

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Elektrische Energie, Lebensstandard, Versorgungssicherheit</b> .....	1
<b>2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme</b> .....	11
2.1 Historische Entwicklung .....	11
2.2 Liberalisierung des Strommarkts .....	14
2.3 Elektroenergiesysteme .....	19
2.4 Verbundsysteme .....	25
<b>3. Energieressourcen – Energieverbrauch</b> .....	35
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie .....	35
3.2 Primärenergieressourcen .....	42
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch ...	45
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen .....	52
3.3 Klimawandel .....	57
<b>4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken</b> .....	61
4.1 Thermodynamische Grundbegriffe .....	64
4.1.1 Dampfgehalt .....	65
4.1.2 Entropie, T(S)-Diagramm .....	66
4.1.3 Carnot-Prozess und thermischer Wirkungsgrad .	70
4.1.4 Arbeitsfluid Wasser/Dampf im T(s)-Diagramm.	73
4.1.5 Enthalpie, h(s)-Diagramm .....	75
4.2 Dampfkraftwerksprozess .....	79
4.2.1 Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungsgrad .....	79
4.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads .	82
4.2.2.1 Zwischenüberhitzung .....	83
4.2.2.2 Regenerative Speisewasservorwärmung	84
4.2.2.3 Kühlmitteltemperatur .....	85

4.2.2.4	Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks	86
4.2.3	Exergetischer Wirkungsgrad	90
4.3	Dampfkraftwerkkomponenten	92
4.3.1	Dampferzeuger	92
4.3.1.1	Dampferzeugerbauarten	92
4.3.1.2	Feuerungen	98
4.3.1.3	Leistungsregelung bei Dampferzeugern	100
4.3.1.4	Rauchgasreinigung	101
4.3.2	Dampfturbinen	106
4.3.2.1	Bauarten	106
4.3.2.2	Leistungsregelung von Dampfturbinen	112
4.3.3	Kondensator, Kühleinrichtungen	116
4.3.3.1	Kondensator	116
4.3.3.2	Kühlarten	117
4.3.3.3	Abwärmenutzung	119
4.4	Leistungsregelung in Dampfkraftwerken	121
4.4.1	Festdruckbetrieb	121
4.4.2	Gleitdruckbetrieb	123
4.4.3	Modifizierter Gleichdruckbetrieb	123
4.4.4	Vergleichende Betrachtung	124
4.5	Gasturbinenkraftwerke	126
4.6	Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD)	131
4.7	Kraft-Wärme-Kopplung	134
4.7.1	Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie	135
4.7.2	Kraft-Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung	137
<b>5.</b>	<b>Stromerzeugung in Kernkraftwerken</b>	<b>141</b>
5.1	Kernenergie	144
5.1.1	Kernfusion	145
5.1.2	Kernfission (Kernspaltung)	148
5.1.3	Nachzerfallswärme	159
5.1.4	Brennstoffkreislauf	163
5.2	Druckwasserreaktoren (DWR)	167
5.3	Siedewasserreaktoren (SWR)	170
5.4	Gasekühlte Reaktoren	172
5.5	Brutreaktoren	174
5.6	Kernkraftwerke der Generation IV	177
5.7	Leistungsregelung von Kernreaktoren	178

