

Inhaltsverzeichnis.

I. Grundbegriffe der Wechselstromerscheinungen in Maschinen. Seite

1. Die Rechnung mit komplexen Größen 1
 - a. Grundsätzliches zur komplexen Schwingungsrechnung 1 — b. Der Zeitvektor und seine rechnerische Behandlung 2 — c. Lösung von linearen Differentialgleichungen 7 — d. Anwendung auf einen elektrischen Stromkreis 8.
2. Ortskurven 11
 - a. Das Blochsche Verfahren 11 — b. Die Gerade 12 — c. Der Kreis 13 — d. Kurven höherer Ordnung 16 — e. Verteilung der Parameter auf den Kurven 17 — f. Der Kreis als geometrischer Ort des Primärstromes einer Maschine 17.
3. Reaktanzen und Grundgleichungen der Maschinen 21
 - a. Benennung der Flüsse, Induktivitäten und Blindwiderstände (Reaktanzen) 21 — b. Der Transformator 23 — c. Die Einphasenmaschine 27 — d. Drehfeldreaktanzen 29 — e. Der umlaufende sinusförmige Strombelag (Stromwelle) 30 — f. Die Grundgleichungen des Drehfeldtransformators 30 — g. Die Grundgleichungen der Drehfeldmaschine 33.
4. Feldformen und unsymmetrische Mehrphasensysteme 34
 - a. Beziehungen zwischen Wechselfeldern und Drehfeldern 34 — b. Kreisdrehfeld, elliptisches Drehfeld, Wechselfeld 36 — c. Die symmetrischen Komponenten 36 — d. Zerlegung von Mehrphasensystemen 38.

II. Die Synchronmaschine.

- A. Ankerrückwirkung 42
 1. Die Felderregerkurve des Ankers bei Mehrphasenmaschinen 42
 - a. Ankerströme sinusförmig. Die resultierende Ankerdurchflutung 42 — b. Einfluß der Oberströme 44.
 2. Einfluß der veränderlichen Felderregerkurve auf die Feldkurve 45
 - a. Einfluß auf den Strom im Feldmagnetkreis 45 — b. Die Feldkurve 47 — c. Abdämpfung der Oberwellen 48.
 3. Die Einphasenmaschine 51
 - a. Ankerdurchflutung 51 — b. Rückwirkung der gegenlaufenden Felderregerkurve 52 — c. Die Abdämpfung des gegenlaufenden Feldes 57.
 4. Die Lage der Felderregerkurve des Ankers zum Feldmagneten 58
 5. Größe der Phasenwinkel φ und ψ bei konstantem Strom. 60
 6. Querdurchflutung und Längsdurchflutung 63
- B. Einzelheiten zur Berechnung der magnetischen Beanspruchungen und Verluste 66
 1. Die ideelle Ankerlänge 66
 2. Die Ankernernspannung 68
 - a. Ungelochter Kern 69 — b. Gelochter Kern 75.

