

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

XVIII

1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung	1
2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung	6
2.1 Stromerzeugung mit fossil befeuerten Kraftwerken	6
2.1.1 Kohlebefeuerte Blockkraftwerke	7
2.1.1.1 Dampfkraftwerksprozess in kohlebefeuerten Blockkraftwerken	7
2.1.1.2 Aufbau kohlebefeueter Blockkraftwerke	10
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskennlinie von Kondensationskraftwerken	18
2.1.2 Erdgasbefeuerte Kraftwerke	19
2.1.2.1 Gasturbinen-Kraftwerke	19
2.1.2.2 Gas-und-Dampf-Kraftwerke	20
2.1.2.3 Blockheizkraftwerke	21
2.1.2.4 Brennstoffzellen	22
2.1.3 Erdgas-/kohlebefeuerte Anlagen	24
2.2 Stromerzeugung mit Wasserkraftwerken	24
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	25
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	26
2.3 Stromerzeugung mit Kernkraftwerken	27
2.4 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen	29
2.4.1 Windenergieanlagen	30
2.4.1.1 Grundlagen der Windkraftausnutzung	30
2.4.1.2 Konstruktive Ausführung und Größenentwicklung	32
2.4.1.3 Charakteristik der Energielieferung	35
2.4.1.4 Drehzahlregelung und Leistungsbegrenzung	36
2.4.1.5 Leistungskurven von WEA	40
2.4.1.6 Offshore-Windenergieanlagen	40
2.4.2 Solarthermische Kraftwerke	43
2.4.2.1 Parabolrinnenkraftwerk	43
2.4.2.2 Turmkraftwerk	44
2.4.2.3 Dish-Stirling-System	45
2.4.2.4 Aufwindkraftwerk	45
2.4.3 Biomassekraftwerke	46
2.4.4 Geothermische Kraftwerke	47
2.4.5 Gezeitenkraftwerke	48
2.4.6 Wellenkraftwerke	49
2.4.7 Strömungskraftwerke	50
2.4.8 Photovoltaische Anlagen	51
2.4.8.1 Aufbau und Betriebsverhalten	51
2.4.8.2 Wechselrichterkonzepte	54
2.4.8.3 Anlagenkonzepte	55

2.4.9	Speichertechnologien in der Energieversorgung	56
2.4.9.1	Pumpspeicherwerke	56
2.4.9.2	Druckluftspeicher	57
2.4.9.3	Schwungmassenspeicher (Schwungrad)	57
2.4.9.4	Wärmespeicher	58
2.4.9.5	Batteriespeicher	58
2.4.9.6	Wasserstoffspeicher	59
2.4.9.7	Kondensatorspeicher	60
2.4.9.8	Supraleitende Magnetspeicher	60
2.4.10	Schlussfolgerungen	60
2.5	Kraftwerksregelung	62
2.5.1	Regelung von Wärmekraftwerken	62
2.5.1.1	Regelung eines Kraftwerks im Inselbetrieb	62
2.5.1.2	Regelung im Insel- und Verbundnetz	67
2.5.2	Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken	71
2.6	Kraftwerkseinsatz	72
2.6.1	Verlauf der Netzlast	72
2.6.2	Deckung der Netzlast	73
2.7	Aufgaben	74
3	Aufbau von Energieversorgungsnetzen	76
3.1	Übertragungssysteme	77
3.1.1	Einphasige Systeme	77
3.1.2	Dreiphasige Systeme	77
3.1.3	HGÜ-Anlagen	80
3.2	Wichtige Strukturen von Drehstromnetzen	81
3.2.1	Niederspannungsnetze	82
3.2.2	Mittelspannungsnetze	84
3.2.3	Hoch- und Höchstspannungsnetze	86
3.3	Netzstrukturen von Windparks	89
3.4	Aufbau und Funktion von Bordnetzen	90
3.4.1	Bordnetz von Kraftfahrzeugen	90
3.4.1.1	Bauweise und Funktion von Klauenpolgeneratoren	91
3.4.1.2	Spannungsregelung und Gleichrichtung des erzeugten Drehstroms	92
3.4.1.3	Netzgestaltung bei Kraftfahrzeugen	94
3.4.2	Bordnetz von Flugzeugen	95
3.4.2.1	Stromerzeugung bei Flugzeugen	95
3.4.2.2	Netzgestaltung bei Flugzeugen	96
3.4.3	Bordnetz von Schiffen	98
3.4.3.1	Stromerzeugung bei Schiffen	99
3.4.3.2	Netzgestaltung bei Schiffen	101
3.4.4	Weitere Bordnetze	103
3.5	Aufgaben	105