5.7.1	Leistungsregelung von Druckwasserreaktoren . . .	181
5.7.2	Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren . . .	183
5.7.3	Leistungsregelung von gasgekühlten Reaktoren .	184
5.7.4	Leistungsregelung von natriumgekühlten Reaktoren . . . . .	184
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraftwerke . . . . .	185
<b>6.</b>	<b>Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien . . . . .</b>	<b>189</b>
6.1	Wasserkraftwerke . . . . .	190
6.1.1	Laufwasserkraftwerke . . . . .	191
6.1.2	Speicherkraftwerke . . . . .	192
6.1.3	Pumpspeicherkraftwerke . . . . .	194
6.1.4	Gezeitenkraftwerke . . . . .	196
6.1.5	Turbinentypen . . . . .	198
6.1.5.1	Kaplan-Turbine . . . . .	199
6.1.5.2	Francis-Turbine . . . . .	199
6.1.5.3	Pelton-Turbine . . . . .	201
6.1.6	Leistungsregelung . . . . .	202
6.2	Windkraftanlagen . . . . .	204
6.2.1	Mechanische Leistung . . . . .	205
6.2.2	Generatorkonzepte . . . . .	206
6.2.3	Leistungsregelung von Windturbinen . . . . .	208
6.2.4	Einbindung von Windkraftanlagen in die Netze der öffentlichen Stromversorgung . . . . .	210
6.2.5	Stand der Technik und Ausblick . . . . .	211
6.3	Solarenergieanlagen . . . . .	216
6.3.1	Direkte Nutzung der Solarenergie . . . . .	219
6.3.1.1	Photovoltaik-Anlagen . . . . .	219
6.3.1.2	Solarthermische Anlagen . . . . .	226
6.4	Biomasse - Kraftwerke . . . . .	230
6.5	Geothermische Stromerzeugung . . . . .	233
6.6	Brennstoffzellen . . . . .	236
6.7	Virtuelle Kraftwerke . . . . .	238
6.8	Speicher elektrischer Energie . . . . .	239
6.8.1	Pumpspeicherkraftwerke . . . . .	240
6.8.2	Druckgasspeicher-Kraftwerke . . . . .	240
6.8.3	Wiederaufladbare Batterien . . . . .	242
6.8.4	Wasserstofftechnologie . . . . .	247

6.8.5	Wärmespeicher .....	249
6.8.6	Schwungradspeicher .....	249
6.8.7	Supraleitende magnetische Energiespeicher ....	250
<b>7.</b>	<b>Kraftwerkleittechnik .....</b>	<b>253</b>
7.1	Leittechnik-Funktionen .....	254
7.2	Verfahrens- und leittechnische Struktur eines Kraftwerkprozesses .....	256
7.3	Prozessleitsysteme .....	259
7.3.1	Verbindungsprogrammierte Prozessleitsysteme .	259
7.3.2	Speicherprogrammierbare Prozessleitsysteme ...	261
7.3.3	Prozessleitsysteme mit Feldbus .....	270
7.3.4	Energiemanagementsysteme .....	271
7.3.4.1	Prozessnahe Anwendungen .....	272
7.3.4.2	Betriebliche Anwendungen .....	274
7.3.4.3	Business Anwendungen .....	274
7.3.4.4	Fernwartung .....	274
7.4	Prozessvisualisierung .....	275
7.5	Energiemanagementsysteme der Generation IV .....	277
<b>8.</b>	<b>Umwandlung mechanischer Energie mittels Synchrongeneratoren .....</b>	<b>283</b>
8.1	Vollpol- und Schenkelpolgeneratoren .....	284
8.2	Wirkungsweise von Synchrongeneratoren .....	287
8.2.1	Der Synchrongenerator im Leerlauf .....	287
8.2.2	Der Synchrongenerator bei Belastung .....	293
8.2.3	Einfluss der Sättigung .....	298
8.2.4	Dämpferwicklung .....	300
8.3	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine .....	302
8.4	Leistungsgleichungen der Synchronmaschine .....	305
8.5	Stationäre Betriebszustände .....	307
8.6	Phasenschieberbetrieb .....	308
8.7	Belastungsgrenzen des Synchrongenerators .....	310
8.8	Sternpunktbehandlung bei Synchrongeneratoren .....	314
8.9	Erregungsverfahren für Synchrongeneratoren .....	317
8.9.1	Gleichstromerregemaschinen .....	317
8.9.2	Drehstromerregemaschinen .....	319
8.9.3	Statische Erregereinrichtungen .....	320
8.9.4	Dynamisches Verhalten von Erregereinrichtungen .....	321

