

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines zur elektrischen Energieversorgung	1
1.1	Einführung, Primärenergie und elektrische Energie	1
1.2	Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie	6
2	Grundlagen zur Berechnung in Drehstromnetzen	13
2.1	Überblick	13
2.2	Komplexe Größen	13
2.2.1	Die Transformation zeitlich sinusförmig verlaufender Größen in die komplexe Ebene	13
2.2.2	Die komplexe Leistung im Wechsel- und Drehstromnetz	15
2.3	Zählpeile und Zählpeilsysteme	18
2.4	Symmetrische Komponenten	26
2.4.1	Allgemeines	26
2.4.2	Symmetrierung und Entsymmetrierung	26
2.4.3	Impedanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem	31
2.4.4	Drehstromleistung und Komponentenleistungen	34
2.5	Modale Komponenten	35
2.5.1	Allgemeiner Ansatz	36
2.5.2	Bestimmung der Transformationsmatrix	38
2.5.3	Transformation von Zeigergrößen	39
2.5.4	Leistung in modalen Komponenten	40
2.5.5	Gebräuchliche Komponentensysteme	41
3	Thermische Kraftwerke	47
3.1	Allgemeines	47
3.2	Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastanlagen	51
3.3	Thermische Prozesse, Wirkungsgrad	55
3.4	Kraft-Wärme-Kopplung	74
3.5	Dampfturbine	78
3.6	Allgemeine Anordnung in Dampfkraftwerken	81
3.7	Nukleare Dampferzeugung – Kernkraftwerke	86
4	Wasserkraftwerke und Windenergieanlagen	93
4.1	Bedeutung	93
4.2	Wasserkraftgeneratoren	94

4.3	Wasserturbinen	96
4.4	Laufwasser- und Speicherkraftwerke	102
4.5	Windenergieanlagen	111
5	Drehstromgeneratoren	119
5.1	Allgemeines	119
5.2	Gleichungssystem der Synchronmaschine	126
5.3	Stationärer Betrieb	130
5.4	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie	140
5.5	Nichtstationärer Betrieb	142
5.5.1	Operatorenleichungen	143
5.5.2	Zeitlicher Stromverlauf bei dreipoligem Klemmenkurzschluss	147
5.5.3	Kurzschlussdrehmomente und Fundamentbeanspruchung	152
5.5.4	Ersatzschaltungen für den subtransienten und den transienten Zustand	161
6	Generator- und Turbinenregelung	167
6.1	Erregungseinrichtungen	167
6.2	Spannungsregelung	171
6.2.1	Statik der Spannungsregelung	171
6.2.2	Spannungsregelung eines Turbogenerators	171
6.3	Turbinenregelung	180
6.3.1	Bilanzmodell des Netzes	180
6.3.2	Primärregelung	183
6.3.3	Sekundärregelung	186
7	Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken	191
7.1	Aufgabe des Eigenbedarfs	191
7.2	Aufbau von Eigenbedarfsnetzen, Prinzipschaltung	192
7.2.1	Auswahl der Eigenbedarfstransformatoren	194
7.2.2	Niederspannungsversorgung	195
7.3	Sicherstellung des Eigenbedarfs in thermischen Kraftwerken	197
7.3.1	Grundüberlegungen	197
7.3.2	Reserveversorgung des Eigenbedarfs	197
7.3.3	Notstillsetzen des Blockes, Notstromversorgung	201
7.4	Spannungshaltung und Schnellumschaltung	202
7.4.1	Spannungseinbruch beim Einschalten von Motoren	202
7.4.2	Umschaltung des Eigenbedarfs	205
7.5	Schutz von Kraftwerksblöcken	211
7.5.1	Allgemeines	212
7.5.2	Schutzmaßnahmen für Kraftwerksblöcke	213
8	Transformatoren	217
8.1	Einsatz der Transformatoren	217
8.2	Schaltgruppen und Schaltungen	219