	Seite
3. Einfluß der Spannung längs der Zähne und der Ankerkerne auf die Feldkurve	79
a. Abschätzung bei sinusförmiger Felderregerkurve 79 — b. Einfluß der Kerninduktion B_A und der Feldkurve auf die Kurve $\frac{1}{2}V_{Ax}$ 80 — c. Die Kurve $b_L(\frac{1}{2}V_{Ax})$ 82.	
4. Die Streuung	84
a. Spaltstreuung und Bohrungsfeld 84 — b. Der Streufluß des Läufers von Turbogeneratoren 87 — c. Nuten- und Zahnkopfstreuung im Anker 89 — d. Stirnstreuung 91.	
5. Einfluß der Ankerstreuung auf die Feldkurve	96
a. Die zusätzliche Zahnbeanspruchung 96 — b. Der Betrag der zusätzlichen Zahnbeanspruchung 100 — c. Beispiel 102.	
6. Die Magnetisierungskurven	103
7. Die Zusatzverluste	107
a. Zusatzverluste durch das Feld im Wicklungskopfraum 107 — b. Verluste durch die Oberwellen der Feldkurve bei ungenutetem Anker 110 — c. Verluste durch die Ankernutung 117 — d. Beispiel 120.	
8. Entstehung und Unterdrückung von Lagerströmen	121
C. Die Maschine mit zylindrischem Feldmagneten (Vollpolmaschine)	124
1. Leerlaufcharakteristik	124
a. Ausführungsformen des Feldmagneten 125 — b. Feldmagnet mit geschlossenen unbewickelten Nuten 128 — c. Feldmagnet mit teilweise offenen unbewickelten Nuten 131 — d. Berechnungsbeispiel 132.	
2. Die Feldmagnetdurchflutung bei Belastung	138
a. Einfluß der Ankerstreuung und der veränderten Feldmagnetstreuung auf die Spannung im Eisen vernachlässigt 139 — b. Einfluß der Streuung 141.	
3. Die Feldkurve bei Belastung	143
4. Berechnungsbeispiel	149
a. Die Feldmagnetdurchflutung bei Belastung 149 — b. Die Feldkurve bei Belastung 152 — c. Genauigkeit des Diagramms 155.	
5. Die Ortskurve des Stromes und die Kippleistung	157
a. Die Ortskurve 157 — b. Die Kippleistung und das Kippmoment 163 — c. Die kapazitive Blindstromkomponente 166.	
6. Die selbständige Vollpolmaschine bei kapazitiver Belastung. Selbsterregung	169
D. Die Maschine mit ausgeprägten Polen (Schenkelpolmaschine)	174
1. Leerlaufcharakteristik	174
a. Form der Polschuhe 174 — b. Das Feld in der Polücke 178 — c. Die Feldkurve 186 — d. Die Grundwellenamplitude und der ideelle Polbogen 188 — e. Zusammenfassung 192.	
2. Längs- und Quersfeld bei Belastung	194
a. Gegenseitige Beeinflussung von Längs- und Quersfeld 194 — b. Die Bestimmung des Winkels ψ ; k_q 195 — c. Die wirksame Gegen durchflutung $\mathcal{O}'_{Ag}$ 196 — d. Die Faktoren k_l und k 199 — e. Einfluß der Oberwellen 200.	
3. Bestimmung der Faktoren k_l , k_q und k	203
a. Permeabilität im Eisen unendlich groß 203 — b. Einfluß des Sättigungsgrades 208.	
4. Die Feldmagnetdurchflutung bei Belastung	211
a. $\Phi_1(V_R)$ und $\Phi_s(V_P)$ bekannt 212 — b. $\Phi_1(V_R)$ und $\Phi_s(V_P)$ geschätzt 213 — c. Vereinfachtes Verfahren 215.	

	Seite
5. Die Feldkurve bei Belastung	216
a. Das Ankerlängsfeld in der Pollücke 216 — b. Das Ankerquerfeld in der Pollücke 221 — c. Das Feld unter dem Polschuh 226 — d. Die Feldkurve 229.	
6. Die Ortskurve des Stromes und die Kippleistung	230
a. Das Spannungsdiagramm und die Ortskurve 230 — b. Die Ortskurve bei geradliniger Charakteristik 235 — c. Einfluß der Krümmung der Charakteristik 237 — d. Vergleich mit der Vollpolmaschine 238 — e. Die Kippleistung und das Kippmoment 242 — f. Der kapazitive Blindstrom 245.	
7. Die selbständige Schenkelpolmaschine bei kapazitiver Belastung	249
a. Vernachlässigung des Wirkwiderstandes 249 — b. Berücksichtigung des Wirkwiderstandes 252.	
E. Der Kurzschlußstrom	257
1. Der Dauerkurzschlußstrom und das Potiersche Dreieck 257	257
a. m -phasiger Kurzschluß 257 — b. Die Zweiphasenmaschine bei ein- und zweiphasigem Kurzschluß 260 — c. Einphasiger Kurzschluß bei Dreiphasenmaschinen in Sternschaltung 264 — d. Einphasiger Kurzschluß bei Dreieckschaltung 269 — e. Potiersches Dreieck und Belastungscharakteristik bei $\cos \varphi = 0$ 270 — f. Abschätzung der Nenn-durchflutung 273.	
2. Der Stoßkurzschlußstrom	277
a. Magnetische Spannung längs des Eisens der Streuwege vernachlässigt 277 — b. Einphasiger und mehrphasiger Kurzschluß 282 — c. Einfluß der magnetischen Spannung längs des Eisens der Streuwege 283 — d. Streunuten 290.	
F. Untersuchung der Betriebseigenschaften mit Bevorzugung der komplexen Schwingungsrechnung	291
1. Auffassung der Mehrphasen-Synchronmaschine als ideale Drehfeldmaschine	291
a. Ersatzstromkreis und Vektordiagramm 291 — b. Leerlauf und Kurzschluß 293 — c. Belastung auf eine äußere Impedanz mit konstantem Phasenwinkel 295.	
2. Die Synchronmaschine an einem unendlich starken Netz 296	296
a. Allgemeines über das Belasten 296 — b. Belastung bei konstanter Erregung 299 — c. Das Stromdiagramm für konstantes Drehmoment 304 — d. Das elastische Drehmoment 307 — e. Eigenschwingungen der Synchronmaschine 309.	
3. Besonderheiten der Maschine mit ausgeprägten Polen . . .	311
a. Der Drehmomentverlauf der Schenkelpolmaschine 312 — b. Die Reaktionsmaschine 313.	
4. Die Einphasenmaschine	315
a. Die Maschine ohne Dämpferwicklung auf dem Induktor 315 — b. Die Einphasenmaschine mit Dämpferwicklung 319.	
G. Ausgleichsvorgänge beim plötzlichen Kurzschluß der Synchronmaschine	322
1. Die physikalischen Vorgänge	322
a. Die kritischen Stromspitzen 322 — b. Die Drehmomentstöße 328 — c. Überspannungen in nicht kurzgeschlossenen Wicklungssträngen bei Mehrphasenmaschinen 330.	