8.10	Der Synchrongenerator im Kurzschluss . . . . .	322
8.10.1	Generatorferner Kurzschluss . . . . .	323
8.10.2	Generatornaher Kurzschluss . . . . .	330
8.11	Mathematische Modelle für Synchrongeneratoren . . . . .	335
8.11.1	Dreiphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb . . . . .	335
8.11.2	Einphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb . . . . .	339
8.11.3	Ermittlung der Mit-, Gegen und Nullimpedanz eines Synchrongenerators . . . . .	348
8.11.4	Die $dq0$ -Transformation . . . . .	351
8.11.4.1	Mathematische Vorgehensweise . . . . .	354
8.11.4.2	Elektrische Leistung und Drehmoment . . . . .	365
8.11.4.3	Kopplung des Generatormodells mit dem Elektroenergiesystem . . . . .	367
8.12	Virtueller Synchrongenerator . . . . .	368
<b>9.</b>	<b>Bereitstellung elektr. Energie auf verschiedenen Spannungsebenen . . . . .</b>	<b>371</b>
9.1	Wirkungsweise und Ersatzschaltbild von Transformatoren	375
9.2	Kurzschlussersatzschaltbild . . . . .	385
9.2.1	Ersatzschaltbilder mit umgerechneten Größen . . . . .	385
9.2.2	Messung der Kurzschlussimpedanz . . . . .	388
9.2.3	Berechnung der Kurzschlussimpedanz . . . . .	390
9.2.4	Zeigerdiagramme des Kurzschlussersatzschalt- bilds . . . . .	391
9.2.5	Kurzschlussersatzschaltbild für Dreiwicklungs- transformatoren . . . . .	392
9.3	Kaskadierte und parallel geschaltete Transformatoren . . . . .	393
9.3.1	Kaskadierte Transformatoren . . . . .	393
9.3.2	Parallelbetrieb von Transformatoren . . . . .	396
9.4	Spartransformatoren . . . . .	397
9.5	Drehstromtransformatoren . . . . .	398
9.5.1	Kernbauformen . . . . .	398
9.5.2	Schaltgruppen . . . . .	400
9.5.2.1	Schaltgruppe $Yy0$ . . . . .	405
9.5.2.2	Schaltgruppe $Dy5$ . . . . .	409
9.5.2.3	Schaltgruppe $Yd5$ . . . . .	410
9.5.2.4	Schaltgruppe $Yz5$ . . . . .	411

9.5.3	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren . . . . .	412
9.5.3.1	Mitimpedanz von Drehstromtransformatoren . . . . .	412
9.5.3.2	Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren . . . . .	413
9.6	Regeltransformatoren . . . . .	420
9.6.1	Längsregler . . . . .	421
9.6.1.1	Unter Last schaltbare Transformatoren	421
9.6.1.2	Längsregler mit Zusatztransformatoren	423
9.6.2	Querregler . . . . .	424
9.6.3	Schrägregler . . . . .	426
9.7	Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms . . . . .	427
9.8	Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren . . . . .	429
<b>10.</b>	<b>Transport und Übertragung elektrischer Energie . . . . .</b>	<b>435</b>
10.1	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung, HDÜ . . . . .	435
10.1.1	Transportnetze . . . . .	436
10.1.2	Übertragungsnetze . . . . .	439
10.1.3	Höhe der Transport- bzw. Übertragungsspannung	439
10.1.3.1	Übertragungsverluste . . . . .	439
10.1.3.2	Übertragungskapazität . . . . .	440
10.2	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ . . . . .	443
10.3	Betriebsverhalten von Leitungen . . . . .	447
10.3.1	Elektrisch lange und kurze Leitungen . . . . .	447
10.3.2	Mathematisches Modell elektrisch langer Leitungen . . . . .	450
10.3.3	Verlustlose Leitung . . . . .	455
10.3.3.1	Ausgewählte betriebliche Spezialfälle .	455
10.3.3.2	Leerlauf am Leitungsende . . . . .	456
10.3.3.3	Kurzschluss am Leitungsende . . . . .	458
10.3.3.4	Belastung mit dem Wellenwiderstand .	460
10.3.4	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer elektrisch langen Leitung . . . . .	464
10.3.5	Betriebsverhalten elektrisch kurzer Leitungen . .	468
10.3.5.1	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm .	468
10.3.5.2	Längs- und Querspannungsabfall . . . . .	470
10.4	Blindleistungskompensation in Hochspannungsnetzen . .	472
10.4.1	Kompensation induktiver Blindleistung . . . . .	473

