



H. Schaefer

Elektrische Kraftwerkstechnik

Grundlagen, Maschinen und Geräte,
Schutz-, Regelungs- und Automatisierungstechnik

Mit 94 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Dr.-Ing. Helmut Schaefer
o. Professor, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und
Kraftwerkstechnik der Technischen Universität München

ISBN-13:978-3-540-08865-3 e-ISBN-13:978-3-642-93091-1
DOI: 10.1007/978-3-642-93091-1

CIP–Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Schaefer, Helmut: Elektrische Kraftwerkstechnik: Grundlagen, Maschinen u. Geräte,
Schutz-, Regelungs- u. Automatisierungstechnik. – Berlin, Heidelberg, New York:
Springer, 1979.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Bei Vervielfältigung für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1979

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz: Roman Leipe GmbH, Hagenbach

Vorwort

Innerhalb der gesamten Energieversorgung kommt der elektrischen Energie besondere Bedeutung zu. Dies ist begründet in den hervorragenden spezifischen Merkmalen dieser Energieart, wie masseloser Energietransport, Umsetzbarkeit in jede Art von Nutzenergie und optimal mögliche Anpassung an die Forderung der Verbrauchersysteme. Darüberhinaus steht elektrische Energie wegen der hohen Verluste, der Schadstoffemission und des Einsatzes von Nuklearenergie bei der Erzeugung hinsichtlich der zukünftigen Bedarfsentwicklung im Vordergrund der energiepolitischen Diskussion.

Der Verbraucher fordert eine sichere, ausreichende, preisgünstige und umweltfreundliche Stromversorgung. Die stromerzeugenden Unternehmen fügen dem noch das Verlangen nach wirtschaftlichem Anlagenaufbau und -betrieb und optimalem Maschinenschutz hinzu. Diese Forderungen betreffen im Kraftwerk sowohl den elektrotechnischen als auch den maschinenbaulichen Teil.

Seit 1969 lese ich im Rahmen der Lehrveranstaltungen meines Lehrstuhls und Laboratoriums für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der Technischen Universität München über elektrische Kraftwerkstechnik. Dem Erarbeiten der Vorlesungskonzeption liegt eine Themenabgrenzung und Aufgabenteilung zugrunde, die auf dem neuen Studienplan im Fachbereich Elektrotechnik aufbaut. Dabei galt es, den Gesamtkomplex, aufbauend auf den in anderen Vorlesungen ermittelten theoretischen Grundlagen, möglichst anwendungsorientiert darzubieten und das Verständnis für das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten und Untersysteme zu wecken.

Schwerpunkte einer elektrischen Kraftwerkstechnik sind naturgemäß der Generator, der Blocktransformator, die Eigenbedarfsanlage, die Schutzeinrichtungen und die Steuer- und Regelanlagen. Bei der Behandlung der damit verbundenen Probleme wird es vielfach notwendig, auch maschinenbauliche Belange mit anzusprechen. Eine eindeutige Abgrenzung zwischen elektrischer und maschinenbaulicher Kraftwerkstechnik läßt sich jedoch nicht ziehen.

Neben dem umfassenden, ausgezeichneten Werk „Große Dampfkraftwerke“ von K. Schröder gibt es eine umfangreiche Fachliteratur über Fragen der elektrischen Kraftwerkstechnik, die zum großen Teil detailliert auf die Grundlagen und die konstruktiven Einzelheiten eingeht. Im Bestreben, dem Studenten, aber auch dem im Beruf Stehenden die Möglichkeit einer nicht zu umfangreichen, aber dennoch umfassenden Information zu geben – wie sie immer wieder gesucht wird –, wurde versucht, sowohl die wichtigsten theoretischen Grundlagen zu vermitteln als auch die grundsätzlichen energetischen Charakteristiken und das Zusammenwirken der einzelnen Systemkomponenten praxisgerecht zu erläutern. Ein derartiger Versuch führt zwangsläufig dazu, daß manche Teile des Stoffes nur kurz angesprochen oder gestreift werden können.