4 Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente	106
4.1 Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen	106
4.1.1 Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen	106
4.1.2 Stationäre Beschreibung von Netzen mit induktiven Kopplungen	110
4.1.2.1 Veranschaulichung der manuellen Berechnungsmethode an einem Beispiel	111
4.1.2.2 Admittanzform von mehrtorigen Netzen	112
4.1.2.3 Impedanzform von mehrtorigen Netzen	114
4.1.3 Ausgleichsvorgänge in Netzen	116
4.1.3.1 Anwendung der Laplace-Transformation	116
4.1.3.2 Erläuterungen zu Eigenfrequenzspektren	118
4.1.4 Nichtlineare Induktivitäten	120
4.2 Leistungstransformatoren	123
4.2.1 Einphasige Zweiwicklungstransformatoren	123
4.2.1.1 Aufbau, Eigenfrequenzspektren und transientes Verhalten von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren	124
4.2.1.2 Niederfrequentes Ersatzschaltbild eines einphasigen Zweiwicklungstransformators	133
4.2.1.3 Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband	138
4.2.2 Einphasige Dreiewicklungstransformatoren	140
4.2.3 Dreiphasige Leistungstransformatoren	144
4.2.3.1 Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wicklungen	144
4.2.3.2 Schaltungen	145
4.2.3.3 Übersetzung bei symmetrischem Betrieb	147
4.2.3.4 Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb	150
4.2.3.5 Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstransformatoren im Netzverband	157
4.2.4 Spartransformatoren	159
4.2.4.1 Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren	159
4.2.4.2 Ersatzschaltbild eines Spartransformators	160
4.2.5 Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung	162
4.2.5.1 Erläuterung der direkten Spannungseinstellung	163
4.2.5.2 Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung	165
4.2.5.3 Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen	167
4.3 Messwandler	170
4.3.1 Spannungswandler	171
4.3.1.1 Induktive Spannungswandler	171
4.3.1.2 Kapazitive Spannungswandler	174
4.3.2 Stromwandler	175
4.4 Synchronmaschinen	178
4.4.1 Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen	178
4.4.2 Modellgleichungen einer Synchronmaschine	180
4.4.2.1 Qualitative Feldverhältnisse in einer Vollpolmaschine	181
4.4.2.2 Formulierung der Modellgleichungen	183

4.4.3	Betriebsverhalten von Synchronmaschinen	186
4.4.3.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb	186
4.4.3.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen	190
4.4.3.3	Spannungsregelung von Synchronmaschinen	194
4.4.4	Verhalten von Synchronmaschinen bei einem dreipoligen Kurzschluss	196
4.4.4.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer .	196
4.4.4.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung	199
4.4.4.3	Netzkurzschluss bei einer verlustbehafteten Vollpolmaschine mit Erreger- und Dämpferwicklung	206
4.5	Freileitungen	213
4.5.1	Aufbau von Freileitungen	213
4.5.1.1	Masten	213
4.5.1.2	Leiterseile	215
4.5.1.3	Erdseile	217
4.5.1.4	Isolatoren	218
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb	219
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileitersystemen	220
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen	226
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen	233
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen	233
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb	235
4.5.3.1	Natürlicher Betrieb	235
4.5.3.2	Übernatürlicher Betrieb	237
4.5.3.3	Unternatürlicher Betrieb	237
4.5.3.4	Betriebsverhalten verlustbehafteter Freileitungen	238
4.5.4	Transientes Verhalten von Freileitungen im symmetrischen Betrieb	240
4.6	Kabel	243
4.6.1	Aufbau von Kabeln	244
4.6.1.1	Kunststoffkabel	244
4.6.1.2	Massekabel	247
4.6.1.3	Ölkabel	248
4.6.1.4	Gaskabel	248
4.6.2	Zulässige Betriebsströme von Kabeln	249
4.6.3	Bezeichnungen von Normkabeln	250
4.6.4	Garnituren von Kabeln	252
4.6.5	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln	254
4.7	Lasten	257
4.7.1	Motorische Lasten	257
4.7.2	Mischlasten	258
4.7.3	Leistungsverhalten von Lasten im Netzbetrieb	259
4.8	Leistungskondensatoren	261
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren	261

