

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines zur elektrischen Energieversorgung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung, Primärenergie und elektrische Energie . . . . .	1
1.2	Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Berechnung in Drehstromnetzen . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1	Überblick . . . . .	15
2.2	Komplexe Größen . . . . .	15
2.2.1	Die Transformation zeitlich sinusförmig verlaufender Größen in die komplexe Ebene . . . . .	15
2.2.2	Die komplexe Leistung im Wechsel- und Drehstromnetz . . . . .	17
2.3	Zählpfeile und Zählpfeilsysteme . . . . .	20
2.4	Symmetrische Komponenten . . . . .	28
2.4.1	Allgemeines . . . . .	28
2.4.2	Symmetrierung und Entsymmetrierung . . . . .	28
2.4.3	Impedanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem . . . . .	33
2.4.4	Drehstromleistung und Komponentenleistungen . . . . .	36
2.5	Modale Komponenten . . . . .	37
2.5.1	Allgemeiner Ansatz . . . . .	38
2.5.2	Bestimmung der Transformationsmatrix . . . . .	40
2.5.3	Transformation von Zeigergrößen . . . . .	41
2.5.4	Leistung in modalen Komponenten . . . . .	42
2.5.5	Gebräuchliche Komponentensysteme . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Thermische Kraftwerke . . . . .</b>	<b>49</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	49
3.2	Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastanlagen . . . . .	53
3.3	Thermische Prozesse, Wirkungsgrad . . . . .	57
3.4	Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	76
3.5	Dampfturbine . . . . .	80
3.6	Allgemeine Anordnung in Dampfkraftwerken . . . . .	83
3.7	Nukleare Dampferzeugung – Kernkraftwerke . . . . .	88
<b>4</b>	<b>Wasserkraftwerke und Windenergieanlagen . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1	Bedeutung . . . . .	95
4.2	Wasserkraftgeneratoren . . . . .	96

4.3	Wasserturbinen . . . . .	98
4.4	Laufwasser- und Speicherkraftwerke . . . . .	104
4.5	Windenergieanlagen . . . . .	113
5	<b>Drehstromgeneratoren . . . . .</b>	121
5.1	Allgemeines . . . . .	121
5.2	Gleichungssystem der Synchronmaschine . . . . .	128
5.3	Stationärer Betrieb . . . . .	132
5.4	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie . . . . .	142
5.5	Nichtstationärer Betrieb . . . . .	144
5.5.1	Operatorenungleichungen . . . . .	145
5.5.2	Zeitlicher Stromverlauf bei dreipoligem Klemmenkurzschluss .	149
5.5.3	Kurzschlussdrehmomente und Fundamentbeanspruchung .	154
5.5.4	Ersatzschaltungen für den subtransienten und den transienten Zustand . . . . .	163
6	<b>Generator- und Turbinenregelung . . . . .</b>	169
6.1	Erregungseinrichtungen . . . . .	169
6.2	Spannungsregelung . . . . .	173
6.2.1	Statik der Spannungsregelung . . . . .	173
6.2.2	Spannungsregelung eines Turbogenerators . . . . .	173
6.3	Turbinenregelung . . . . .	182
6.3.1	Bilanzmodell des Netzes . . . . .	182
6.3.2	Primärregelung . . . . .	185
6.3.3	Sekundärregelung . . . . .	188
7	<b>Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken . . . . .</b>	193
7.1	Aufgabe des Eigenbedarfs . . . . .	193
7.2	Aufbau von Eigenbedarfsnetzen, Prinzipschaltung . . . . .	194
7.2.1	Auswahl der Eigenbedarfstransformatoren . . . . .	196
7.2.2	Niederspannungsversorgung . . . . .	197
7.3	Sicherstellung des Eigenbedarfs in thermischen Kraftwerken .	199
7.3.1	Grundüberlegungen . . . . .	199
7.3.2	Reserveversorgung des Eigenbedarfs . . . . .	199