VI Vorwort

Bei der Stoffauswahl, der Formulierung des Textes und der Aufbereitung von Bild- und Datenmaterial wurde ich von meinen Mitarbeitern sehr unterstützt, und manche Hinweise aus den Kreisen meiner Hörer haben mit zur endgültigen Gestaltung des Buches geführt. Mein besonderer Dank gilt meinen wissenschaftlichen Assistenten Dipl.-Ing. W. Piller und Dipl.-Ing. U. Wolff, die mit ihren Beiträgen und Anregungen zur Gestaltung und textlichen Fassung sowie der kritischen Durchsicht des Manuskriptes wesentlich bei der Entstehung dieses Buches mitgewirkt haben.

München, im Oktober 1978

H. Schaefer

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Verwendete Formelzeichen und ihre Bedeutung | XI |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Entwicklung der Kraftwerkstechnik | 1 |
| 1.2 Entwicklung des Verbundbetriebs. | 4 |
| 1.2.1 Art und Aufgabe des Verbundbetriebs. | 4 |
| 1.2.2 Hoch- und Höchstspannungs-Drehstromübertragung. | 5 |
| 1.2.3 Hoch- und Höchstspannungs-Gleichstromübertragung. | 9 |
| 1.3 Struktur der Stromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland | 9 |
| 1.4 Grundbegriffe der Elektrizitätswirtschaft | 11 |
| 1.4.1 Leistungsbegriffe. | 12 |
| 1.4.2 Arbeitsbegriffe | 14 |
| 1.4.3 Zeitbegriffe und Verhältniszahlen. | 16 |
| 2 Grundsätzliche Überlegungen bei der Konzeption und Entwicklung von Kraftwerken | 18 |
| 2.1 Komplexität und gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Parameter | 18 |
| 2.2 Energieverbrauch und räumliche Zuordnung. | 19 |
| 2.3 Kraftwerksart und Brennstoff | 19 |
| 2.4 Kraftwerkskühlung | 19 |
| 2.5 Einbindung in das elektrische Netz | 22 |
| 2.6 Sonstige Einflußgrößen. | 23 |
| 2.7 Stellung der Elektrotechnik im Kraftwerksbau | 23 |
| 3 Generatoren | 25 |
| 3.1 Synchrongeneratoren für Drehstrom | 25 |
| 3.1.1 Allgemeines | 25 |
| 3.1.1.1 Turbogeneratoren | 26 |
| 3.1.1.2 Wasserkraftgeneratoren. | 31 |
| 3.1.1.3 Antrieb durch Dieselmotoren oder Dampfmaschinen | 32 |
| 3.1.2 Kühlung. | 32 |
| 3.1.3 Erregung | 36 |
| 3.1.4 Zeigerdiagramm des Vollpolsynchrongenerators | 39 |
| 3.1.5 Betriebszustände der Synchronmaschine am Netz | 39 |
| 3.1.5.1 V-Kurven. | 40 |
| 3.1.5.2 Die natürlichen Spannungskennlinien des Synchrongenerators. | 42 |

