

Germar Müller, Karl Vogt und Bernd Ponick

Berechnung elektrischer Maschinen

6., völlig neu bearbeitete Auflage



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 6. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	IX
Formelzeichen	XVII
1	Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen 1
1.1	Allgemeine Bezeichnungen und Gesetzmäßigkeiten 2
1.1.1	Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen 3
1.1.2	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen 12
1.2	Wicklungen mit ausgebildeten Strängen 20
1.2.1	Wicklungsgesetze 21
1.2.2	Wicklungsentwurf 37
1.2.3	Bestimmung des Wicklungsfaktors 79
1.2.4	Aussagen des Görge-Diagramms 97
1.2.5	Bewertung der Entwürfe 101
1.2.6	Wicklungsdimensionierung 113
1.3	Kommutatorwicklungen 124
1.3.1	Wicklungsgesetze und Wicklungsbezeichnungen 125
1.3.2	Wicklungsentwurf 145
1.3.3	Wicklungsdimensionierung 161
1.4	Weitere Wicklungsarten 166
1.4.1	Wicklungen auf ausgeprägten Polen 167
1.4.2	In Nuten verteilt angeordnete Wicklungen 169
2	Magnetischer Kreis 175
2.1	Feldgleichungen und deren allgemeine Aussagen 176

- 2.1.1 Allgemeine Aussagen der Feldgleichungen für die Berechnung magnetischer Kreise 176
- 2.1.2 Prinzipieller Berechnungsgang bei der konventionellen Magnetkreisberechnung 180
- 2.2 Ermittlung magnetischer Felder 186
- 2.2.1 Feldgebiete konstanter Permeabilität ohne Durchflutung 186
- 2.2.2 Feldgebiete konstanter Permeabilität mit Durchflutung 191
- 2.3 Luftspaltfelder 194
- 2.3.1 Einfluss von Polform und Durchflutungsverteilung auf das Luftspaltfeld als ebenes Feld ohne Einfluss der Nutung 195
- 2.3.2 Einfluss der Unterbrechungen der Luftspaltbegrenzungsflächen auf das Luftspaltfeld 200
- 2.4 Charakteristische Abschnitte des ferromagnetischen Teils des magnetischen Kreises 212
- 2.4.1 Abschnitte mit annähernd homogenen Feldern 213
- 2.4.2 Abschnitte mit sich längs des Integrationswegs ändernder Querschnittsfläche 214
- 2.4.3 Abschnitte mit längs des Integrationswegs veränderlichem Fluss 219
- 2.5 Gegenseitige Beeinflussung der Abschnittfelder 229
- 2.5.1 Einführende Betrachtung zur gegenseitigen Beeinflussung der Abschnittfelder 230
- 2.5.2 Iterative Ermittlung der gegenseitigen Beeinflussung 235
- 2.5.3 Konzentrierte Erregerwicklung 237
- 2.5.4 Verteilte erregende Wicklung bei gleichmäßiger Nutung 241
- 2.5.5 Verteilte erregende Wicklung bei ungleichmäßiger Nutung 245
- 2.6 Bestimmung der Leerlaufkennlinie 249
- 2.6.1 Gleichstromerregung mit konzentrierter Erregerwicklung 250
- 2.6.2 Gleichstromerregung mit verteilt angeordneter Erregerwicklung 254
- 2.6.3 Mehrphasige Wechselstromerregung 256
- 2.6.4 Sonderfälle der Erregung 259
- 2.7 Einfluss der Belastungsströme auf das Feld der erregenden Wicklung/ 263
- 2.7.1 Maschinen mit linearer Durchflutungsverteilung der Belastungsströme 264
- 2.7.2 Maschinen mit konstantem Luftspalt und sinusförmiger Durchflutungsverteilung der Belastungsströme 268
- 2.7.3 Maschinen mit nicht konstantem Luftspalt und sinusförmiger Durchflutungsverteilung der Belastungsströme 275
- 2.8 Erregung durch permanentmagnetische Abschnitte 280
- 2.8.1 Entmagnetisierungskennlinie 281
- 2.8.2 Reversible Kennlinie 283
- 2.8.3 Hartmagnetische Werkstoffe 285
- 2.8.4 Dimensionierung von permanentmagnetischen Abschnitten 286
- 2.8.5 Flusskonzentration 288