10.4.1.1	Parallel-Kompensation . . . . .	473
10.4.1.2	Reihen-Kompensation . . . . .	474
10.4.2	Kompensation kapazitiver Blindleistung . . . . .	477
10.5	FACTS (Flexible AC-Transmission Systems) . . . . .	478
10.5.1	Klassifizierung von FACTS-Betriebsmitteln . . . . .	480
10.5.2	Parallel geschaltete FACTS-Regler . . . . .	481
10.5.2.1	Thyristor-Controlled Reactor, TCR . . . . .	482
10.5.2.2	Thyristor-Switched Capacitor, TSC . . . . .	483
10.5.2.3	Static VA <sub>r</sub> Compensator, SVC . . . . .	484
10.5.2.4	STATCOM . . . . .	485
10.5.3	Seriengeschaltete FACTS-Betriebsmittel . . . . .	487
10.5.3.1	Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC . . . . .	487
10.5.3.2	Static Synchronous Series Compensa- tor, SSSC . . . . .	489
10.5.4	Kombinierte FACTS-Regler . . . . .	490
10.5.4.1	Unified Power Flow Controller, UPFC . . . . .	490
10.5.4.2	Dynamic Power-Flow Controller, DFC . . . . .	491
10.5.4.3	FACTS HGÜ-Kupplungen . . . . .	492
10.5.5	FACTS-Regelung . . . . .	493
10.6	Betriebsimpedanzen von Mehrleitersystemen . . . . .	495
10.6.1	Berechnung von Betriebsimpedanzen in Längs- richtung . . . . .	495
10.6.1.1	Carson-Formel . . . . .	499
10.6.1.2	Tabellenbücher . . . . .	500
10.6.1.3	Messung der Impedanzen . . . . .	500
10.6.2	Berechnung der Betriebskapazitäten . . . . .	503
<b>11.</b>	<b>Verteilung elektrischer Energie . . . . .</b>	<b>511</b>
11.1	Netztopologien . . . . .	512
11.1.1	Strahlennetze . . . . .	512
11.1.2	Ringnetze . . . . .	513
11.1.3	Maschennetze . . . . .	514
11.2	110 kV-Verteilnetze . . . . .	516
11.3	Mittelspannungsnetze . . . . .	519
11.3.1	Mittelspannungs-Ortsnetze . . . . .	520
11.3.2	Mittelspannungs-Industrienetze . . . . .	523
11.3.3	Mittelspannungsnetze in Großgebäuden bzw. Gebäudekomplexen . . . . .	527

11.3.4	Eigenbedarfsnetze .....	528
11.4	Niederspannungsnetze .....	531
11.4.1	Niederspannungs-Ortsnetze .....	531
11.4.2	Niederspannungs-Industriernetze .....	533
11.4.3	Großgebäudenetze .....	537
11.4.4	Bordnetze .....	538
11.5	Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungsnetzen .....	540
11.5.1	Netze mit geringem Stromrichteranteil .....	542
11.5.2	Netze mit hohem Stromrichteranteil .....	543
11.6	Smart Grids .....	544
11.6.1	Smart Metering .....	547
11.6.2	Smart Homes .....	547
11.6.3	Kommunikationswege für Smart Grids .....	548
<b>12.</b>	<b>Sternpunktbehandlung</b> .....	<b>553</b>
12.1	Netze mit isolierten Sternpunkten .....	554
12.2	Über Kompensationsreaktanzen geerdete Netze .....	558
12.3	Netze mit geerdeten Sternpunkten .....	561
12.4	Sternpunktbehandlung mit symmetrischen Komponenten .....	563
12.5	Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen .....	565
12.5.1	TN-Netze .....	567
12.5.2	TT-Netze .....	569
12.5.3	I-Netze .....	569
<b>13.</b>	<b>Schaltanlagen</b> .....	<b>573</b>
13.1	Schaltgeräte .....	575
13.1.1	Sicherungen .....	577
13.1.2	Lastschalter .....	583
13.1.3	Leistungsschalter .....	585
13.1.4	Trennschalter .....	590
13.1.5	Kurzschlussstrombegrenzer .....	592
13.1.6	Schaltgeräteübersicht .....	595
13.2	Niederspannungsschaltanlagen .....	596
13.2.1	Niederspannungsschaltanlagen im Wohn-Installationsbereich .....	597
13.2.2	Niederspannungsschaltanlagen bis 630 A .....	599
13.2.3	Niederspannungsschaltanlagen über 630 A .....	600
13.3	Mittelspannungsschaltanlagen .....	603