VIII Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1.6 | Wirkleistung, Drehmoment und Stabilität. | 44 |
| 3.1.6.1 | Allgemeines | 44 |
| 3.1.6.2 | Statische Stabilität. | 45 |
| 3.1.6.3 | Dynamische Stabilität | 45 |
| 3.1.6.4 | Mechanisches Modell des Synchrongenerators | 46 |
| 3.1.6.5 | Stabilitätsprobleme durch die angeschlossenen Leitungen | 48 |
| 3.1.6.6 | Einfluß der Spannungsregelung auf die Stabilität | 49 |
| 3.1.6.7 | Pendelungen bei Kurzschluß | 50 |
| 3.1.6.8 | Pendelungen beim Synchronisieren | 54 |
| 3.2 | Synchrongeneratoren für Bahnstrom | 55 |
| 3.3 | Asynchrongeneratoren | 56 |
| 4 | Transformatoren | 58 |
| 4.1 | Grundsätzliches Betriebsverhalten. | 58 |
| 4.1.1 | Ersatzschaltbild des Transformators | 58 |
| 4.1.2 | Leerlauf. | 58 |
| 4.1.3 | Kurzschluß. | 59 |
| 4.1.4 | Spannungsänderung bei Belastung. | 60 |
| 4.1.5 | Wirtschaftliche Größe und Verlustverhalten | 62 |
| 4.2 | Spannungsregelung | 64 |
| 4.2.1 | Transformator mit Regelwicklung. | 64 |
| 4.2.2 | Transformator mit Stufenschalter | 64 |
| 4.2.3 | Spannungsregelung durch Zusatztransformator | 65 |
| 4.3 | Technische Ausführung von Maschinentransformatoren | 66 |
| 4.3.1 | Bauformen und Transport. | 66 |
| 4.3.2 | Kühlung. | 66 |
| 4.3.3 | Geräuschbildung | 67 |
| 5 | Verteilungsanlagen im Kraftwerk | 68 |
| 5.1 | Bauweise von Kraftwerken | 68 |
| 5.1.1 | Sammelschienenkraftwerk. | 68 |
| 5.1.2 | Blockkraftwerk. | 68 |
| 5.2 | Ableitung und Umspannung | 69 |
| 5.2.1 | Generatableitung | 69 |
| 5.2.2 | Transformator- und Schalteranordnung | 70 |
| 5.2.3 | Sternpunkt in Drehstromnetzen | 70 |
| 5.3 | Eigenbedarfsanlagen von Kraftwerken | 71 |
| 5.3.1 | Aufgabe des Eigenbedarfs | 71 |
| 5.3.2 | Grundsätzliche Kriterien und versorgungstechnische Ausführungen | 72 |
| 5.3.3 | Eigenbedarfsschaltanlagen. | 73 |
| 5.3.4 | Eigenbedarfsschaltwarte | 74 |
| 5.3.5 | Gleichstromanlage | 74 |
| 6 | Schutzeinrichtungen | 76 |
| 6.1 | Allgemeines | 76 |
| 6.2 | Generatorschutz | 77 |
| 6.2.1 | Generatorschutz bei inneren Fehlern. | 77 |
| 6.2.1.1 | Schutz bei Wicklungsschluß. | 77 |
| 6.2.1.2 | Schutz bei Windungsschluß | 78 |
| 6.2.1.3 | Schutz bei Ständererdschluß | 79 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2.1.4 | Schutz bei Rotorerdschluß | 81 |
| 6.2.1.5 | Schnellentregung | 81 |