7.3.3	Notstillsetzen des Blockes, Notstromversorgung . . . . .	203
7.4	Spannungshaltung und Schnellumschaltung . . . . .	204
7.4.1	Spannungseinbruch beim Einschalten von Motoren . . . . .	204
7.4.2	Umschaltung des Eigenbedarfs . . . . .	207
7.5	Schutz von Kraftwerksblöcken . . . . .	213
7.5.1	Allgemeines . . . . .	214
7.5.2	Schutzmaßnahmen für Kraftwerksblöcke . . . . .	215
8	<b>Transformatoren . . . . .</b>	219
8.1	Einsatz der Transformatoren . . . . .	219
8.2	Schaltgruppen und Schaltungen . . . . .	221

8.3	Zwei- und Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	225
8.3.1	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm . . . . .	225
8.3.2	Leistungsaufnahme und Spannungsänderung bei Belastung . . . . .	229
8.3.3	Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	231
8.3.4	Nullsystem und Sternpunktbelastbarkeit . . . . .	235
8.3.5	Rushströme beim Einschalten . . . . .	238
8.4	Wicklungen und Stufenschalter . . . . .	241
8.5	Spartransformatoren . . . . .	245
8.6	Ersatzschaltungen in symmetrischen Komponenten . . . . .	248
8.6.1	Impedanzersatzschaltungen . . . . .	248
8.6.2	Admittanzersatzschaltungen . . . . .	255
8.6.3	Ersatzschaltungen ohne Übertrager . . . . .	257
 9	 Freileitungen . . . . .	259
9.1	Mastformen, Kosten . . . . .	259
9.2	Aufbau der Freileitungen . . . . .	262
9.3	Mittlere geometrische Abstände . . . . .	267
9.4	Impedanzen . . . . .	272
9.4.1	Allgemeines . . . . .	272
9.4.2	Selbst- und Gegenimpedanzen von Leiterschleifen . . . . .	273
9.4.3	Impedanzen in symmetrischen Komponenten . . . . .	282
9.4.4	Induktive Beeinflussung . . . . .	291
9.5	Kapazitäten . . . . .	293
9.5.1	Allgemeines . . . . .	293
9.5.2	Selbst- und Gegenpotenzialkoeffizienten von Leiterschleifen . . . . .	295
9.5.3	Admittanzen in symmetrischen Komponenten . . . . .	299
9.5.4	Oberflächenrandfeldstärke . . . . .	304
9.6	Die Leitung im stationären Betrieb . . . . .	307
9.6.1	Leitungsgleichungen . . . . .	307
9.6.2	Ersatzschaltungen für die kurze Leistung . . . . .	309
9.6.3	Wellenwiderstand und natürliche Leistung . . . . .	310
9.6.4	Verluste, wirtschaftliche Stromdichte . . . . .	312
9.7	Wirkung der Freileitungen auf den Menschen . . . . .	315
9.7.1	Elektrische und magnetische Feldstärke am Erdboden . . . . .	315
9.7.2	HF-Störfeldstärke und Geräuschpegel . . . . .	321
 10	 Kabel . . . . .	325
10.1	Allgemeines . . . . .	325
10.2	Aufbau der Kabel . . . . .	325
10.3	Kabelauslegung und Belastbarkeit . . . . .	331
10.3.1	Allgemeine Überlegungen . . . . .	331
10.3.2	Strombelastbarkeit . . . . .	332
10.3.3	Verlustberechnung . . . . .	334
10.3.4	Wärmewiderstände . . . . .	339
10.3.5	Normalbedingungen für Kabelbelastung und Häufung . . . . .	341

10.3.6	Kabelbelastung bei Bodenaustrocknung und wechselnder Last	344
10.4	Impedanzen und Kapazitäten . . . . .	348
10.4.1	Impedanzen im Mit- und Nullsystem . . . . .	348
10.4.2	Mit- und Nullimpedanz von Drehstromkabeln mit geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen . . . . .	356
10.4.3	Kapazitäten, Ladeleistungen und kapazitiver Erschlussstrom .	366
10.5	Hochspannungs- und Hochleistungskabel . . . . .	369
<b>11</b>	<b>Schalter und Schaltanlagen</b> . . . . .	<b>377</b>
11.1	Leistungsschalter . . . . .	377
11.1.1	Anforderungen an Leistungsschalter . . . . .	377
11.1.2	Ölschalter, ölarme Schalter . . . . .	380
11.1.3	Vakuumschalter . . . . .	380