	Seite
2. Vorgänge in der beiderseitig symmetrischen Mehrphasenmaschine	331
a. Die freien Strombeläge 331 — b. Der plötzliche Kurzschluß 337 —	
c. Die Drehmomentstöße 342 — d. Kurzschluß bei gleichzeitig abgeschalteter Erregung 344 — e. Aufhebung des Dauerkurzschlusses 344.	
3. Wechselwirkung zwischen symmetrisch-mehrphasigen und einphasigen Wicklungssystemen	345
4. Genauere Berücksichtigung der Unsymmetrie des Läuferwicklungssystems	347
a. Die vorausgesetzte Anordnung 347 — b. Vernachlässigung der Wirkwiderstände 350 — c. Einfluß der Wirkwiderstände 353.	
5. Oszillographische Aufnahmen des plötzlichen Kurzschlusses	359
H. Das Pendeln von Synchronmaschinen	363
1. Die parallel geschaltete Maschine bei ungleichförmigem Antriebsmoment	363
a. Allgemeines 363 — b. Eine Maschine an einem ruhigen Netz 365 —	
c. Einwirkung einer Netzpendelung auf eine Synchronmaschine mit konstantem Antriebs- oder Belastungsmoment 372 — d. Parallel- lauf zweier Maschinen bei Vernachlässigung der Dämpfung 373 —	
e. Das Verhalten von n parallel geschalteten Maschinen mit ungleichförmigem Antriebsmoment 376.	
2. Die nicht parallel geschaltete Maschine bei ungleichförmigem Antriebsmoment	383
a. Zusammenhang zwischen Drehmomentverlauf, Drehzahlverlauf und Pendelwinkel 383 — b. Ungleichförmigkeitsgrad, Trägheitsmoment und Amplitude des Pendelwinkels 385 — c. Die Rückwirkung des Netzes auf einen allein arbeitenden Generator 386.	
3. Freie (selbsterregte) Pendelungen beim Parallelbetrieb	387
4. Berechnung von Dämpferwicklungen	391
a. Das gesamte Moment elektromagnetischen Ursprungs der pendelnden Maschine mit ausgeprägten Polen und Dämpferwicklung 392 — b. Die vollkommene Käfigwicklung 397 — c. Die Erregerwicklung allein als Dämpfung wirkend 398 — d. Die unvollkommene Dämpferwicklung 398.	
5. Allgemeine Betrachtungen beim Entwurf eines Parallelbetriebes	400
J. Anlassen und Synchronisieren	402
1. Anlassen	402
2. Parallelschalten von Synchronmaschinen	403
K. Experimentelle Untersuchung der Synchronmaschine	407
1. Aufnahme der Betriebskurven	407
a. Leerlaufcharakteristik 407 — b. Die Kurven $\Phi_1(V_R)$, $\Phi_S(V_P)$ und $\Phi_K(V_F)$ bei Schenkelpolmaschinen 408 — c. Kurzschlußcharakteristik 410 — d. Belastungscharakteristiken 411 — e. Die Ortskurve des Stromes und die V-Kurven 417.	
2. Bestimmung des Wirkwiderstandes	420
a. Kurzschlußverfahren 421 — b. Unter- und Übererregungsverfahren 423.	
3. Bestimmung des Streu-Blindwiderstandes	425
a. Kurzschlußverfahren 425 — b. Bei Nutzfeldleere 427 — c. Mit Hilfe des Potierschen Dreiecks 429 — d. Bei ausgebautem Feldmagne-	