13.3.1	Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung . . . . .	607
13.3.2	Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung . . . . .	611
13.4	Hochspannungsschaltanlagen . . . . .	612
13.4.1	Freiluftschaltanlagen . . . . .	613
13.4.2	Gekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Innenraumaufstellung . . . . .	615
13.4.3	Topologie von Hochspannungsschaltanlagen . . . . .	618
13.5	Umspannstationen . . . . .	624
13.6	Anforderungen an Schaltanlagen . . . . .	627
<b>14.</b>	<b>Netzschutz . . . . .</b>	<b>631</b>
14.1	Schutztechnik-Grundlagen . . . . .	632
14.2	Schutzgerätetechnik . . . . .	637
14.3	Schutzprinzipien und -kriterien . . . . .	640
14.3.1	Überstromschutz . . . . .	640
14.3.1.1	Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais) . . . . .	641
14.3.1.2	Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais) . . . . .	642
14.3.1.3	UMZ-Schutz mit Richtungskriterium . . . . .	644
14.3.2	Distanzschutz . . . . .	645
14.3.3	Vergleichsschutz . . . . .	650
14.3.3.1	Messgrößenvergleichsschutz . . . . .	650
14.3.3.2	Phasenvergleichsschutz . . . . .	652
14.3.3.3	Signalvergleichsschutz . . . . .	652
14.3.4	Erdschlussmeldung . . . . .	653
14.4	Schutztechnik aus Sicht einzelner Betriebsmittel . . . . .	654
14.4.1	Leitungsschutz . . . . .	654
14.4.1.1	Strahlennetze . . . . .	655
14.4.1.2	Ringleitungen und Maschennetze . . . . .	655
14.4.2	Transformatorschutz . . . . .	656
14.4.2.1	Transformatordifferentialschutz . . . . .	656
14.4.2.2	Buchholzrelais . . . . .	657
14.4.3	Generatorschutz . . . . .	658
14.4.4	Blockschutz . . . . .	659
14.4.5	Sammelschienenschutz . . . . .	662
14.4.6	Schaltanlagenenschutz . . . . .	663

14.5 Schutzkoordination . . . . .	664
14.5.1 Stromstaffelung im Strahlennetz . . . . .	665
14.5.2 Zeitstaffelung im Strahlennetz . . . . .	666
14.5.3 Schutzkoordination in Ring- und Maschennetzen mit UMZ-Schutz . . . . .	668
14.5.4 Zeitstaffelung mit Distanzrelais . . . . .	669
14.6 ANSI Schutz Codes . . . . .	671
14.7 Schutz in Niederspannungsnetzen . . . . .	672
14.7.1 Nullung (TN-Netze) . . . . .	675
14.7.2 Schutzerdung (TT-Netze) . . . . .	678
14.7.3 Schutzleitungssystem (IT-Netze) . . . . .	679
14.7.4 Fehlerstrom-(FI)-Schutzschaltung . . . . .	680
14.7.5 Fehlerspannungs-(FU)-Schutzschaltung . . . . .	681
14.7.6 Schutztrennung . . . . .	682
14.7.7 Schutzisolierung . . . . .	683
<b>15. Frequenz- und Spannungsregelung . . . . .</b>	<b>687</b>
15.1 Frequenzregelung . . . . .	692
15.1.1 Alleinbetrieb . . . . .	692
15.1.2 Parallelbetrieb . . . . .	695
15.1.3 Netzfrequenzregler . . . . .	699
15.1.4 Verbundbetrieb . . . . .	701
15.1.5 Dynamisches Verhalten der Frequenzregelung . . . . .	705
15.2 Spannungsregelung . . . . .	712
15.2.1 Spannungsqualität . . . . .	712
15.2.2 Spannungsregelung in Übertragungs- und Transportnetzen . . . . .	713
15.2.3 Stellglieder der Spannungs-/Blindleistungsregelung . . . . .	714
15.2.4 Spannungs-/Blindleistungsoptimierung . . . . .	715
15.3 Begrenzungsregelungen . . . . .	716
<b>16. Netzleittechnik . . . . .</b>	<b>721</b>
16.1 Netzleitstellen . . . . .	725
16.1.1 SCADA-Funktionen . . . . .	725
16.1.2 Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen HEO . . . . .	729
16.1.3 Rechnerstruktur und Datenbanksystem . . . . .	730
16.1.4 Schnittstellen zu anderen Systemen . . . . .	732
16.2 Stationsleittechnik . . . . .	733