11.1.4	Druckluftschalter . . . . .	382
11.1.5	Generatorschalter . . . . .	385
11.1.6	SF <sub>6</sub> -Schalter . . . . .	385
11.2	Schaltanlagen . . . . .	387
11.2.1	Allgemeines . . . . .	387
11.2.2	Schaltungen in Schaltanlagen . . . . .	388
11.2.3	Innenraum- und Freiluftschaftanlagen . . . . .	391
11.2.4	Vollgekapselte, SF <sub>6</sub> -isierte Schaltanlagen . . . . .	394
<b>12</b>	<b>Drehstromnetze</b> . . . . .	<b>399</b>
12.1	Netzaufbau, Verbundnetz . . . . .	399
12.2	Höchstspannungsübertragung . . . . .	402
12.3	Versorgung großer Städte oder Ballungsräume . . . . .	409
12.4	Verteilungsnetze . . . . .	415
12.5	Industrielle Stromversorgung . . . . .	422
12.6	Blindleistungsbedarf und Kompensation . . . . .	424
12.6.1	Blindleistungsbedarf der Verbraucher . . . . .	424
12.6.2	Blindleistungsbedarf des Netzes . . . . .	429
12.6.3	Blindleistungskompensation . . . . .	431
12.6.4	Parallelresonanz und Absaugung von Stromoberschwingungen	437
12.7	Netzschutz . . . . .	443
12.7.1	Überblick . . . . .	443
12.7.2	Leitungsschutz . . . . .	445
12.7.3	Transformatorschutz . . . . .	447
<b>13</b>	<b>Mathematische Beschreibung des Drehstromnetzes</b> . . . . .	<b>451</b>
13.1	Netzumformungen . . . . .	451
13.2	Gleichungssysteme mit Admittanz-, Impedanz- und Hybridmatrix . . . . .	451
13.2.1	Knotenpunktverfahren, Admittanzmatrix . . . . .	453
13.2.2	Impedanzmatrix . . . . .	457
13.2.3	Hybridmatrix . . . . .	461

13.3	Quer- und Längsunsymmetrien . . . . .	467
13.4	Einfachquerfehler . . . . .	473
13.4.1	Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle . . . . .	474
13.4.2	Einpoliger Erdkurzschluss . . . . .	478
13.5	Einfachlängsfehler . . . . .	480
13.5.1	Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle . . . . .	480
13.5.2	Einpoliger Längsfehler . . . . .	481
13.5.3	Zweipoliger Längsfehler . . . . .	483
13.6	Doppelerdkurzschluss und andere Doppelfehler . . . . .	484
13.7	Fehlermatrizenverfahren . . . . .	490
13.7.1	Fehlerbedingungen . . . . .	492
13.7.2	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Admittanzmatrix . . . . .	493
13.7.3	Nachbildung von Unterbrechungen an der Admittanzmatrix . . . . .	495
13.7.4	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Impedanzmatrix . . . . .	498
13.7.5	Nachbildung von Kurzschlüssen und Unterbrechungen in modalen Komponenten . . . . .	498
<b>14</b>	<b>Leistungsfluss im Drehstromnetz . . . . .</b>	<b>499</b>
14.1	Aufgabe . . . . .	499
14.2	Leistungsfluss auf Leitungen . . . . .	499
14.2.1	Vorgabe der Belastung als konstante Impedanz . . . . .	501
14.2.2	Vorgabe der Belastung durch konstanten Strom . . . . .	502
14.2.3	Vorgabe der Belastung durch konstante Leistung . . . . .	505
14.2.4	Vorgabe der Abnahmleistungen als Funktion der Spannung . . . . .	506
14.2.5	Leistungsfluss auf Leitungen bei mehreren Abnahmen . . . . .	507
14.2.6	Leistungsfluss in Ringnetzen . . . . .	510
14.3	Leistungsfluss in vermaschten Netzen . . . . .	511
14.3.1	Methoden der Leistungsflussberechnung - Einführung . . . . .	511
14.3.2	Knotenpunktverfahren . . . . .	515
14.3.3	Newton-Verfahren . . . . .	522
14.3.4	Entkoppelte Leistungsflussberechnung . . . . .	524
14.3.5	Gleichstromleistungsflussberechnung . . . . .	526
<b>15</b>	<b>Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchungen . . . . .</b>	<b>529</b>
15.1	Einführung . . . . .	529
