphasentransformators..... | 246 |
| 8.3 | Bezugspfeile beim Einphasentransformator..... | 247 |
| 8.4 | Der ideale Einphasentransformator..... | 253 |
| 8.5 | Der technische (reale) Einphasentransformator..... | 258 |
| 8.5.1 | Vollständiges Ersatzschaltbild des Einphasentransformators..... | 258 |
| 8.5.2 | Leerlauf- und Kurzschlussversuch..... | 262 |
| 8.5.3 | Vereinfachtes Ersatzschaltbild (Kappsches Dreieck)..... | 270 |
| 8.6 | Drehstromtransformator (Dreiphasentransformator)..... | 273 |
| 8.6.1 | Schaltungen und Schaltgruppen..... | 274 |
| 8.6.2 | Elektrisches Ersatzschaltbild bei symmetrischer Last..... | 278 |
| 9 | Drehstromasynchronmotor..... | 283 |
| 9.1 | Aufbau des Drehstromasynchronmotors..... | 283 |
| 9.2 | Funktionsweise..... | 287 |
| 9.2.1 | Schlupf..... | 288 |
| 9.2.2 | Ständerdrehfeld..... | 288 |
| 9.2.3 | Raumzeiger..... | 292 |
| 9.2.4 | Läufer- und Luftspaltdrehfeld..... | 293 |
| 9.2.5 | Drehmomentbildung..... | 295 |
| 9.3 | Elektrisches Ersatzschaltbild..... | 296 |
| 9.4 | Leistungsbilanz des Drehstromasynchronmotors..... | 300 |
| 9.5 | Ortskurve des Ständerstroms (Heyland-Kreis)..... | 302 |
| 9.6 | Drehmoment-Schlupf-Kennlinie (Klosssche Formel)..... | 305 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10 | Gleichstrommotoren..... | 311 |
| 10.1 | Grundlegende physikalische Gesetze..... | 311 |
| 10.1.1 | Kraft auf stromdurchflossene gerade Leiter im Magnetfeld..... | 311 |
| 10.1.2 | Spannungserzeugung im geraden Leiter..... | 313 |
| 10.2 | Aufbau des Gleichstrommotors..... | 315 |
| 10.2.1 | Der Ständer..... | 317 |
| 10.2.2 | Läufer, Kommutator und Bürsten..... | 321 |
| 10.3 | Die Grundgleichungen des Gleichstrommotors..... | 330 |
| 10.3.1 | Induzierte Spannung..... | 330 |
| 10.3.2 | Drehmoment..... | 332 |
| 10.4 | Erregungsarten und elektrische Ersatzschaltbilder..... | 334 |
| 10.4.1 | Erregung von Gleichstrommotoren..... | 334 |
| 10.4.2 | Elektrische Ersatzschaltbilder..... | 335 |
| 10.5 | Nebenschlussverhalten..... | 338 |
| 10.6 | Reihenschlussverhalten..... | 339 |
| | | |
| 11 | Elektrische Antriebe..... | 343 |
| 11.1 | Einführende Übersicht..... | 343 |
| Pl.1.1 | Leistungsantrieb..... | 343 |
| 11.1.2 | Ungesteuerte, gesteuerte und geregelte Antriebe..... | 344 |
| 11.1.3 | Einsatz- und Betriebsbedingungen..... | 346 |
| 11.2 | Physikalische Grundgesetze..... | 348 |
| 11.2.1 | Das dynamische Grundgesetz der Rotation..... | 348 |
| 11.2.2 | Freischneiden..... | 350 |
| 11.2.3 | Umrechnung von Bewegungsgrößen..... | 351 |
| 11.3 | Stationäre M, n -Kennlinien und Arbeitspunktstabilität..... | 355 |
| 11.3.1 | Stationäre M_L, w -Kennlinien von Arbeitsmaschinen..... | 356 |
| 11.3.2 | Stationäre M_M, n -Kennlinien von Motoren..... | 357 |
| 11.3.3 | Stationärer Arbeitspunkt..... | 359 |
| 11.3.4 | Statische Stabilität im Arbeitspunkt..... | 361 |
| 11.4 | Antriebsdynamik..... | 365 |
| 11.4.1 | Langsame Drehzahländerungen..... | 365 |
| 11.4.2 | Schnelle Drehzahländerungen..... | 368 |
| 11.5 | Klassische Verfahren der Drehzahlsteuerung..... | 371 |
| 11.5.1 | Klassische Drehzahlsteuerung beim Drehstromasynchronmotor..... | 371 |
| 11.5.2 | Klassische Drehzahlsteuerung beim Gleichstrommotor..... | 379 |
| 11.6 | Stromrichterantriebe..... | 383 |
| 11.6.1 | Stromrichterventile..... | 383 |
| 11.6.2 | Stromrichter (Gleich-, Wechsel- und Umrichter)..... | 387 |

| | | |
|----------------------------------|--|------------|
| 11.6.3 | Netzgeführter Stromrichter für den Gleichstrommotor..... | 389 |
| 11.6.4 | Transistorumrichter für den Drehstromasynchronmotor..... | 394 |
| 11.7 | Antriebsregelung..... | 400 |
| 11.7.1 | Struktur eines geregelten Antriebs..... | 400 |
| 11.8 | Aufbau von Gesamt-Antriebsmoduln..... | 403 |
| 11.8.1 | Netzteil..... | 404 |
| 11.8.2 | Leistungsteil-Interface..... | 404 |
| 11.8.3 | Signalverarbeitungseinheit..... | 404 |
| 11.8.4 | Schnittstellen..... | 405 |
| Literatur..... | | 409 |
| Stichwortverzeichnis..... | | 413 |