

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines zur elektrischen Energieversorgung	1
1.1	Einführung, Primärenergie und elektrische Energie	1
1.2	Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie .	7
2	Grundlagen zur Berechnung in Drehstromnetzen	15
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
3	Thermische Kraftwerke	49
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
4	Wasserkraftwerke und Windenergieanlagen	95
4.1	Bedeutung	95
4.2	Wasserkraftgeneratoren	96

4.3	Wasserturbinen	98
4.4	Laufwasser- und Speicherkraftwerke	104
4.5	Windenergieanlagen	113
5	Drehstromgeneratoren	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	Operatorenleichungen	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	Generator- und Turbinenregelung	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	Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken	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	Transformatoren	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 Erschlu�sstrom	366
10.5	Hochspannungs- und Hochleistungskabel	369
11	Schalter und Schaltanlagen	377
11.1	Leistungsschalter	377
11.1.1	Anforderungen an Leistungsschalter	377
11.1.2	�lschalter, �larme Schalter	380
11.1.3	Vakuumschalter	380
11.1.4	Druckluftschalter	382
11.1.5	Generatorschalter	385
11.1.6	SF ₆ -Schalter	385
11.2	Schaltanlagen	387
11.2.1	Allgemeines	387
11.2.2	Schaltungen in Schaltanlagen	388
11.2.3	Innenraum- und Freiluftschaltanlagen	391
11.2.4	Vollgekapselte, SF ₆ -isolierte Schaltanlagen	394
12	Drehstromnetze	399
12.1	Netzaufbau, Verbundnetz	399
12.2	H�chstspannungs�bertragung	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 Stromoverschwingungen	437
12.7	Netzschutz	443
12.7.1	Überblick	443
12.7.2	Leitungsschutz	445
12.7.3	Transformatorschutz	447
13	Mathematische Beschreibung des Drehstromnetzes	451
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
14	Leistungsfluss im Drehstromnetz	499
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 Abnahmeleistungen 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
15	Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchungen	529
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 Stützpunkt- beanspruchung	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	Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen	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 Sternpunkterdung	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	Überspannungen und Isolationskoordination	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 Blitzeinschlag	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	Stabilität der Drehstromübertragung	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
19	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	883
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
20	Berechnung transienter Vorgänge in Drehstromnetzen	903
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
Anhang	929
Formelzeichen und Nebenzeichen	1003
Literatur	1009
Sachverzeichnis	1049