

Formelzeichen	XVIII
1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung	1
2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung	5
2.1 Stromerzeugung mit fossil befeuerten Kraftwerken	5
2.1.1 Kohlebefeuerte Blockkraftwerke	5
2.1.1.1 Dampfkraftwerksprozess in kohlebefeuchten Blockkraftwerken	6
2.1.1.2 Aufbau kohlebefeuchter Blockkraftwerke	10
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskenlinie von Kondensationskraftwerken	16
2.1.2 Erdgasbefeuchte Kraftwerke	17
2.1.2.1 Gasturbinen-Kraftwerke	17
2.1.2.2 Gas-und-Dampf-Kraftwerke	18
2.1.2.3 Blockheizkraftwerke	19
2.1.2.4 Brennstoffzellen	20
2.1.3 Erdgas-/kohlebefeuchte Anlagen	21
2.2 Stromerzeugung mit Wasserkraftwerken	22
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	23
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	23
2.3 Stromerzeugung mit Kernkraftwerken	24
2.4 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen	27
2.4.1 Windenergieanlagen	28
2.4.1.1 Grundlagen der Windkraftausnutzung	28
2.4.1.2 Konstruktive Ausführung und Größenentwicklung	29
2.4.1.3 Charakteristik der Energielieferung	32
2.4.1.4 Drehzahlregelung und Leistungsbegrenzung	32
2.4.1.5 Leistungskurven von WEA	37
2.4.1.6 Offshore-Windenergieanlagen	38
2.4.2 Solarthermische Kraftwerke	40
2.4.2.1 Parabolrinnenkraftwerk	40
2.4.2.2 Turmkraftwerk	41
2.4.2.3 Dish-Stirling-System	42
2.4.2.4 Aufwindkraftwerk	42
2.4.3 Biomassekraftwerke	43
2.4.4 Geothermische Kraftwerke	43
2.4.5 Gezeitenkraftwerke	45
2.4.6 Wellenkraftwerke	45
2.4.7 Strömungskraftwerke	46
2.4.8 Photovoltaische Anlagen	47
2.4.8.1 Aufbau und Betriebsverhalten	47
2.4.8.2 Wechselrichterkonzepte	50
2.4.8.3 Anlagenkonzepte	51

2.4.9	Speichertechnologien in der Energieversorgung . . . . .	52
2.4.9.1	Pumpspeicherwerke . . . . .	52
2.4.9.2	Druckluftspeicher . . . . .	53
2.4.9.3	Schwungmassenspeicher (Schwungrad) . . . . .	53
2.4.9.4	Wärmespeicher . . . . .	54
2.4.9.5	Batteriespeicher . . . . .	54
2.4.9.6	Wasserstoffspeicher . . . . .	55
2.4.9.7	Kondensatorspeicher . . . . .	56
2.4.9.8	Supraleitende Magnetspeicher . . . . .	56
2.4.10	Schlussfolgerungen . . . . .	56
2.5	Kraftwerksregelung . . . . .	58
2.5.1	Regelung von Wärmekraftwerken . . . . .	58
2.5.1.1	Regelung eines Kraftwerks im Inselbetrieb . . . . .	58
2.5.1.2	Regelung im Insel- und Verbundnetz . . . . .	63
2.5.2	Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken . . . . .	67
2.6	Kraftwerkseinsatz . . . . .	67
2.6.1	Verlauf der Netzlast . . . . .	68
2.6.2	Deckung der Netzlast . . . . .	68
2.7	Aufgaben . . . . .	69
<b>3</b>	<b>Aufbau von Energieversorgungsnetzen</b>	<b>72</b>
3.1	Übertragungssysteme . . . . .	73
3.1.1	Einphasige Systeme . . . . .	73
3.1.2	Dreiphasige Systeme . . . . .	73
3.1.3	HGÜ-Anlagen . . . . .	76
3.2	Wichtige Strukturen von Drehstromnetzen . . . . .	77
3.2.1	Niederspannungsnetze . . . . .	78
3.2.2	Mittelspannungsnetze . . . . .	80
3.2.3	Hoch- und Höchstspannungsnetze . . . . .	82
3.3	Netzstrukturen von Windparks . . . . .	85
3.4	Aufbau und Funktion von Bordnetzen . . . . .	86
3.4.1	Bordnetz von Kraftfahrzeugen . . . . .	86
3.4.1.1	Bauweise und Funktion von Klauenpolgeneratoren . . . . .	87
3.4.1.2	Spannungsregelung und Gleichrichtung des erzeugten Drehstroms . . . . .	89
3.4.1.3	Netzgestaltung bei Kraftfahrzeugen . . . . .	90
3.4.2	Bordnetz von Flugzeugen . . . . .	91
3.4.2.1	Stromerzeugung bei Flugzeugen . . . . .	91
3.4.2.2	Netzgestaltung bei Flugzeugen . . . . .	92
3.4.3	Bordnetz von Schiffen . . . . .	94
3.4.3.1	Stromerzeugung bei Schiffen . . . . .	94
3.4.3.2	Netzgestaltung bei Schiffen . . . . .	97
3.4.4	Weitere Bordnetze . . . . .	99
3.5	Aufgaben . . . . .	100