| 6.2.2 | Generatorschutz gegen äußere Einflüsse | 82 |
| 6.2.2.1 | Überstrom- und Überlastschutz | 82 |
| 6.2.2.2 | Spannungssteigerungsschutz | 83 |
| 6.2.2.3 | Schieflastschutz | 83 |
| 6.2.2.4 | Rückleistungsschutz | 83 |
| 6.3 | Transformatorschutz | 84 |
| 6.3.1 | Transformatorschutz bei inneren Fehlern | 84 |
| 6.3.1.1 | Buchholz-Schutz | 84 |
| 6.3.1.2 | Differentialschutz | 85 |
| 6.3.2 | Transformatorschutz gegen äußere Fehler | 85 |
| 6.3.2.1 | Überstrom- und Überlastschutz | 85 |
| 6.3.2.2 | Überspannungsschutz | 85 |
| 7 | Spannungs- und Blindleistungsregelung | 86 |
| 7.1 | Grundprinzipien der Spannungsregelung | 86 |
| 7.1.1 | Allgemeines und Begriffsbestimmungen | 86 |
| 7.1.2 | Generator im Alleinbetrieb | 88 |
| 7.1.2.1 | Astatische Regelung | 88 |
| 7.1.2.2 | Laststromgesteuerte Regelung mit Statikwiderstand | 89 |
| 7.1.2.3 | Laststromgesteuerte Regelung mit Statikimpedanz | 90 |
| 7.2 | Regelung beim Parallelbetrieb von Generatoren | 91 |
| 7.2.1 | Ein Generator astatisch geregelt, ein Generator ungeregelt | 92 |
| 7.2.2 | Ein Generator astatisch geregelt, ein Generator kennliniengeregt, mit Statikwiderstand | 94 |
| 7.2.3 | Ein Generator astatisch geregelt, ein Generator kennliniengeregt, mit Statikimpedanz | 94 |
| 7.2.4 | Beide Generatoren kennliniengeregt, mit Statikwiderstand | 94 |
| 7.2.5 | Beide Generatoren kennliniengeregt, mit Statikimpedanz | 98 |
| 7.2.6 | Summenstromregelung aller Generatoren, mit Statikwiderstand | 98 |
| 7.3 | Schlußbetrachtungen | 98 |
| 8 | Frequenz-Leistungs-Regelung | 99 |
| 8.1 | Maschinenregelung im Kraftwerk | 99 |
| 8.1.1 | Allgemeines | 99 |
| 8.1.2 | Regelung von parallel arbeitenden Maschinen | 100 |
| 8.2 | Regelung von parallel arbeitenden Kraftwerken | 102 |
| 8.3 | Wechselwirkungen zwischen der Erzeuger- und Abnehmerstatik | 103 |
| 8.4 | Regelung bei Verbundnetzen | 106 |
| 8.4.1 | Frequenz- und Fahrplan-geregelte Netzgruppen | 106 |
| 8.4.2 | Frequenz-Übergabeleistungs-Regelung | 107 |
| 9 | Automatisierung im Dampfkraftwerk | 110 |
| 9.1 | Allgemeines | 110 |
| 9.2 | Wirtschaftliche und betriebliche Gesichtspunkte | 111 |
| 9.3 | Reine Rechner-Automatisierung | 112 |
| 9.4 | Funktionsgruppenautomatik | 114 |
| 9.4.1 | Programmablauf einer Untergruppensteuerung | 116 |
| 9.4.2 | Gerätetechnik und mechanischer Aufbau der Funktionsgruppenautomatik | 118 |

X Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------------|---|------------|
| 9.4.2.1 | Kommandobaustein | 118 |
| 9.4.2.2 | Verriegelungsbaustein | 119 |
| 9.4.2.3 | Schrittschaltwerk | 119 |
| 9.4.2.4 | Überwachungsbaustein | 119 |
| 9.4.2.5 | Betätigungsbaustein | 120 |
| 9.4.2.6 | Programmierung der Funktionsgruppenautomatik . . . | 120 |
| 9.4.2.7 | Freilastgeräte und ihre Prozeßauswirkungen | 121 |
| 9.4.2.8 | Prozeßführung durch das Blockleitgerät | 122 |
| 9.5 | Meßdatenverarbeitung im Wärmekraftwerk | 123 |
| 9.5.1 | Protokollierung des Prozeßablaufes | 124 |
| 9.5.2 | Aufbau und Funktion der Prozeßrechneranlage | 125 |
| Literatur | | 127 |
| Sachverzeichnis | | 129 |

Verwendete Formelzeichen und ihre Bedeutung

| | | | |
|---------------------------|--|----------------------|--|
| A | Fläche | M_{el} | Elektrisches Moment |
| A | Strombelag | M_{mech} | Mechanisches Moment |
| C | Ausnutzungsziffer | M_S | Synchronisierendes Moment |
| C | Kapazität | m | Masse |
| c_i | Federkonstante | m | Belastungsfaktor |
| c_{ix} | Federkraft | m_o | Lastverhältnis |
| c_{ni} | Verstärkung | n | Drehzahl |
| d | Läuferdurchmesser | n | Ausnutzungsfaktor |
| $d\%$ | Bleibende Drehzahländerung | n_B | Ausnutzungsfaktor bezogen auf die Betriebszeit |
| \underline{E} | Im Anker erzeugte Spannung | γ | Kreisfrequenz |
| f | Frequenz | ω | Winkelgeschwindigkeit |
| f_N | Nennfrequenz | P | Leistung |
| f_o | Leerlauf Frequenz | P_B | Blindleistung |
| g | Erdbeschleunigung | P_{inst} | Installierte Leistung |
| g | Gleichzeitigkeitsfaktor | P_S | Scheinleistung |
| \underline{I} | Strom, Scheinstrom | $P_{\dot{u}}$ | Übergabeleistung |
| I, I_S | Strom, Scheinstrom | P_W | Wirkleistung |
| I_B | Blindstrom | p | Polpaarzahl |
| $\underline{I}_{\dot{e}}$ | Gesamtstrom im Läufer | φ | Phasenwinkel |
| $\underline{I}_{\dot{e}}$ | Gesamtstrom im Läufer, auf Ständer umgerechnet | R | Ohmscher Widerstand |
| I_{eN} | Nennererregstrom | r | Reservefaktor |
| I_{eo} | Leerläufererregstrom | s | Schlupf |
| I_k | Kurzschlußstrom bei Nennerregung, Dauerkurzschlußstrom | T | Zeitdauer |
| \underline{I}'_k | Übergangskurzschlußwechselstrom | T_n | Ausnutzungsstundenzahl |
| I_{kN} | Nennkurzschlußstrom | T_o | Stundenzahl eines Zeitraumes |
| I_{ko} | Kurzschlußstrom bei Leerläuferregung | t | Betriebsdauer |
| \underline{I}_{μ} | Magnetisierungsstrom | ϑ | Polradwinkel, Lastwinkel |
| I_N | Nennstrom | \underline{U} | Spannung, Klemmenspannung (Vektor) |
| $\underline{I}_{R(S,T)}$ | Phasenströme in R, S bzw. T | \underline{U} | Spannung, Klemmenspannung |
| I_W | Wirkstrom | \underline{U}_P | Polradspannung |
| $\underline{I}X_d$ | Spannung an der Generatorreaktanz | \underline{U}_V | Verbraucherspannung |
| \underline{I}_{1o} | Primärer Leerlaufstrom | \underline{U}_{2o} | Sekundäre Leerlaufspannung |
| \underline{I}_2 | Sekundärstrom | u | Bezogene Spannung |
| \underline{I}_{2kd} | Sekundärer Dauerkurzschlußstrom | u_N | Bezogene ohmsche Spannung |
| \underline{I}_{2N} | Sekundärer Nennstrom | u_x | Bezogene Streuspannung |
| i_R | Stromwandlersekundärstrom in Phase R | $u'\varphi$ | Bezogene Spannungsabfälle |
| J | Trägheitsmoment | $u''\varphi$ | Bezogene Spannungsabfälle |
| K | Konstante | \dot{u} | Nennübersetzungsverhältnis |
| K_A | Leistungszahl der Abnehmer | V | Verlustziffer |
| K_E | Leistungszahl der Erzeuger | v | Geschwindigkeit |
| k | Verfügbarkeitsfaktor | W | Arbeit |
| k_o | Leerlauf-Kurzschlußverhältnis | X | Reaktanz, Blindwiderstand |
| L | Induktivität | X'_d | Transientreaktanz des Generators |
| l | Länge | x | Weg |
| M | Drehmoment, Moment | ξ | Gesamtwicklungsfaktor |
| M | Gegenseitige Induktion | \underline{Z} | Komplexer Widerstand |
| | | Z | Wellenwiderstand |