4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation	262
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Oberschwingungen	264
4.8.3.1	Modell eines Netzes mit Stromrichteranlagen	265
4.8.3.2	Auswertung des Ersatzschaltbilds	266
4.8.3.3	Netzrückwirkungen	267
4.8.4	Schnelle Blindleistungskompensation	269
4.8.5	Leistungsflusssteuerung mit FACTS	271
4.9	Drosselpulen	274
4.10	Schalter	277
4.10.1	Eigenschaften idealer und realer Schalter	277
4.10.2	Aufbau und Wirkungsweise von Schaltern	278
4.10.2.1	Leistungsschalter	279
4.10.2.2	Trennschalter	282
4.10.2.3	Lastschalter	284
4.11	Schaltanlagen	285
4.11.1	Schaltungen von Schaltanlagen	285
4.11.2	Bauweise von Schaltanlagen	291
4.11.2.1	Konventionelle Freiluftschaltanlagen	291
4.11.2.2	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen	295
4.11.2.3	Konventionelle Zellenbauweise	301
4.11.3	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern	303
4.11.4	Leittechnik in Schaltanlagen	304
4.11.4.1	Aufgaben der Leitebenen	304
4.11.4.2	Kommunikation der Leitebenen	306
4.11.4.3	Kommunikation über Rundsteuerung	307
4.12	Isolationskoordination und Schutz von Betriebsmitteln vor unzulässigen Überspannungen	308
4.12.1	Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch verschiedene Überspannungsarten	308
4.12.1.1	Zeitweilige Überspannungen	308
4.12.1.2	Transiente Überspannungen	309
4.12.2	Festlegung des Isoliervermögens von Betriebsmitteln mithilfe von genormten Bemessungsspannungen	315
4.12.2.1	Durchschlagskennlinien von Spitze-Platte-Anordnungen	315
4.12.2.2	Kennzeichnung der Durchschlagskennlinien durch repräsentative Überspannungen	316
4.12.2.3	Festlegung von Isolationspegeln	318
4.12.2.4	Isoliervermögen weiterer Anordnungen	319
4.12.3	Überspannungsableiter und Blitzschutzeinrichtungen	321
4.12.3.1	Ventilableiter	321
4.12.3.2	Metalloxidableiter	324
4.12.3.3	Blitzschutzeinrichtungen	327
4.13	Schutz der Betriebsmittel vor unzulässigen Strombeanspruchungen	328
4.13.1	Sicherungen und I_s -Begrenzer	328
4.13.1.1	HH-Sicherungen	328
4.13.1.2	NH-Sicherungen	331
4.13.1.3	I_s -Begrenzer	333