<b>4</b>	<b>Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente</b>	<b>102</b>
4.1	Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen . . . . .	102
4.1.1	Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen . . . . .	102
4.1.2	Stationäre Beschreibung von Netzen mit induktiven Kopplungen .	106
4.1.2.1	Veranschaulichung der manuellen Berechnungsmethode an einem Beispiel . . . . .	107
4.1.2.2	Admittanzform von mehrtorigen Netzen . . . . .	108
4.1.2.3	Impedanzform von mehrtorigen Netzen . . . . .	110
4.1.3	Ausgleichsvorgänge in Netzen . . . . .	112
4.1.3.1	Anwendung der Laplace-Transformation . . . . .	112
4.1.3.2	Erläuterungen zu Eigenfrequenzspektren . . . . .	114
4.1.4	Nichtlineare Induktivitäten . . . . .	116
4.2	Leistungstransformatoren . . . . .	119
4.2.1	Einphasige Zweiwicklungstransformatoren . . . . .	119
4.2.1.1	Aufbau, Eigenfrequenzspektren und transientes Verhalten von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren . . . .	120
4.2.1.2	Niederfrequentes Ersatzschaltbild eines einphasigen Zweiwicklungstransformators . . . . .	129
4.2.1.3	Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband . . . . .	134
4.2.2	Einphasige Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	136
4.2.3	Dreiphasige Leistungstransformatoren . . . . .	140
4.2.3.1	Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wicklungen . . . . .	140
4.2.3.2	Schaltungen . . . . .	141
4.2.3.3	Übersetzung bei symmetrischem Betrieb . . . . .	143
4.2.3.4	Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb . . . . .	146
4.2.3.5	Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstransformatoren im Netzverband . . . . .	153
4.2.4	Spartransformatoren . . . . .	155
4.2.4.1	Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren . . . . .	155
4.2.4.2	Ersatzschaltbild eines Spartransformators . . . . .	156
4.2.5	Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung . . . . .	158
4.2.5.1	Erläuterung der direkten Spannungseinstellung . . . . .	159
4.2.5.2	Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung . . . . .	161
4.2.5.3	Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen . . . . .	163
4.3	Messwandler . . . . .	166
4.3.1	Spannungswandler . . . . .	167
4.3.1.1	Induktive Spannungswandler . . . . .	167
4.3.1.2	Kapazitive Spannungswandler . . . . .	170
4.3.2	Stromwandler . . . . .	171
4.4	Synchronmaschinen . . . . .	174
4.4.1	Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen . . . . .	174
4.4.2	Modellgleichungen einer Synchronmaschine . . . . .	176
4.4.2.1	Qualitative Feldverhältnisse in einer Vollpolmaschine . .	177
4.4.2.2	Formulierung der Modellgleichungen . . . . .	179

4.4.3	Betriebsverhalten von Synchronmaschinen . . . . .	182
4.4.3.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb . . . . .	182
4.4.3.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen . . . . .	186
4.4.3.3	Spannungsregelung von Synchronmaschinen . . . . .	190
4.4.4	Verhalten von Synchronmaschinen bei einem dreipoligen Kurzschluss . . . . .	192
4.4.4.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer .	192
4.4.4.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung . . . . .	195
4.4.4.3	Netzkurzschluss bei einer verlustbehafteten Vollpolmaschine mit Erreger- und Dämpferwicklung . . . . .	202
4.5	Freileitungen . . . . .	209
4.5.1	Aufbau von Freileitungen . . . . .	209
4.5.1.1	Masten . . . . .	209
4.5.1.2	Leitenseile . . . . .	211
4.5.1.3	Erdseile . . . . .	213
4.5.1.4	Isolatoren . . . . .	214
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb . . . . .	215
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileitersystemen . . . . .	216
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen . . . . .	222