15.2	Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstromes . . . . .	533
15.3	Methoden zur Berechnung der Kurzschlussströme . . . . .	539
15.3.1	Allgemeines . . . . .	539
15.3.2	Überlagerungsverfahren . . . . .	539
15.3.3	Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle . . . . .	546
15.4	Nachbildung der Betriebsmittel beim Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle . . . . .	551
15.4.1	Allgemeines . . . . .	551
15.4.2	Netzeinspeisungen . . . . .	552

15.4.3	Leitungen (Freileitungen und Kabel) . . . . .	554
15.4.4	Transformatoren . . . . .	555
15.4.5	Generatoren . . . . .	561
15.4.6	Kraftwerksblöcke mit Stufenschalter . . . . .	565
15.4.7	Kraftwerksblöcke ohne Stufenschalter . . . . .	572
15.4.8	Korrekturfaktoren bei Kurzschluss zwischen Generator und Blocktransformator . . . . .	575
15.4.9	Motoren . . . . .	582
15.5	Kurzschlussströme und ihre Berechnung . . . . .	585
15.5.1	Allgemeines . . . . .	585
15.5.2	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom . . . . .	592
15.5.3	Stosskurzschlussstrom . . . . .	609
15.5.4	Ausschaltstrom . . . . .	617
15.5.5	Dauerkurzschlussstrom . . . . .	624
15.5.6	Beitrag von Asynchronmotoren zum Kurzschlussstrom . . . . .	628
15.5.7	Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom und Joule-Integral	640
15.6	Berechnung der Kurzschlussströme im per-unit- oder im %/MVA-System . . . . .	652
15.6.1	Physikalische, relative und semirelative Größen . . . . .	652
15.6.2	Definition der Größen des p.u.-Systems und des %/MVA-Systems . . . . .	654
15.6.3	Kurzschlussstromberechnung im %/MVA-System . . . . .	655
15.7	Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	661
15.7.1	Grundüberlegungen zu Kurzschlusskräften . . . . .	661
15.7.2	Beanspruchung biegesteifer Leiter und Stützpunktbeanspruchung . . . . .	668
15.7.3	Beanspruchung in Hochspannungsanlagen mit Seilen . . . . .	683
15.7.4	Thermische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	689
15.8	Begrenzung der Kurzschlussströme . . . . .	694
15.9.	Kurzschlussstromberechnung in Niederspannungsnetzen . . . . .	699
15.9.1	Allgemeines . . . . .	699
15.9.2	Berechnung der Kurzschlussströme . . . . .	700
15.9.3	Berechnungsbeispiel Niederspannung-Hausanschluss . . . . .	710
15.9.4	Maximal zulässige Leitungslänge von Niederspannungs-Endstromkreisen in TN-Netzen . . . . .	718
16	<b>Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen</b> . . . . .	723
16.1	Überblick . . . . .	723
16.2	Sternpunktbehandlung . . . . .	726
16.2.1	Einführung . . . . .	726
16.2.2	Netze mit isoliertem Sternpunkt . . . . .	726
16.2.3	Netze mit Erdschlusskompensation . . . . .	728
16.2.4	Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung . . . . .	732
16.3	Sternpunktbehandlung auf der OS- und US-Seite eines Yy0 d5-Transformators . . . . .	734

16.4	Erdung in Hochspannungsnetzen . . . . .	738
16.4.1	Über Erde fließende Teilkurzschlussströme . . . . .	738
16.4.2	Schleifenimpedanzen, Erdseilreduktionsfaktoren und Kettenleiterimpedanzen . . . . .	742
16.4.3	Erdkurzschluss in der Nähe einer Anlage . . . . .	748
16.5	Stromverteilung für Kabel mit geerdeten Mänteln (Schirmen) bei Erdkurzschluss . . . . .	754
16.5.1	Stromverteilung und Reduktionsfaktor bei Dreileiterkabeln . . . . .	755
16.5.2	Stromverteilung und Reduktionsfaktor bei Einleiterkabeln . . . . .	761
16.6	Ausbreitungswiderstände von Erdern und Erdungsanlagen . . . . .	766