- 2.8.6 Einfluss der Ankerrückwirkung 292
- 3 Streuung 295**
 - 3.1 Allgemeine Erscheinungen und ihre Bezeichnungen 295
 - 3.2 Einführung der Teilstrefelder 297
 - 3.3 Spaltstreuung als Teil der Gesamtstreuung eines Wicklungspaares 299
 - 3.4 Gesamtstreuung eines Wicklungspaares 302
 - 3.5 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung der Streuung 309
 - 3.5.1 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung von Streuflüssen 309
 - 3.5.2 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung von Streuflussverkettungen 311
 - 3.6 Ermittlung von Streuflüssen in der Berechnungspraxis 318
 - 3.6.1 Nut-Zahnkopf-Streufluss 318
 - 3.6.2 Polstreufluss ausgeprägter Pole 321
 - 3.7 Ermittlung von Streuflussverkettungen in der Berechnungspraxis 323
 - 3.7.1 Nut- und Zahnkopfstreuung 323
 - 3.7.2 Wicklungskopfstreuung 332
 - 3.7.3 Oberwellenstreuung 335
 - 3.7.4 Polstreuung 341
- 4 Stromwendung 345**
 - 4.1 Stromwendevorgang 346
 - 4.1.1 Phasen des Stromwendevorgangs 346
 - 4.1.2 Prinzipieller Verlauf der Stromwendung 349
 - 4.1.3 Beanspruchung des Bürstenkontakts 353
 - 4.2 Prinzipielle analytische Behandlung der Stromwendung 354
 - 4.2.1 Maschengleichung der kommutierenden Masche 354
 - 4.2.2 Wendezone 355
 - 4.2.3 Gleichungssystem zur Berechnung der Stromwendung 359
 - 4.2.4 Betrachtungen zur Lösung des Gleichungssystems 360
 - 4.3 Genäherte Berechnung der Stromwendung 364
 - 4.3.1 Verlauf der Ankerreaktanzspannung 364
 - 4.3.2 Mittlere Ankerreaktanzspannung 367
 - 4.3.3 Wendepolwicklung 369
 - 4.4 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Stromwendung 378
 - 4.4.1 Einfluss der Bürsten 378
 - 4.4.2 Einfluss der Wicklungsdimensionierung und der Wendepolgestaltung 382
- 5 Stromverdrängung 385**
 - 5.1 Prinzipielle Abhängigkeiten der Stromverdrängung 385
 - 5.1.1 Ermittlung der prinzipiellen Abhängigkeiten 386

- 5.1.2 Gesichtspunkte für die Wicklungsdimensionierung 388
- 5.2 Veranschaulichung der Erscheinung der Stromverdrängung 391
 - 5.2.1 Einseitige Stromverdrängung 392
 - 5.2.2 Zweiseitige Stromverdrängung 396
 - 5.2.3 Definition von Parametern 397
- 5.3 Analytisch geschlossene Berechnung der Stromverdrängung 400
 - 5.3.1 Entwicklung der Grundgleichungen 401
 - 5.3.2 Massive Leiter 404
 - 5.3.3 Unterteilte Leiter 414
 - 5.3.4 Kunststäbe 421
 - 5.3.5 Kommutatorwicklungen 423
- 6 Verluste 427**
 - 6.1 Energiebilanz der elektrischen Maschine 427
 - 6.1.1 Verluste und Wirkungsgrad 427
 - 6.1.2 Nachweis des Wirkungsgrads 430
 - 6.2 Mechanische Verluste 432
 - 6.2.1 Verluste durch Gas- und Lagerreibung 432
 - 6.2.2 Verluste durch Bürstenreibung 433
 - 6.3 Grundverluste in den Stromkreisen 434
 - 6.3.1 Eigenschaften der Leitermaterialien 434
 - 6.3.2 Wicklungswiderstände 435
 - 6.3.3 Wicklungsverluste 438
 - 6.3.4 Bürstenübergangsverluste 439
 - 6.4 Grundverluste im magnetischen Kreis 440
 - 6.4.1 Eigenschaften des Magnetmaterials 441
 - 6.4.2 Ermittlung der Ummagnetisierungsgrundverluste in der Berechnungspraxis 452
 - 6.5 Zusätzliche Verluste 453
 - 6.5.1 Zusätzliche Verluste durch Oberwellen im Luftspaltfeld 454
 - 6.5.2 Zusätzliche Stromwärmeverluste in Ständer- und Läuferwicklungen durch Oberschwingungen des speisenden Stroms 464
 - 6.5.3 Zusätzliche Verluste durch Stromverdrängung in Wicklungen 465
 - 6.5.4 Quellen weiterer zusätzlicher Verluste 465
- 7 Kräfte 467**
 - 7.1 Allgemeine Beziehungen zur Ermittlung der Kräfte 467
 - 7.1.1 Ermittlung der Kräfte auf stromdurchflossene Leiter, ausgehend von den Feldgrößen 468
 - 7.1.2 Ermittlung der Grenzflächenkräfte 468
 - 7.1.3 Ermittlung der Kräfte aus der Induktivitätsänderung 469