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen . . . . .	229
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen . . . . .	229
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb . . . . .	231
4.5.3.1	Natürlicher Betrieb . . . . .	231
4.5.3.2	Übernatürlicher Betrieb . . . . .	233
4.5.3.3	Unternatürlicher Betrieb . . . . .	233
4.5.3.4	Betriebsverhalten verlustbehafteter Freileitungen . . . . .	234
4.5.4	Transientes Verhalten von Freileitungen im symmetrischen Betrieb	236
4.6	Kabel . . . . .	239
4.6.1	Aufbau von Kabeln . . . . .	240
4.6.1.1	Kunststoffkabel . . . . .	240
4.6.1.2	Massekabel . . . . .	243
4.6.1.3	Ölkabel . . . . .	244
4.6.1.4	Gaskabel . . . . .	244
4.6.2	Zulässige Betriebsströme von Kabeln . . . . .	245
4.6.3	Bezeichnungen von Normkabeln . . . . .	246
4.6.4	Garnituren von Kabeln . . . . .	248
4.6.5	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln . . .	250
4.7	Lasten . . . . .	253
4.7.1	Motorische Lasten . . . . .	253
4.7.2	Mischlasten . . . . .	254
4.7.3	Leistungsverhalten von Lasten im Netzbetrieb . . . . .	255
4.8	Leistungskondensatoren . . . . .	257
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren . . . . .	257

4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation . . .	258
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Ober- schwingungen . . . . .	260
4.8.3.1	Modell eines Netzes mit Stromrichteranlagen . . . . .	261
4.8.3.2	Auswertung des Ersatzschaltbilds . . . . .	262
4.8.3.3	Netzurückwirkungen . . . . .	263
4.8.4	Schnelle Blindleistungskompensation . . . . .	265
4.8.5	Leistungsflusssteuerung mit FACTS . . . . .	267
4.9	Drosselspulen . . . . .	270
4.10	Schalter . . . . .	273
4.10.1	Eigenschaften idealer und realer Schalter . . . . .	273
4.10.2	Aufbau und Wirkungsweise von Schaltern . . . . .	274
4.10.2.1	Leistungsschalter . . . . .	275
4.10.2.2	Trennschalter . . . . .	278
4.10.2.3	Lastschalter . . . . .	280
4.11	Schaltanlagen . . . . .	281
4.11.1	Schaltungen von Schaltanlagen . . . . .	281
4.11.2	Bauweise von Schaltanlagen . . . . .	287
4.11.2.1	Konventionelle Freiluftschaltanlagen . . . . .	287
4.11.2.2	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen . . . . .	291
4.11.2.3	Konventionelle Zellenbauweise . . . . .	297
4.11.3	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern . . . . .	299
4.11.4	Leittechnik in Schaltanlagen . . . . .	300
4.11.4.1	Aufgaben der Leitebenen . . . . .	300
4.11.4.2	Kommunikation der Leitebenen . . . . .	302
4.11.4.3	Kommunikation über Rundsteuerung . . . . .	303
4.12	Isolationskoordination und Schutz von Betriebsmitteln vor unzulässigen Überspannungen . . . . .	304
4.12.1	Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch verschiedene Über- spannungsarten . . . . .	304
4.12.1.1	Zeitweilige Überspannungen . . . . .	304
4.12.1.2	Transiente Überspannungen . . . . .	305
4.12.2	Festlegung des Isoliervermögens von Betriebsmitteln mithilfe von genormten Bemessungsspannungen . . . . .	311
4.12.2.1	Durchschlagskennlinien von Spitze-Platte-Anordnungen . . . . .	311
4.12.2.2	Kennzeichnung der Durchschlagskennlinien durch reprä- sentative Überspannungen . . . . .	312
4.12.2.3	Festlegung von Isolationspegeln . . . . .	314
4.12.2.4	Isoliervermögen weiterer Anordnungen . . . . .	315
4.12.3	Überspannungsableiter und Blitzschutzeinrichtungen . . . . .	317
4.12.3.1	Ventilableiter . . . . .	317
4.12.3.2	Metalloxidableiter . . . . .	320
4.12.3.3	Blitzschutzeinrichtungen . . . . .	323
4.13	Schutz der Betriebsmittel vor unzulässigen Strombeanspruchungen . . . . .	324
4.13.1	Sicherungen und $I_s$ -Begrenzer . . . . .	324
4.13.1.1	HH-Sicherungen . . . . .	324
4.13.1.2	NH-Sicherungen . . . . .	327