16.7	Bau von Erdungsanlagen und Erdungsmessungen . . . . .	770
16.8	Beeinflussung . . . . .	776
17	<b>Überspannungen und Isolationskoordination</b> . . . . .	783
17.1	Übersicht . . . . .	783
17.2	Spannungserhöhungen . . . . .	784
17.2.1	Zeitweilige Spannungserhöhung bei Erdschluss . . . . .	784
17.2.2	Zeitweilige Spannungserhöhung bei Lastabwurf, Ferranti-Effekt	784
17.2.3	Spannungserhöhung durch kapazitive Unsymmetrie . . . . .	790
17.2.4	Resonanzüberspannungen . . . . .	791
17.3	Innere Überspannungen . . . . .	792
17.3.1	Transiente Erdschlussüberspannungen . . . . .	792
17.3.2	Überspannungen beim Schalten kleiner induktiver Ströme . . . . .	795
17.3.3	Überspannungen beim Schalten von Kondensatoren und Leitungen . . . . .	802
17.3.4	Überspannungen beim Ausschalten von Kurzschlussströmen . . . . .	807
17.4	Äußere Überspannungen . . . . .	815
17.4.1	Überblick . . . . .	815
17.4.2	Atmosphärische Entladung und Blitz einschlag . . . . .	816
17.4.3	Wanderwellen auf Leitungen . . . . .	818
17.5	Isolationsminderung . . . . .	827
17.6	Isolationskoordination . . . . .	832
17.7	Auswahl und Einsatz von Überspannungsableitern . . . . .	836
17.7.1	Funkenstreckenableiter . . . . .	836
17.7.2	Metalloxidableiter . . . . .	839
17.7.3	Ableiterabsatz . . . . .	840
18	<b>Stabilität der Drehstromübertragung</b> . . . . .	849
18.1	Einführung, Begriff der Stabilität, Modellbildung . . . . .	849
18.2	Statische Stabilität . . . . .	854
18.2.1	Statische Stabilität ohne Regelung . . . . .	854
18.2.2	Statische Stabilität mit Regelung . . . . .	858
18.2.3	Selbsterregung . . . . .	862
18.3	Transiente Stabilität . . . . .	865

18.3.1 Einflussgrößen und Untersuchungsmethode . . . . .	865
18.3.2 Transiente Stabilität abhängig von Kurzschlussart, -dauer und Netzaufbau . . . . .	869
18.3.3 Stabilitätsverlust und Resynchronisierung . . . . .	874
18.3.4 Einfluss von Generatorauslegung und Erregersystem auf die transiente Stabilität . . . . .	879
<b>19 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung . . . . .</b>	<b>883</b>
19.1 Wirkungsweise . . . . .	883
19.2 Technische Besonderheiten der HGÜ gegenüber der DHÜ . . .	885
19.3 Entwicklung der HGÜ . . . . .	885
19.4 Betriebsmittel der HGÜ . . . . .	889
19.4.1 Gesamtanordnung . . . . .	889
19.4.2 HGÜ-Stationen . . . . .	892
19.4.3 HGÜ-Freileitungen und -Kabel . . . . .	895
19.5 Kostenvergleich HGÜ mit DHÜ . . . . .	898
19.6 Weiterentwicklung der HGÜ . . . . .	899
<b>20 Berechnung transienter Vorgänge in Drehstromnetzen . . . . .</b>	<b>903</b>
20.1 Überblick . . . . .	903
20.2 Gleichungssysteme zur Berechnung transienter Vorgänge . . .	903
20.3 Differenzen – Leitwert – Verfahren . . . . .	906
20.3.1 Diskretisierungsverfahren . . . . .	906
20.3.2 Differenzengleichungen der induktiven Zweige . . . . .	908
20.3.3 Differenzengleichungen der kapazitiven Zweige . . . . .	909
20.3.4 Differenzengleichungen der resistiven Zweige . . . . .	911
20.3.5 Differenzengleichungen der Leitungen . . . . .	911
20.3.6 Differenzengleichungssystem des Netzes . . . . .	920
20.3.7 Einschalten einer 380-kV-Freileitung . . . . .	922
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>929</b>
<b>Formelzeichen und Nebenzeichen . . . . .</b>	<b>1003</b>
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>1009</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>1049</b>