ten 431 — e. Bei stillstehendem Feldmagneten 432 — f. Der Blindwiderstand der Stirnstreuung 433.	
4. Bestimmung der Winkel β und β_i	435
a. Mit angekuppelter Hilfsmaschine 435 — b. Mit getrennter Hilfsmaschine 436 — c. Mit Oszillograph 439 — d. Mit Leistungszeiger 441 — e. Bestimmung der Faktoren k_g , k_l und k 443 — f. Bestimmung des Pendelwinkels β_p und des Ungleichförmigkeitsgrades 443.	
5. Bestimmung des Wirkungsgrades nach den REM	447
a. Direkte Messung des Wirkungsgrades 447 — b. Direkte Messung der Gesamtverluste 449 — c. Einzelverlustverfahren. 453.	
6. Bestimmung der Verluste aus der Erwärmung des Kühlmittels	455
a. Das Verfahren 455 — b. Messung der Erwärmung der Kühlluft 456 — c. Messung der Kühlluftmenge 457.	
7. Erwärmung und Isolierfestigkeit	459
a. Rückarbeitsverfahren 459 — b. Kunstschaltungen 460 — c. Leerlauf- und Kurzschlußverfahren 461 — d. Isolierfestigkeit 463.	
L. Entwurf der Synchronmaschine	464
1. Der scheinbare Drehschub	464
a. Definition 464 — b. Darstellung 465.	
2. Bestimmung der Hauptabmessungen	468
a. Ankerlänge 468 — b. Polteilung 470 — c. Einfluß der Frequenz 473 — d. Einfluß des Phasenwinkels; Motoren 474.	
3. Magnetische und elektrische Beanspruchungen	475
a. Strombelag und Luftspaltinduktion 475 — b. Die zulässigen magnetischen und elektrischen Beanspruchungen 479.	
4. Anker, Gehäuse und Feldmagnet.	482
a. Anker und Gehäuse 482 — b. Feldmagnet von Schenkelpolmaschinen 491 — c. Feldmagnet bei Turbogeneratoren 499.	
5. Ankernutung	501
a. Nutform 501 — b. Nutenzahl 502 — c. Nutbreite und Nuttiefe 503.	
6. Ankerwicklung	504
a. Schenkelpolmaschinen 504 — b. Turbogeneratoren 505 — c. Spannungsgrenzen 512.	
7. Luftspalt	515
a. Schenkelpolmaschine 516 — b. Vollpolmaschine 520.	
8. Feldmagnetwicklung	521
a. Leiterquerschnitt und Erregerspannung 521 — b. Günstigster Spulenseitenquerschnitt. Drahtwicklung 522 — c. Einlagige Hochkantwicklung 524 — d. Ausführbarkeit von einlagigen Wicklungen 525 — e. Erwärmung der Schenkelpolwicklung 526 — f. Dämpferwicklung der Schenkelpolmaschinen 528 — g. Induktorwicklung der Turbogeneratoren 532.	
M. Gang der Berechnung für eine Schenkelpolmaschine	535
1. Sinusförmige Feldkurve im Polschuhbereich bei Leerlauf und $\mu = \infty$	535
a. Hauptabmessungen 535 — b. Nutung und Ankerwicklung 536 — c. Ankerkern, Luftspalt und Feldmagnet 539 — d. Leerlaufcharakteristik 541 — e. Feldmagnetdurchflutung bei Belastung, Spannungsänderung 542 — f. Endgültiger Entwurf der Feldmagnetwicklung 544 — g. Die Feldkurve bei Belastung 546.	
2. Konstante Luftspaltbreite längs des Polschuhbogens . .	549