4.13.1.3	$I_s$ -Begrenzer . . . . .	329

4.13.2	Schutzsysteme für Betriebsmittel . . . . .	330
4.13.2.1	Vergleichsprinzip . . . . .	330
4.13.2.2	Überstromprinzip . . . . .	331
4.13.2.3	Distanzprinzip . . . . .	333
4.13.2.4	Weitere Netzschutz-Prinzipien . . . . .	335
4.13.2.5	Technische Umsetzung der Schutzprinzipien . . . . .	335
4.14	Netzanbindung von Windenergieanlagen . . . . .	336
4.14.1	Stationäres Ersatzschaltbild einer Netzanbindung von Windenergieanlagen . . . . .	336
4.14.2	Generatoren und leistungselektronische Einrichtungen für die Netzanbindung . . . . .	338
4.14.2.1	Netzkopplung von Generatoren . . . . .	338
4.14.2.2	Betriebsverhalten von doppelt gespeisten Asynchronengeneratoren in WEA . . . . .	340
4.14.2.3	Leistungselektronische Einrichtungen in WEA . . . . .	344
4.14.2.4	Funktionsweise selbstgeführter Wechselrichter . . . . .	347
4.14.2.5	Typische Anwendungen von selbstgeführten Wechselrichtern in WEA . . . . .	349
4.14.3	Netzanbindung von Windparks . . . . .	351
4.14.3.1	Spannungsebenen in Windparks . . . . .	351
4.14.3.2	Transiente Simulation von Windparks . . . . .	352
4.15	Ersatzschaltungen von Photovoltaikanlagen . . . . .	353
4.15.1	Eindiodenmodell . . . . .	353
4.15.2	Modellbildung für Solarmodule . . . . .	355
4.16	Aufgaben . . . . .	356
<b>5</b>	<b>Auslegung von Netzen im Normalbetrieb</b>	<b>365</b>
5.1	Kriterien für zulässige thermische Dauerbelastung und Spannungshaltung	365
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen . . . . .	366
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen . . . . .	371
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung . . . . .	372
5.5	Vermaschtes Netz . . . . .	376
5.6	Nachbildung von Teilnetzen . . . . .	377
5.7	Lastflussberechnung in Energieversorgungsnetzen . . . . .	379
5.7.1	Lastflussberechnung mithilfe der Stromsummen . . . . .	380
5.7.1.1	Netze mit Stromeinprägungen . . . . .	380
5.7.1.2	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstantem Strom . . . . .	382
5.7.1.3	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstanter Wirk- und Blindleistung . . . . .	382
5.7.1.4	Netze mit mehreren eingepprägten Spannungsquellen . . . . .	383
5.7.1.5	Netze mit Kraftwerkseinspeisungen . . . . .	384
5.7.2	Lastflussberechnung mithilfe der Leistungssummen . . . . .	384
5.7.3	Lastflussberechnung in Netzen mit mehreren Spannungsebenen . . . . .	388
5.7.4	Berechnung von Eigenwerten aus der stationären Knotenadmittanzmatrix . . . . .	389
5.8	Aufgaben . . . . .	390

<b>6 Dreipoliger Kurzschluss</b>	<b>393</b>
6.1 Generatorferner dreipoliger Kurzschluss . . . . .	394
6.1.1 Berechnung des Kurzschlussstromverlaufs in unverzweigten Netzen mit einer Netzeinspeisung . . . . .	394
6.1.1.1 Berechnung des stationären Kurzschlusswechselstroms . .	394
6.1.1.2 Berechnung des Einschwingvorgangs . . . . .	396
6.1.2 Berechnung der Kurzschlussströme in verzweigten Netzanlagen mit mehreren Netzeinspeisungen . . . . .	399
6.1.2.1 Modellierung und Lösungsmethodik von verzweigten Netz- anlagen . . . . .	399
6.1.2.2 Berechnung der stationären Kurzschlussströme mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle . . . . .	401
6.1.2.3 Berechnung des Einschwingvorgangs bei dem Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle . . . . .	403
6.1.2.4 Veranschaulichung der Kurzschlussstromberechnung bei verzweigten Netzen an einem Beispiel . . . . .	408
6.1.2.5 Einfluss der Netzkapazitäten und Mischlasten auf die Kurz- schlussströme . . . . .	412
6.2 Generatornaher dreipoliger Kurzschluss . . . . .	414
6.2.1 Modell eines verlustlosen, mehrfach gespeisten Netzes mit einem generatornahen Kurzschluss . . . . .	414