4.13.2	Schutzsysteme für Betriebsmittel	334
4.13.2.1	Vergleichsprinzip	334
4.13.2.2	Überstromprinzip	335
4.13.2.3	Distanzprinzip	337
4.13.2.4	Weitere Netzschutz-Prinzipien	339
4.13.2.5	Technische Umsetzung der Schutzprinzipien	339
4.14	Netzanbindung von Windenergieanlagen	340
4.14.1	Stationäres Ersatzschaltbild einer Netzanbindung von Windenergieanlagen	340
4.14.2	Generatoren und leistungselektronische Einrichtungen für die Netzanbindung	342
4.14.2.1	Netzkopplung von Generatoren	342
4.14.2.2	Betriebsverhalten von doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren in Windenergieanlagen	344
4.14.2.3	Leistungselektronische Einrichtungen in Windenergieanlagen	348
4.14.2.4	Funktionsweise selbstgeführter Wechselrichter	351
4.14.2.5	Typische Anwendungen von selbstgeführten Wechselrichtern in Windenergieanlagen	353
4.14.3	Netzanbindung von Windparks	355
4.14.3.1	Spannungsebenen in Windparks	355
4.14.3.2	Technisch optimierte Netzanbindung von Windparks	356
4.14.3.3	Transiente Simulation von Windparks	357
4.15	Ersatzschaltungen von Photovoltaikanlagen	358
4.15.1	Eindiodenmodell	358
4.15.2	Modellbildung für Solarmodule	360
4.16	Aufgaben	361
5	Auslegung von Netzen im Normalbetrieb	370
5.1	Kriterien für zulässige thermische Dauerbelastung und Spannungshaltung	370
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen	371
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen	376
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung	377
5.5	Vermaschtes Netz	381
5.6	Nachbildung von Teilnetzen	382
5.7	Lastflussberechnung in Energieversorgungsnetzen	384
5.7.1	Lastflussberechnung mithilfe der Stromsummen	385
5.7.1.1	Netze mit Stromeinprägungen	385
5.7.1.2	Netze mit einer eingeprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstantem Strom	387
5.7.1.3	Netze mit einer eingeprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstanter Wirk- und Blindleistung	387
5.7.1.4	Netze mit mehreren eingeprägten Spannungsquellen	388
5.7.1.5	Netze mit Kraftwerkseinspeisungen	389
5.7.2	Lastflussberechnung mithilfe der Leistungssummen	389
5.7.3	Lastflussberechnung in Netzen mit mehreren Spannungsebenen	393
5.7.4	Berechnung von Eigenwerten aus der stationären Knotenadmittanzmatrix	394
5.8	Aufgaben	395

6 Dreipoliger Kurzschluss	398
6.1 Generatorferner dreipoliger Kurzschluss	399
6.1.1 Berechnung des Kurzschlussstromverlaufs in unverzweigten Netzen mit einer Netzeinspeisung	399
6.1.1.1 Berechnung des stationären Kurzschlusswechselstroms	399
6.1.1.2 Berechnung des Einschwingvorgangs	401
6.1.2 Berechnung der Kurzschlussströme in verzweigten Netzanlagen mit mehreren Netzeinspeisungen	404
6.1.2.1 Modellierung und Lösungsmethodik von verzweigten Netzanlagen	404
6.1.2.2 Berechnung der stationären Kurzschlussströme mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle	406
6.1.2.3 Berechnung des Einschwingvorgangs bei dem Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle	408
6.1.2.4 Veranschaulichung der Kurzschlussstromberechnung bei verzweigten Netzen an einem Beispiel	413
6.1.2.5 Einfluss der Netzkapazitäten und Mischlasten auf die Kurzschlussströme	417
6.2 Generatornaher dreipoliger Kurzschluss	419
6.2.1 Modell eines verlustlosen, mehrfach gespeisten Netzes mit einem generatornahen Kurzschluss	419
6.2.2 Berechnung des Anfangskurzschlusswechselstroms bei generatornahen Kurzschlüssen	423
6.2.3 Berechnung des Stoßkurzschlussstroms für generatordichte Fehler	425
6.2.4 Berechnung des Kurzschlussausschaltstroms	429
6.2.5 Berücksichtigung von Netzkapazitäten, Mischlasten, motorischen Verbrauchern und Windenergieanlagen bei generatornahen Kurzschlüssen	432
6.3 Kurzschluss in Bordnetzen	433
6.3.1 Kraftfahrzeuge	433
6.3.2 Flugzeuge	434
6.3.3 Schiffe	434
6.4 Aufgaben	437
7 Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern	441
7.1 Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen	441
7.2 Mechanische Kurzschlussfestigkeit	444
7.2.1 Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern	445
7.2.1.1 Berechnung der Stromkräfte	445
7.2.1.2 Dimensionierung der Leiterschienen	447
7.2.1.3 Stromkräfte bei gekrümmten und gekapselten Leiterschienen	449
7.2.2 Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen	450
7.2.3 Auslegung von Stützern	453
7.2.4 Auslegung von Leiterseilen und Kabeln	454