III. Einankerumformer.		Seite
A. Schaltung, Übersetzung und Stromwärme		553
1. Schaltung der Ankerwicklung und des Transformators		553
2. Übersetzung		555
a. Verhältnis der EMKe 555 — b. Verhältnis der Ströme 559.		
3. Die Stromwärme		561
a. Der resultierende Strom in einem Ankerleiter 561 — b. Die Stromwärme der Ankerwicklung 565 — c. Zulässiger Blindstrom 570 — d. Der Echtwiderstand der Ankerwicklung 571.		
B. Ankerrückwirkung, Spannungsverlust und Stromwendung		574
1. Ankerrückwirkung		574
a. Ankerquerfeld 575 — b. Ankerlängsfeld 579.		
2. Der Spannungsverlust in der Ankerwicklung		580
a. Der Wirkspannungsverlust auf der Wechselstromseite 581 — b. Wirkspannungsverlust auf der Gleichstromseite 583 — c. Der gesamte Wirkspannungsverlust in der Ankerwicklung des Umformers 586 — d. Der Streuspannungsverlust 592.		
3. Die Spannungsdiagramme und die Spannungsänderung des Umformers		595
4. Stromwendung		601
a. Umformer ohne Wendepole 601 — b. Umformer mit Wendepolen 602 — c. Rundfeuer 607.		
C. Betrieb des Umformers		610
1. Das Anlassen des Umformers		610
a. Anlassen von der Gleichstromseite 610 — b. Anlassen mit einem Synchron-Induktionsmotor ohne Synchronisiervorrichtung 612 — c. Anlassen mit Induktionsmotor und Synchronisiervorrichtung 613 — d. Anlassen mit Induktionsmotor ohne Synchronisiervorrichtung 614 — e. Asynchrones Anlassen 616 — f. Verfahren zur Änderung der Polarität 619.		
2. Spannungsreglung		620
a. Mittel zur Reglung 620 — b. Reglung mit Drehtransformator 621 — c. Reglung mit Drosselspule durch Änderung der Erregung 623 — d. Selbsttätige Spannungsreglung mit der Belastung 628 — e. Bemessung der Compoundwicklung 632.		
3. Der Parallelbetrieb		633
4. Einfluß von Spannungsschwankungen und Kurzschlüssen		636
5. Einfluß der Form der Spannungskurve		639
D. Sonderausführungen des Umformers		640
1. Umformer mit zwei Wicklungen		640
2. Spaltpol-Umformer		644
3. Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer		646
4. Doppelstrom-Generator		648
E. Experimentelle Untersuchung des Umformers		649
1. Aufnahme der Betriebskurven		649
a. Leerlauf und Kurzschluß 650 — b. Belastung 651.		
2. Bestimmung des Wirkungsgrades nach den REM		654
a. Direkte Messung des Wirkungsgrades 654 — b. Indirekte Messung des Wirkungsgrades 654 — c. Einzelverlustverfahren 658.		
3. Spannungsverlust		659
4. Andere Messungen		661

	Seite
F. Entwurf des Einankerumformers	661
1. Abmessungen und Beanspruchungen	661
a. Hauptabmessungen 661 — b. Polzahl und größte Leistung 662 —	
c. Die größte Spannung $\bar{U}$ 664 — d. Magnetische und elektrische Beanspruchungen 665.	
2. Aufbau des Umformers	667
a. Anker, Stromwender und Bürsten 667 — b. Luftspalt und Feldmagnetwicklung 670.	
Literaturverzeichnis	672
Abkürzungen	682
Bedeutung der verwendeten Formelzeichen	683
Namen- und Sachverzeichnis	698

Verzeichnis der Zahlentafeln.