8.3	Zwei- und Dreiwicklungstransformatoren	223
8.3.1	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm	223
8.3.2	Leistungsaufnahme und Spannungsänderung bei Belastung	227
8.3.3	Dreiwicklungstransformatoren	229
8.3.4	Nullsystem und Sternpunktbelastbarkeit	233
8.3.5	Rushströme beim Einschalten	236
8.4	Wicklungen und Stufenschalter	239
8.5	Spartransformatoren	243
8.6	Ersatzschaltungen in symmetrischen Komponenten	246
8.6.1	Impedanzersatzschaltungen	246
8.6.2	Admittanzersatzschaltungen	253
8.6.3	Ersatzschaltungen ohne Übertrager	255
9	Freileitungen	257
9.1	Mastformen, Kosten	257
9.2	Aufbau der Freileitungen	260
9.3	Mittlere geometrische Abstände	265
9.4	Impedanzen	270
9.4.1	Allgemeines	270
9.4.2	Selbst- und Gegenimpedanzen von Leiterschleifen	271
9.4.3	Impedanzen in symmetrischen Komponenten	280
9.4.4	Induktive Beeinflussung	291
9.5	Kapazitäten	292
9.5.1	Allgemeines	292
9.5.2	Selbst- und Gegenpotenzialkoeffizienten von Leiterschleifen	294
9.5.3	Admittanzen in symmetrischen Komponenten	298
9.5.4	Oberflächenrandfeldstärke	303
9.6	Die Leitung im stationären Betrieb	306
9.6.1	Leitungsgleichungen	306
9.6.2	Ersatzschaltungen für die kurze Leistung	307
9.6.3	Wellenwiderstand und natürliche Leistung	308
9.6.4	Verluste, wirtschaftliche Stromdichte	310
9.7	Wirkung der Freileitungen auf den Menschen	314
9.7.1	Elektrische und magnetische Feldstärke am Erdboden	314
9.7.2	HF-Störfeldstärke und Geräuschpegel	321
10	Kabel	323
10.1	Allgemeines	323
10.2	Aufbau der Kabel	323
10.3	Kabelauslegung und Belastbarkeit	329
10.3.1	Allgemeine Überlegungen	329
10.3.2	Strombelastbarkeit	330
10.3.3	Verlustberechnung	332
10.3.4	Wärmewiderstände	337
10.3.5	Normalbedingungen für Kabelbelastung und Häufung	339

10.3.6	Kabelbelastung bei Bodenaustrocknung und wechselnder Last	342
10.4	Impedanzen und Kapazitäten	346
10.4.1	Impedanzen im Mit- und Nullsystem	346
10.4.2	Kapazitäten, Ladeleistungen und kapazitiver Erdschlussstrom	354
10.5	Hochspannungs- und Hochleistungskabel	358
11	Schalter und Schaltanlagen	365
11.1	Leistungsschalter	365
11.1.1	Anforderungen an Leistungsschalter	365
11.1.2	Ölschalter, ölarme Schalter	368
11.1.3	Vakuumschalter	368
11.1.4	Druckluftschalter	370
11.1.5	Generatorschalter	373
11.1.6	SF ₆ -Schalter	373
11.2	Schaltanlagen	375
11.2.1	Allgemeines	375
11.2.2	Schaltungen in Schaltanlagen	376
11.2.3	Innenraum- und Freiluftschaltanlagen	379
11.2.4	Vollgekapselte, SF ₆ -isolierte Schaltanlagen	382
12	Drehstromnetze	387
12.1	Netzaufbau, Verbundnetz	387
12.2	Höchstspannungsübertragung	390
12.3	Versorgung großer Städte oder Ballungsräume	397
12.4	Verteilungsnetze	403
12.5	Industrielle Stromversorgung	410
12.6	Blindleistungsbedarf und Kompensation	412
12.6.1	Blindleistungsbedarf der Verbraucher	412
12.6.2	Blindleistungsbedarf des Netzes	417
12.6.3	Blindleistungskompensation	419
12.6.4	Parallelresonanz und Absaugung von Stromüberschwingungen	425
12.7	Netzschutz	431
12.7.1	Überblick	431
12.7.2	Leitungsschutz	433
12.7.3	Transformatorschutz	435
13	Mathematische Beschreibung des Drehstromnetzes	439
13.1	Netzumformungen	439
13.2	Gleichungssysteme mit Admittanz-, Impedanz- und Hybridmatrix	439
13.2.1	Knotenpunktverfahren, Admittanzmatrix	441
13.2.2	Impedanzmatrix	445
13.2.3	Hybridmatrix	449
13.3	Quer- und Längsunsymmetrien	455
13.4	Einfachquerfehler	461