16.3	Feldleittechnik	736
16.4	Fernwirktechnik	737
16.5	Tonfrequenz- und Funkrundsteuerung	739
16.5.1	Tonfrequenzrundsteuerung	739
16.5.2	Funkrundsteuerung	741
<b>17.</b>	<b>Netzbetrieb</b>	<b>743</b>
17.1	Netzführung	744
17.1.1	Transportnetzführung in der klassischen Stromversorgung, so genannte Lastverteilung	747
17.1.1.1	Lastprognose	748
17.1.1.2	Lastverteilung	754
17.1.1.3	Kraftwerksauswahl	757
17.1.1.4	Netzführung in der Schaltwarte	758
17.1.2	Transportnetzführung im liberalisierten Strommarkt, so genannte Systemführung	760
17.1.3	EMS-Funktionen	766
17.1.4	Netzbetrieb in Verteilnetzen	770
17.2	Netzbereitstellung	772
<b>18.</b>	<b>Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb</b>	<b>777</b>
18.1	Leistungsflussrechnung	778
18.1.1	Mathematisches Netzmodell mit Admittanzmatrix	779
18.1.1.1	Vierleiternetze (Netze mit Sternpunktleiter)	782
18.1.1.2	Dreileiter-Drehstromnetze	785
18.1.2	Hybridmatrix $\underline{H}$	787
18.1.3	Impedanzmatrix	790
18.1.4	Berechnung der Knotenspannungen und Leistungsströme bei vorgegebenen Lastströmen	791
18.1.5	Berechnung der Knotenspannungen bei vorgegebenen Knotenleistungen	792
18.1.6	Behandlung unterschiedlicher Netzknoten	795
18.2	Varianten der Leistungsflussrechnung	797
18.2.1	Schnelle Leistungsflussrechnung	797
18.2.2	Optimale Leistungsflussrechnung	798
18.2.3	Probabilistische Leistungsflussrechnung	798

18.3 Manuelle Berechnung von Leitungsströmen in kleinen Netzen . . . . .	799
18.3.1 Die an einem Ende belastete Leitung . . . . .	800
18.3.2 Die mehrfach belastete Leitung . . . . .	803
18.3.3 Die beidseitig gespeiste Leitung, gleiche Versorgungsspannung . . . . .	806
18.3.4 Die beidseitig gespeiste Leitung bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen . . . . .	807
18.3.5 Vereinfachungen in der Berechnung . . . . .	808
18.3.6 Berechnung der Stromverteilung in Netzen . . . . .	809
18.3.6.1 Strahlennetze . . . . .	809
18.3.6.2 Ringnetze . . . . .	810
18.3.6.3 Maschennetze . . . . .	811
<b>19. Kurzschlussstromberechnung . . . . .</b>	<b>819</b>
19.1 Begriffswelt und Methodik der Kurzschlussstromberechnung . . . . .	821
19.1.1 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I_k''$ . . . . .	822
19.1.2 Berechnung aus $I_k''$ abgeleiteter Kurzschlussstromgrößen . . . . .	823
19.1.2.1 Stoßkurzschlussstrom $i_p$ . . . . .	823
19.1.2.2 Ausschaltwechselstrom $I_b$ . . . . .	824
19.1.2.3 Dauerkurzschlussstrom $I_k$ . . . . .	824
19.1.2.4 Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom $I_{th}$ . . . . .	825
19.2 Der symmetrische Kurzschluss . . . . .	825
19.2.1 Berechnung von $I_k''$ bei einfacher Generatorspeisung . . . . .	826
19.2.2 Berechnung von $I_k''$ bei Netzeinspeisung . . . . .	832
19.2.3 Berechnung von $I_k''$ bei mehrfacher Einspeisung . . . . .	836
19.2.3.1 Das Verfahren der Ersatzspannungsquelle . . . . .	836
19.2.3.2 Rechenbeispiel zum Verfahren der Ersatzspannungsquelle . . . . .	838
19.3 Unsymmetrische Fehler . . . . .	844
19.3.1 Berechnungsformeln für unsymmetrische Fehler . . . . .	847
19.3.2 Berechnungsbeispiel „Unsymmetrische Kurzschlussströme“ . . . . .	848