6.2.2 Berechnung des Anfangskurzschlusswechselstroms bei generator- nahen Kurzschlüssen . . . . .	418
6.2.3 Berechnung des Stoßkurzschlussstroms für generatornahe Fehler .	420
6.2.4 Berechnung des Kurzschlussausschaltstroms . . . . .	424
6.2.5 Berücksichtigung von Netzkapazitäten, Mischlasten, motorischen Verbrauchern und Windenergieanlagen bei generatornahen Kurz- schlüssen . . . . .	427
6.3 Kurzschluss in Bordnetzen . . . . .	428
6.3.1 Kraftfahrzeuge . . . . .	428
6.3.2 Flugzeuge . . . . .	429
6.3.3 Schiffe . . . . .	429
6.4 Aufgaben . . . . .	432
<b>7 Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern</b>	<b>436</b>
7.1 Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen . . . . .	436
7.2 Mechanische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	439
7.2.1 Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern . . . . .	440
7.2.1.1 Berechnung der Stromkräfte . . . . .	440
7.2.1.2 Dimensionierung der Leiterschienen . . . . .	442
7.2.1.3 Stromkräfte bei gekrümmten und gekapselten Leiter- schienen . . . . .	444
7.2.2 Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmes- sungen . . . . .	445
7.2.3 Auslegung von Stützen . . . . .	448
7.2.4 Auslegung von Leiterseilen und Kabeln . . . . .	449

7.3	Thermische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	449
7.3.1	Berechnung der Wärmebeanspruchung . . . . .	449
7.3.2	Festlegung des zulässigen Kurzzeitstroms . . . . .	452
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlussleistung . . . . .	454
7.5	Auswirkungen von Kurzschlüssen auf das transiente Generator-drehzahl- verhalten . . . . .	457
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität . . . . .	458
7.5.1.1	Modellierung einer Generatornetzanbindung . . . . .	458
7.5.1.2	Diskussion der Modellgleichung . . . . .	463
7.5.1.3	Interpretation verschiedener Fehlersituationen mit dem Flächenkriterium . . . . .	463
7.5.1.4	Fehler in einer unterlagerten Spannungsebene . . . . .	464
7.5.1.5	Fehler im Höchstspannungsnetz . . . . .	465
7.5.1.6	Fehler mit Ausschaltung . . . . .	467
7.5.2	Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlussbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung . . . . .	467
7.6	Auslegung von Schaltern . . . . .	470
7.6.1	Einschwingspannungen nach einem Schalter-Klemmenkurzschluss in einphasigen Netzen . . . . .	472
7.6.2	Bewertung der Einschwingspannungen . . . . .	476
7.6.3	Abstandskurzschluss in einphasigen Netzen . . . . .	478
7.6.4	Auslegung von Leistungsschaltern in Drehstromnetzen . . . . .	481
7.6.5	Schaltvorgänge ohne Kurzschluss . . . . .	482
7.7	Aufgaben . . . . .	484
<b>8</b>	<b>Grundzüge der Betriebsführung und Planung von elektrischen Energieanlagen</b>	<b>486</b>
8.1	Betriebsführung von Netzanlagen . . . . .	486
8.1.1	Organisation des Strommarktes . . . . .	486
8.1.1.1	Organisation des Strommarktes vor der Deregulierung . . . . .	486
8.1.1.2	Organisation des Strommarktes nach der Deregulierung . . . . .	487
8.1.2	Betriebsführung von Übertragungsnetzen . . . . .	492
8.1.2.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum des Netzrechners . . . . .	492
8.1.2.2	Offline-Netzführung mit dem Netzrechner . . . . .	494
8.1.2.3	Online-Netzführungsrechnung . . . . .	498
8.1.2.4	Fahrplanmanagement . . . . .	499
8.1.3	Betriebsführung von Verteilungsnetzen . . . . .	500
8.1.3.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum der Schaltleitung . . . . .	500
8.1.3.2	Führung von Verteilungsnetzen . . . . .	501
8.2	Gesichtspunkte zur Planung von Netzen . . . . .	502
8.2.1	Planung von Niederspannungsnetzen . . . . .	502
8.2.2	Ausbauplanung von Mittelspannungsnetzen . . . . .	504