- 7.2 Tangentiale Kräfte auf Blechpakete 470
- 7.3 Radiale Kräfte auf Blechpakete 472
 - 7.3.1 Allgemeine Erscheinungen 472
 - 7.3.2 Zugspannungswellen des resultierenden Luftspaltfelds und ihre Wirkung 476
 - 7.3.3 Magnetische Geräusche 478
 - 7.3.4 Einseitiger magnetischer Zug 481
- 7.4 Axiale Kräfte auf Blechpakete 485
 - 7.4.1 Allgemeine Erscheinungen 485
 - 7.4.2 Axiale Kräfte aufgrund des Luftspaltfelds 486
 - 7.4.3 Axiale Kräfte aufgrund des Streufelds des Wicklungskopfs 493
- 7.5 Kräfte auf in Nuten eingebettete Leiter 494
 - 7.5.1 Tangentiale Kräfte 494
 - 7.5.2 Radiale Kräfte 496
- 7.6 Kräfte auf die Leiter im Wicklungskopf 500
 - 7.6.1 Allgemeine Erscheinungen und Beziehungen 500
 - 7.6.2 Vereinfachte Berechnung 504

- 8 Induktivitäten, Reaktanzen und Zeitkonstanten 511**
 - 8.1 Induktivitäten und Reaktanzen 511
 - 8.1.1 Grundlegende Zusammenhänge 511
 - 8.1.2 Induktivitäten und Reaktanzen des Luftspaltfelds 515
 - 8.1.3 Streuinduktivitäten und Streureaktanzen 532
 - 8.1.4 Charakteristische Induktivitäten und Reaktanzen 539
 - 8.2 Zeitkonstanten 550
 - 8.2.1 Eigenzeitkonstanten 551
 - 8.2.2 Charakteristische Zeitkonstanten 555

- 9 Entwurfs- und Berechnungsgänge 563**
 - 9.1 Grobentwurf 564
 - 9.1.1 Entwurfsgleichung 565
 - 9.1.2 Entwurfsrichtwerte 578
 - 9.2 Detaillierte Dimensionierung und analytische Nachrechnung 588
 - 9.2.1 Grundsätzliches Vorgehen 588
 - 9.2.2 Gleichstrommaschinen 590
 - 9.2.3 Induktionsmaschinen 595
 - 9.2.4 Synchronmaschinen 601
 - 9.2.5 Kleinmaschinen 606
 - 9.2.6 Optimierung des Entwurfs 610
 - 9.3 Nachrechnung mit Hilfe numerischer Feldberechnung von K. Reichert 613
 - 9.3.1 Grundlagen 613

- 9.3.2 Numerische Feldberechnungsmethoden 620
- 9.3.3 Anwendung numerischer Feldberechnungsmethoden 627
- 9.3.4 Praktischer Einsatz der Finiten-Elemente-Methode zur numerischen
Feldberechnung 638
- 9.4 Wicklungsumrechnung 649
- 9.4.1 Anpassung an eine andere Bemessungsspannung 649
- 9.4.2 Beeinflussung der charakteristischen Reaktanzen 650
- 9.4.3 Berechnung einer Maschinenreihe 651

Literaturverzeichnis 655

Sachverzeichnis 659