19.3.2.1	Aufstellen der Ersatzschaltbilder des Mit-, Gegen- und Nullsystems . . . . .	849
19.3.3	Berechnung der Mit- und Gegenimpedanzen . . .	850
19.3.4	Berechnung der Nullimpedanzen . . . . .	850
19.3.5	Berechnung der finalen Impedanzen $Z_+$ , $Z_-$ und $Z_0$ . . . . .	850
19.3.5.1	Einpoliger Kurzschluss . . . . .	851
19.3.5.2	Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung . . . . .	851
19.3.5.3	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung . . . . .	852
19.4	Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel . . . . .	853
19.4.1	Generatoren . . . . .	854
19.4.2	Netzeinspeisung . . . . .	855
19.4.3	Transformatoren . . . . .	856
19.4.4	Kraftwerksblöcke . . . . .	857
19.4.5	Freileitungen und Kabel . . . . .	858
19.4.6	Motoren . . . . .	858
19.4.7	Sonstige Betriebsmittel . . . . .	859
19.4.8	Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen . . . . .	860
19.5	Kurzschlussstromberechnung mit bezogenen Größen . . . . .	860
19.5.1	Das per-unit-Verfahren . . . . .	861
19.5.2	Das %/MVA-Verfahren . . . . .	862
19.6	Digitale Kurzschlussstromberechnung . . . . .	864
19.6.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I''_k$ aus der Knotenadmittanzmatrix . . . . .	864
<b>20.</b>	<b>Stabilität von Elektroenergiesystemen . . . . .</b>	<b>867</b>
20.1	Polradwinkelstabilität . . . . .	869
20.1.1	Leistungs-/Polradwinkelkurve . . . . .	870
20.1.2	Bewegungsgleichung eines Synchrongenerators . . . . .	872
20.1.3	Kleinsignalstabilität . . . . .	876
20.1.3.1	Graphische Untersuchung der Kleinsignalstabilität . . . . .	877
20.1.3.2	Untersuchung der Kleinsignalstabilität mit Übertragungsfunktionen . . . . .	880
20.1.3.3	Methode der Zustandsvariablen . . . . .	882
20.1.4	Großsignalstabilität . . . . .	883

20.1.4.1	Numerische Integration des Bewegungsdifferentialgleichungssystems . . . . .	884
20.1.4.2	Großsignalstabilität mit der Methode der Zustandsvariablen . . . . .	886
20.1.4.3	Ljapunov-Verfahren . . . . .	887
20.2	Spannungsstabilität . . . . .	896
20.3	Netzzusammenbrüche . . . . .	900
<b>21.</b>	<b>Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen . .</b>	<b>907</b>
21.1	Energiewirtschaftsgesetz . . . . .	907
21.2	Liberalisierung der Strommärkte . . . . .	908
21.3	Netzzugang im deutschen Strommarkt . . . . .	912
21.4	Stromhandel . . . . .	914
21.4.1	Großhandelsmärkte . . . . .	916
21.4.2	Regelenergiemärkte . . . . .	917
21.4.3	CO <sub>2</sub> -Emissionshandel . . . . .	918
21.4.4	Energy Trading . . . . .	919
21.5	Bilanzkreise und Bilanzierungsgebiete . . . . .	921
21.6	Stromkosten und Strompreise . . . . .	926
21.6.1	Kalkulation der Stromkosten . . . . .	927
21.6.1.1	Stromerzeugungskosten . . . . .	927
21.6.1.2	Ermittlung von Netznutzungsentgelten . . . . .	931
21.6.2	Kalkulation der Strompreise . . . . .	933
21.6.3	Stromausfallkosten . . . . .	936
21.7	Methoden zur Investitionsrechnung . . . . .	938
21.8	Asset Management . . . . .	941