1. Verhältnis k_D zwischen wirklicher und fiktiver Induktionsamplitude bei massivem Feldmagneten ohne Dämpferwicklung	49
2. Faktoren D und F zur angenäherten Berechnung der Leitwertbezugszahl λ_s''	92
3. Die Grenzwerte der Leitwertbezugszahl λ_s'' bei den angegebenen Grenzwerten von l_s/τ	93
4. Einfluß des Baustoffes der Läuferkappen eines Turbogenerators für 20000 kVA auf Zusatzverluste und Erwärmung	110
5. Zur Berechnung der Leerlaufcharakteristik. Kurve $B_L(\Theta)$	134
6. Zur Berechnung der Leerlaufcharakteristik. Kurve $b_L(2V_V)$	136
7. Leerlaufcharakteristik und Analyse der Feldkurven	138
8. Analyse der Feldkurve und der resultierenden EMK bei Belastung und Leerlauf	155
9. Vergleich der nach Gl. (231), Bd. I für sinusförmige Feldkurve berechneten und auf die Polteilung bezogenen Luftspaltbreite δ_x'/τ mit der nach Gl. (184a)	176
10. Zur Berechnung des Polradfeldes in der Pollücke	180
11. Polradfeld in der Pollücke für Polschuhe nach Gl. (184a)	185
12. Zur Berechnung des Ankerlängsfeldes in der Pollücke	219
13. Ankerlängsfeld in der Pollücke für Polschuhe nach Gl. (184a)	222
14. Zur Berechnung des Ankerquersfeldes in der Pollücke	224
15. Ankerquersfeld in der Pollücke für Polschuhe nach Gl. (184a)	226
16. Geschätzte Werte von κ in Gl. (289) und die zugehörigen Werte $\varepsilon_{b\min}$ des relativen Spannungsverlustes ε_b , mit denen $i_{kr} = 15\sqrt{2} J_N$ wird	282
17. Gegenüberstellung der kritischen Stromwerte eines Turbogenerators von 7000 kVA Scheinleistung für verschiedene Fälle	358
18. Zahlenwerte a , b und c der Gl. (550) und (551) für übererregte Maschinen mit $ \cos \varphi = 0,7$	472
19. Zusammenstellung der Werte $1,86 \cdot \lambda_N/q$	477
20. Zusammenstellung der Werte $1,86 \cdot \lambda_K/q$ für Turbogeneratoren	478
21. Magnetische Beanspruchungen in den Eisenteilen bei Maschinen mit Übererregung, $ \cos \varphi = 0,7$, 50 Hz und Leerlauf mit Nennspannung	480

	Seite
22. Zulässige Strombeanspruchungen der Wicklungen und Produkte aus Strombeanspruchung und Strombelag	482
23. Wicklungsfaktoren von Bruchlochwicklungen mit gerader Polpaarzahl und Wicklungsköpfen nach Abb. 399	505
24. Wicklungsfaktoren von Bruchlochwicklungen mit der Polpaarzahl 3 und Wicklungsköpfen nach Abb. 400	505
25. Spulenfaktoren von Wicklungen mit verkürztem Schritt	511
26. Wirtschaftliche Ankerspannungen bei Schenkelpolmaschinen	515
27. Wirtschaftliche Ankerspannungen bei Turbogeneratoren	515
28. Vergleich dreier Schenkelpolmaschinen für 750 kVA bei $\cos \varphi = 0,7$, 50 Hz und 1000 U/min	552
29. Übersetzung der EMKe $\ddot{u}_E = \bar{E}/\tilde{E}_1$ und Ströme $\ddot{u}_{Ji} = \bar{J}_i/\tilde{J}_i$, $\ddot{u}_J = \bar{J}/\tilde{J}$, $\ddot{u}_{JS} = \bar{J}/\tilde{J}_S$, wenn $\Phi_1 = \Phi_W$, $\varrho = 0$ und $\varphi - \beta_i = 0$	557
30. Verhältnis Φ_1/Φ_W [Gl. (580)] bei trapezförmiger Feldkurve	557
31. Verhältnis v der Stromwärmen bei Umformer- und reinem Gleichstrombetrieb	568
32. Grenzen der Augenblickswerte der Felderregerkurven des Wechselstromes in der geometrisch neutralen Zone	578
33. Die Faktoren γ zur Berechnung der Spannungsverluste in der Wicklung eines Einankerumformers	583
34. Die beiden Faktoren der rechten Seite der Gl. (647) bei verschiedenen Belastungszuständen	606
35. Größte Umformerleistung $\bar{N}_{\max}$ bei verschiedenen Drehzahlen, Polpaarzahl bei 50 Hz und größte Leistung $\bar{N}'_{\max}$ für asynchronen Anlauf . .	663