13.4.1	Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle	462
13.4.2	Einpoliger Erdkurzschluss	466
13.5	Einfachlängsfehler	468
13.5.1	Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle	468
13.5.2	Einpoliger Längsfehler	469
13.5.3	Zweipoliger Längsfehler	471
13.6	Doppelerdkurzschluss und andere Doppelfehler	472
13.7	Fehlermatrizenverfahren	478
13.7.1	Fehlerbedingungen	480
13.7.2	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Admittanzmatrix . . .	481
13.7.3	Nachbildung von Unterbrechungen an der Admittanzmatrix . .	483
13.7.4	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Impedanzmatrix	486
13.7.5	Nachbildung von Kurzschlüssen und Unterbrechungen in modalen Komponenten	486
14	Leistungsfluss im Drehstromnetz	487
14.1	Aufgabe	487
14.2	Leistungsfluss auf Leitungen	487
14.2.1	Vorgabe der Belastung als konstante Impedanz	489
14.2.2	Vorgabe der Belastung durch konstanten Strom	490
14.2.3	Vorgabe der Belastung durch konstante Leistung	493
14.2.4	Vorgabe der Abnahmeleistungen als Funktion der Spannung . .	494
14.2.5	Leistungsfluss auf Leitungen bei mehreren Abnahmen	495
14.2.6	Leistungsfluss in Ringnetzen	498
14.3	Leistungsfluss in vermaschten Netzen	499
14.3.1	Methoden der Leistungsflussberechnung – Einführung	499
14.3.2	Knotenpunktverfahren	503
14.3.3	Newton-Verfahren	510
14.3.4	Entkoppelte Leistungsflussberechnung	512
14.3.5	Gleichstromleistungsflussberechnung	514
15	Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchungen	517
15.1	Einführung	517
15.2	Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstromes	521
15.3	Methoden zur Berechnung der Kurzschlussströme	527
15.3.1	Allgemeines	527
15.3.2	Überlagerungsverfahren	527
15.3.3	Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle	534
15.4	Nachbildung der Betriebsmittel beim Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle	539
15.4.1	Allgemeines	539
15.4.2	Netzeinspeisungen	540
15.4.3	Leitungen (Freileitungen und Kabel)	542
15.4.4	Transformatoren	543