7.3	Thermische Kurzschlussfestigkeit	454
7.3.1	Berechnung der Wärmebeanspruchung	454
7.3.2	Festlegung des zulässigen Kurzzeitstroms	457
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlussleistung	459
7.5	Auswirkungen von Kurzschlägen auf das transiente Generatordrehzahlverhalten	462
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität	463
7.5.1.1	Modellierung einer Generatorennetzanbindung	463
7.5.1.2	Diskussion der Modellgleichung	468
7.5.1.3	Interpretation verschiedener Fehlersituationen mit dem Flächenkriterium	468
7.5.1.4	Fehler in einer unterlagerten Spannungsebene	469
7.5.1.5	Fehler im Höchstspannungsnetz	470
7.5.1.6	Fehler mit Ausschaltung	472
7.5.2	Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlussbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung	472
7.6	Auslegung von Schaltern	475
7.6.1	Einschwingspannungen nach einem Schalter-Klemmenkurzschluss in einphasigen Netzen	477
7.6.2	Bewertung der Einschwingspannungen	481
7.6.3	Abstandskurzschluss in einphasigen Netzen	483
7.6.4	Auslegung von Leistungsschaltern in Drehstromnetzen	486
7.6.5	Schaltvorgänge ohne Kurzschluss	487
7.7	Aufgaben	489
8	Grundzüge der Betriebsführung und Planung von elektrischen Energieanlagen	491
8.1	Betriebsführung von Netzanlagen	491
8.1.1	Organisation des Strommarktes	491
8.1.1.1	Organisation des Strommarktes vor der Deregulierung	491
8.1.1.2	Organisation des Strommarktes nach der Deregulierung	492
8.1.2	Betriebsführung von Übertragungsnetzen	498
8.1.2.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum des Netzrechners	498
8.1.2.2	Offline-Netzführung mit dem Netzrechner	500
8.1.2.3	Online-Netzführungsrechnung	505
8.1.2.4	Fahrplanmanagement	506
8.1.3	Betriebsführung von Verteilungsnetzen	507
8.1.3.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum der Schaltleitung	507
8.1.3.2	Führung von Verteilungsnetzen	508
8.2	Gesichtspunkte zur Planung von Netzen	509
8.2.1	Planung von Niederspannungsnetzen	509
8.2.2	Ausbauplanung von Mittelspannungsnetzen	512
8.2.3	Ausbauplanung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen	513
8.3	Netzintegration und Systemdienstleistungen von Erzeugungsanlagen	515
8.3.1	Wichtige Vorschriften und Richtlinien	516

8.3.2 Anforderungen beim Anschluss an ein Netz	517
8.3.2.1 Wirkleistungsabgabe und Frequenzhaltung	517
8.3.2.2 Blindleistungsbereitstellung und Spannungshaltung	519
8.3.2.3 Verhalten bei Spannungsseinbrüchen	521
8.3.2.4 Besondere Anschlussbedingungen für Erzeugungsanlagen mit regenerativen Energien in Übertragungsnetzen	523
8.3.2.5 Systemdienstleistungen von Windenergieanlagen	525
8.3.2.6 Anforderungen an die Spannungsqualität	529
8.4 Aufgaben	530
9 Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau	534
9.1 Methode der symmetrischen Komponenten	534
9.2 Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze	537
9.3 Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten	542
9.4 Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten	544
9.4.1 Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil	545
9.4.1.1 Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung	546
9.4.1.2 Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung	548
9.4.1.3 Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung	550
9.4.2 Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil	550
9.4.3 Nullimpedanz einer Doppelleitung	552
9.4.4 Nullimpedanz von Kabeln	554
9.4.5 Nullimpedanz von Transformatoren	556
9.4.5.1 Dreischenkeltransformatoren	556
9.4.5.2 Fünfschenkeltransformatoren	563
9.4.6 Nullimpedanz von Synchronmaschinen	564
9.5 Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel	564
9.6 Aufgaben	569
10 Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebsmitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern	570
10.1 Beschreibung häufiger unsymmetrischer Fehler	570
10.2 Erläuterung des Berechnungsverfahrens	571
10.3 Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten	577
10.3.1 Erdschluss mit Übergangswiderstand	577
10.3.2 Zweipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung	578
10.3.2.1 Zweipoliger Kurzschluss ohne Übergangswiderstände	578
10.3.2.2 Zweipoliger Kurzschluss mit Übergangswiderständen	581
10.3.3 Einpolige Leiterunterbrechung	583
10.3.4 Unsymmetrische Mehrfachfehler	586