8.2.3	Ausbauplanung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen . . . . .	505
8.3	Netzintegration und Systemdienstleistungen von Windenergieanlagen . . . . .	508



8.4	Netzseitiges Verhalten von Erzeugungseinheiten und Spannungsqualität . . . . .	509
8.4.1	Überblick . . . . .	509
8.4.2	Richtlinien nach VDEW und FGW . . . . .	509
8.4.3	Spannungsqualität nach EN 50160 . . . . .	510
8.4.4	Richtlinien der Übertragungsnetzbetreiber . . . . .	512
8.4.4.1	E.ON-Richtlinien . . . . .	512
8.4.4.2	VDN-Richtlinie für EEG-Erzeugungsanlagen . . . . .	513
8.5	Aufgaben . . . . .	513
<b>9</b>	<b>Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau</b>	<b>517</b>
9.1	Methode der symmetrischen Komponenten . . . . .	517
9.2	Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze . . . . .	520
9.3	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten . . . . .	525
9.4	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten . . . . .	527
9.4.1	Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil . . . . .	528
9.4.1.1	Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung . . . . .	529
9.4.1.2	Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung . . . . .	531
9.4.1.3	Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung . . . . .	533
9.4.2	Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil . . . . .	533
9.4.3	Nullimpedanz einer Doppelleitung . . . . .	535
9.4.4	Nullimpedanz von Kabeln . . . . .	537
9.4.5	Nullimpedanz von Transformatoren . . . . .	539
9.4.5.1	Dreischenkeltransformatoren . . . . .	539
9.4.5.2	Fünfschenkeltransformatoren . . . . .	546
9.4.6	Nullimpedanz von Synchronmaschinen . . . . .	547
9.5	Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel . . . . .	547
9.6	Aufgaben . . . . .	552
<b>10</b>	<b>Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebsmitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern</b>	<b>553</b>
10.1	Beschreibung häufiger unsymmetrischer Fehler . . . . .	553
10.2	Erläuterung des Berechnungsverfahrens . . . . .	554
10.3	Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten . . . . .	560
10.3.1	Erdschluss mit Übergangswiderstand . . . . .	560
10.3.2	Zweipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung . . . . .	561
10.3.2.1	Zweipoliger Kurzschluss ohne Übergangswiderstände . . . . .	561
10.3.2.2	Zweipoliger Kurzschluss mit Übergangswiderständen . . . . .	564
10.3.3	Einpolige Leiterunterbrechung . . . . .	566
10.3.4	Unsymmetrische Mehrfachfehler . . . . .	569
10.4	Ausgleichsvorgänge bei unsymmetrischen Fehlern . . . . .	572
10.4.1	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatorferne Fehler . . . . .	572
10.4.2	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatornahe Fehler . . . . .	576

10.4.3	Numerische Auswertung der transienten Komponentenersatzschaltbilder . . . . .	577
10.4.4	Näherungsverfahren zur Bestimmung des Stoßkurzschlussstroms bei ein- und zweipoligen Kurzschlüssen . . . . .	580
10.5	Aufgaben . . . . .	580
<b>11</b>	<b>Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen</b>	<b>583</b>
11.1	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das stationäre Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen . . . . .	583
11.1.1	Netze mit isolierten Sternpunkten . . . . .	583
11.1.2	Netze mit Erdschlusskompensation . . . . .	587
11.1.3	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung . . . . .	593
11.1.4	Veranschaulichung der Spannungsverhältnisse durch Zeigerdiagramme . . . . .	597
11.2	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das transiente Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen . . . . .	599
11.2.1	Transiente Überspannungen durch Dauererdschlüsse . . . . .	599