## Anhang

<b>A.</b>	<b>Rechnen mit komplexen Größen . . . . .</b>	<b>949</b>
A.1	Komplexe Zeigerdarstellung . . . . .	949
A.1.1	Komplexe Darstellung von Zweipolen . . . . .	951
A.1.2	Zählpeilsysteme . . . . .	952
A.1.3	Zeigerdiagramme . . . . .	954
A.1.4	Wechselstromleistung . . . . .	958
<b>B.</b>	<b>Rechnen in Drehstromsystemen . . . . .</b>	<b>961</b>
B.1	Begriffe und Größen in Drehstromsystemen . . . . .	961
B.1.1	Spannungen und Ströme in Drehstromnetzen . . . . .	961

B.1.2	Spannungen und Ströme von Drehstromerzeugern und -verbrauchern .....	963
B.2	Drehstromleistung elektrischer Betriebsmittel .....	965
B.2.1	Drehstromverbraucher am Drehstromnetz .....	967
B.2.2	Stern-Dreieck-Anlaufschaltung .....	969
<b>C.</b>	<b>Rechnen mit bezogenen Größen</b> .....	971
C.1	Referenzgrößen .....	972
C.1.1	Bezogene Spannungen .....	973
C.1.2	Bezogene Leistungen .....	974
C.1.3	Bezogene Ströme .....	974
C.1.4	Bezogene Impedanzen .....	975
C.2	Rechnen mit pu-Größen .....	977
<b>D.</b>	<b>Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder</b> .....	983
D.1	Induktionsgesetz, induzierte und selbstinduzierte Spannung .....	983
D.1.1	Induzierte Spannung .....	983
D.1.2	Selbstinduzierte Spannung .....	986
D.2	Windungsfluss, Spulenfluss und Flussverkettung einer Wicklung .....	986
D.3	Magnetische Streuung ( $X = X_h + X_\sigma$ ) .....	989
<b>E.</b>	<b>Unsymmetrische Kurzschlussströme</b> .....	991
E.1	Die Methode der symmetrischen Komponenten .....	991
E.2	Herleitung von Berechnungsformeln für unsymmetrische Kurzschlussströme .....	995
E.2.1	Berechnungsformel für einpolige Kurzschlussströme .....	996
E.2.2	Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse ohne Erdberührung .....	997
E.3	Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung .....	1000
<b>F.</b>	<b>Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug)</b>	1005
<b>G.</b>	<b>Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme</b>	1007
G.1	Direkte Verfahren .....	1007
G.1.1	Gauß'sches Eliminationsverfahren .....	1008
G.1.2	Gauß-Jordan-Algorithmus .....	1012

G.1.3	Dreiecksfaktorisierung .....	1012
G.1.4	Optimal geordnete Dreiecksfaktorisierung .....	1016
G.2	Iterationsverfahren .....	1016
G.2.1	Stromiterationsverfahren .....	1017
G.2.1.1	Jacobi-Verfahren (Gesamtschrittverfahren) .....	1017
G.2.1.2	Gauß-Seidel-Verfahren (Einzelschrittverfahren).....	1018
G.2.1.3	Newton-Raphson-Verfahren .....	1019
<b>H.</b>	<b>Methode der Zustandsvariablen .....</b>	<b>1023</b>
<b>I.</b>	<b>IEEE Engineering Ethics Code .....</b>	<b>1029</b>