10.4 Ausgleichsvorgänge bei unsymmetrischen Fehlern	589
10.4.1 Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatorferne Fehler	589
10.4.2 Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatornahe Fehler	593
10.4.3 Numerische Auswertung der transienten Komponentenersatzschaltbilder	594
10.4.4 Näherungsverfahren zur Bestimmung des Stoßkurzschlussstroms bei ein- und zweipoligen Kurzschlüssen	597
10.5 Aufgaben	597
11 Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen	600
11.1 Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das stationäre Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen	600
11.1.1 Netze mit isolierten Sternpunkten	600
11.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation	604
11.1.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung	610
11.1.4 Veranschaulichung der Spannungsverhältnisse durch Zeigerdiagramme	614
11.2 Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das transiente Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen	616
11.2.1 Transiente Überspannungen durch Dauererdschlüsse	616
11.2.2 Erdschlüsse mit selbstständig löscheinendem Lichtbogen	619
11.3 Einfluss der Sternpunktbehandlung auf Ferroresonanzerscheinungen	622
11.3.1 Erläuterung des Ferroresonanzeffekts	622
11.3.2 Ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen	626
11.4 Aufgaben	632
12 Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren	635
12.1 Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen größer als 1 kV	635
12.1.1 Zulässige Körperströme und Berührungsspannungen	635
12.1.2 Direkter und indirekter Berührungsschutz	637
12.2 Berührungsspannungen bei Erdern	639
12.3 Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern	643
12.4 Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen	650
12.4.1 Auslegungskriterien für Netze mit isolierten Sternpunkten oder mit Erdschlusskompensation	650
12.4.2 Auslegungskriterien für Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung	651
12.5 Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen	651
12.6 Aufgaben	656
13 Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für elektrische Anlagen	659
13.1 Struktur der Kosten	659
13.1.1 Kostenarten	659
13.1.1.1 Kapitalkosten	659
13.1.1.2 Betriebskosten	661

13.1.1.3 Sonstige Kosten	663
13.1.1.4 Ausgaben, Einnahmen, operatives Betriebsergebnis	663
13.1.2 Fixe und variable Kosten	663
13.1.3 Einzel- und Gemeinkosten	664
13.2 Gestaltung der Strompreise	666
13.2.1 Grundstruktur der Preise bzw. Entgelte	667
13.2.2 Preisgestaltung der Netzbetreiber	668
13.2.3 Preisgestaltung der Stromhändler	670
13.2.4 Strombezugsverträge mit Niederspannungsnetzkunden	670
13.2.5 Strombezugsverträge mit Mittelspannungsnetzkunden	671
13.2.6 Strombezugsverträge mit Großkunden	672
13.3 Aufbereitung der Lastverläufe	673
13.4 Investitionsrechnung für Netzanlagen	675
13.4.1 Kostenvergleich	675
13.4.1.1 Zulässigkeit eines Kostenvergleichs	675
13.4.1.2 Statischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner	676
13.4.1.3 Dynamischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner	678
13.4.1.4 Kostenvergleich bei einer Rationalisierungsinvestition	680
13.4.2 Methoden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit	680
13.4.2.1 Kapitalwertmethode	681
13.4.2.2 Methode des internen Zinsfußes	682
13.4.2.3 Annuitätenmethode	682
13.4.2.4 Dynamische Amortisationsdauer	683
13.4.3 Investitionsentscheidung	683
13.5 Aufgaben	684
Lösungen	686
Anhang	742
Richtwerte für Freileitungen	742
Richtwerte für Kabel	744
Zulässige Betriebsströme für Stromschienen aus Aluminium	745
Kennlinien für NH-Sicherungen zum Motorschutz	745
Übersichtsschaltpläne realer Energieversorgungsnetze	746
Richtwerte für Kosten	749
Elektrischer Wirkungsgrad wichtiger Kraftwerksarten	750
Struktur eines Sondervertrags mit Mengenzonierung	750
Beispiele für Netzentgelte von Energieversorgungsunternehmen	751
Wichtige Laplace-Transformierte	753
Quellenverzeichnis	754
Verzeichnis wichtiger Normen und Richtlinien	755
Literaturverzeichnis	762
Sachwortverzeichnis	771