11.2.2	Erdschlüsse mit selbstständig löschendem Lichtbogen . . . . .	602
11.3	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf Ferroresonanzerscheinungen . . . . .	605
11.3.1	Erläuterung des Ferroresonanzeffekts . . . . .	605
11.3.2	Ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen . . . . .	609
11.4	Aufgaben . . . . .	615
<b>12</b>	<b>Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren</b>	<b>618</b>
12.1	Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen größer als 1 kV . . . . .	618
12.1.1	Zulässige Körperströme und Berührungsspannungen . . . . .	618
12.1.2	Direkter und indirekter Berührungsschutz . . . . .	620
12.2	Berührungsspannungen bei Erdern . . . . .	622
12.3	Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern . . . . .	626
12.4	Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen . . . . .	633
12.4.1	Auslegungskriterien für Netze mit isolierten Sternpunkten oder mit Erdschlusskompensation . . . . .	633
12.4.2	Auslegungskriterien für Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung . . . . .	634
12.5	Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen . . . . .	634
12.6	Aufgaben . . . . .	639
<b>13</b>	<b>Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für elektrische Anlagen</b>	<b>642</b>
13.1	Struktur der Kosten . . . . .	642
13.1.1	Kostenarten . . . . .	642
13.1.1.1	Kapitalkosten . . . . .	642
13.1.1.2	Betriebskosten . . . . .	644
13.1.1.3	Sonstige Kosten . . . . .	646
13.1.1.4	Ausgaben, Einnahmen, operatives Betriebsergebnis . . . . .	646
13.1.2	Fixe und variable Kosten . . . . .	646
13.1.3	Einzel- und Gemeinkosten . . . . .	647

13.2	Gestaltung der Strompreise . . . . .	649
13.2.1	Grundstruktur der Preise bzw. Entgelte . . . . .	650
13.2.2	Preisgestaltung der Netzbetreiber . . . . .	651
13.2.3	Preisgestaltung der Stromhändler . . . . .	652
13.2.4	Strombezugsverträge mit Niederspannungsnetzkunden . . . . .	652
13.2.5	Strombezugsverträge mit Mittelspannungsnetzkunden . . . . .	653
13.2.6	Strombezugsverträge mit Großkunden . . . . .	654
13.3	Aufbereitung der Lastverläufe . . . . .	655
13.4	Investitionsrechnung für Netzanlagen . . . . .	656
13.4.1	Kostenvergleich . . . . .	656
13.4.1.1	Zulässigkeit eines Kostenvergleichs . . . . .	657
13.4.1.2	Statischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner . . . . .	657
13.4.1.3	Dynamischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner . . . . .	660
13.4.1.4	Kostenvergleich bei einer Rationalisierungsinvestition . . . . .	661
13.4.2	Methoden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	662
13.4.2.1	Kapitalwertmethode . . . . .	662
13.4.2.2	Methode des internen Zinsfußes . . . . .	663
13.4.2.3	Annuitätenmethode . . . . .	664
13.4.2.4	Dynamische Amortisationsdauer . . . . .	664
13.4.3	Investitionsentscheidung . . . . .	665
13.5	Aufgaben . . . . .	665
<b>Lösungen</b>		<b>668</b>
<b>Anhang</b>		<b>724</b>
	Richtwerte für Freileitungen . . . . .	724
	Richtwerte für Kabel . . . . .	726
	Zulässige Betriebsströme für Stromschienen aus Aluminium . . . . .	727
	Kennlinien für NH-Sicherungen zum Motorschutz . . . . .	727
	Übersichtsschaltpläne realer Energieversorgungsnetze . . . . .	728
	Richtwerte für Kosten . . . . .	731
	Elektrischer Wirkungsgrad wichtiger Kraftwerksarten . . . . .	732
	Beispiel für Strompreise . . . . .	732
	Beispiele für Netzentgelte von Energieversorgungsunternehmen . . . . .	733
	Wichtige Laplace-Transformierte . . . . .	734
<b>Quellenverzeichnis</b>		<b>735</b>
<b>Verzeichnis wichtiger Normen und Richtlinien</b>		<b>736</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>742</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>		<b>750</b>