15.4.5	Generatoren	549
15.4.6	Kraftwerksblöcke mit Stufenschalter	553
15.4.7	Kraftwerksblöcke ohne Stufenschalter	560
15.4.8	Korrekturfaktoren bei Kurzschluss zwischen Generator und Blocktransformator	563
15.4.9	Motoren	570
15.5	Kurzschlussströme und ihre Berechnung	573
15.5.1	Allgemeines	573
15.5.2	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	580
15.5.3	Stosskurzschlussstrom	597
15.5.4	Ausschaltstrom	605
15.5.5	Dauerkurzschlussstrom	612
15.5.6	Beitrag von Asynchronmotoren zum Kurzschlussstrom	616
15.5.7	Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom und Joule-Integral	628
15.6	Berechnung der Kurzschlussströme im per-unit- oder im %/MVA-System	640
15.6.1	Physikalische, relative und semirelative Größen	640
15.6.2	Definition der Größen des p. u.-Systems und des %/MVA-Systems	642
15.6.3	Kurzschlussstromberechnung im %/MVA-System	643
15.7	Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit	649
15.7.1	Grundüberlegungen zu Kurzschlusskräften	649
15.7.2	Beanspruchung biegesteifer Leiter und Stützpunkt- beanspruchung	656
15.7.3	Beanspruchung in Hochspannungsanlagen mit Seilen	671
15.7.4	Thermische Kurzschlussfestigkeit	677
15.8	Begrenzung der Kurzschlussströme	682
16	Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen	687
16.1	Überblick	687
16.2	Sternpunktbehandlung	690
16.2.1	Einführung	690
16.2.2	Netze mit isoliertem Sternpunkt	690
16.2.3	Netze mit Erdschlusskompensation	692
16.2.4	Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung	696
16.3	Sternpunktbehandlung auf der OS- und US-Seite eines Yy0 d5-Transformators	698
16.4	Erdung in Hochspannungsnetzen	702
16.4.1	Über Erde fließende Teilkurzschlussströme	702
16.4.2	Schleifenimpedanzen, Erdseilreduktionsfaktoren und Kettenleiterimpedanzen	706
16.4.3	Erdkurzschluss in der Nähe einer Anlage	712
16.4.4	Ausbreitungswiderstände von Erdern und Erdungsanlagen	718
16.4.5	Bau von Erdungsanlagen und Erdungsmessungen	722
16.5	Beeinflussung	728

17	Überspannungen und Isolationskoordination	735
17.1	Übersicht	735
17.2	Spannungserhöhungen	736
17.2.1	Zeitweilige Spannungserhöhung bei Erdschluss	736
17.2.2	Zeitweilige Spannungserhöhung bei Lastabwurf, Ferranti-Effekt	736
17.2.3	Spannungserhöhung durch kapazitive Unsymmetrie	742
17.2.4	Resonanzüberspannungen	743
17.3	Innere Überspannungen	744
17.3.1	Transiente Erdschlussüberspannungen	744
17.3.2	Überspannungen beim Schalten kleiner induktiver Ströme	747
17.3.3	Überspannungen beim Schalten von Kondensatoren und Leitungen	754
17.3.4	Überspannungen beim Ausschalten von Kurzschlussströmen	759
17.4	Äußere Überspannungen	767
17.4.1	Überblick	767
17.4.2	Atmosphärische Entladung und Blitzeinschlag	768
17.4.3	Wanderwellen auf Leitungen	770
17.5	Isolationsminderung	779
17.6	Isolationskoordination	784
17.7	Auswahl und Einsatz von Überspannungsableitern	788
17.7.1	Funkenstreckenableiter	788
17.7.2	Metalloxidableiter	791
17.7.3	Ableiterabsatz	792
18	Stabilität der Drehstromübertragung	801
18.1	Einführung, Begriff der Stabilität, Modellbildung	801
18.2	Statische Stabilität	806
18.2.1	Statische Stabilität ohne Regelung	806
18.2.2	Statische Stabilität mit Regelung	810
18.2.3	Selbsterregung	814
18.3	Transiente Stabilität	817
18.3.1	Einflussgrößen und Untersuchungsmethode	817
18.3.2	Transiente Stabilität abhängig von Kurzschlussart, -dauer und Netzaufbau	821
18.3.3	Stabilitätsverlust und Resynchronisierung	826
18.3.4	Einfluss von Generatorauslegung und Erregersystem auf die transiente Stabilität	831
19	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	835
19.1	Wirkungsweise	835
19.2	Technische Besonderheiten der HGÜ gegenüber der DHÜ	837
19.3	Entwicklung der HGÜ	837
19.4	Betriebsmittel der HGÜ	841
19.4.1	Gesamtanordnung	841
19.4.2	HGÜ-Stationen	845

19.4.3	HGÜ-Freileitungen und -Kabel	847
19.5	Kostenvergleich HGÜ mit DHÜ	850
Anhang		853
Formelzeichen und Nebenzeichen		919
Literatur		925
Sachverzeichnis		963