

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrische Energie und Lebensstandard	1
2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme.....	11
2.1 Evolution der öffentlichen Stromversorgung	11
2.1.1 Liberalisierung des Strommarkts	15
2.1.2 Energiewende.....	21
2.2 Elektroenergiesysteme	33
2.3 Verbundsysteme	41
3. Energieressourcen – Energieverbrauch.....	53
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie	53
3.2 Primärenergieressourcen.....	59
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch ..	62
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen	70
3.2.3 Energiefluss	75
3.3 Klimawandel	77
3.4 Energieeffizienz	80
4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken	83
4.1 Thermodynamische Grundbegriffe	86
4.1.1 Dampfgehalt	87
4.1.2 Entropie, T(S)-Diagramm	89
4.1.3 Carnot-Prozess und thermischer Wirkungsgrad	92
4.1.4 Arbeitsfluid Wasser/Dampf im T(s)-Diagramm	95
4.1.5 Enthalpie, h(s)-Diagramm	97
4.2 Dampfkraftwerksprozess.....	101
4.2.1 Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungs-	
grad	101
4.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads	104
4.2.2.1 Zwischenüberhitzung	105

4.2.2.2	Regenerative Speisewasservorwärmung	106
4.2.2.3	Kühlmitteltemperatur	108
4.2.2.4	Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks	108
4.2.3	Exergetischer Wirkungsgrad	113
4.3	Dampfkraftwerkkomponenten	114
4.3.1	Dampferzeuger	115
4.3.1.1	Dampferzeugerbauarten	115
4.3.1.2	Feuerungen	120
4.3.1.3	Leistungsregelung bei Dampferzeugern	122
4.3.1.4	Rauchgasreinigung	124
4.3.2	Dampfturbinen	129
4.3.2.1	Bauarten	129
4.3.2.2	Leistungsregelung von Dampfturbinen	135
4.3.3	Kondensator, Kühleinrichtungen	138
4.3.3.1	Kondensator	138
4.3.3.2	Kühlarten	140
4.3.3.3	Abwärmenutzung	142
4.4	Leistungsregelung in Dampfkraftwerken	144
4.4.1	Festdruckbetrieb	144
4.4.2	Gleitdruckbetrieb	145
4.4.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	146
4.4.4	Vergleichende Betrachtung	147
4.5	Gasturbinenkraftwerke	148
4.6	Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD)	154
4.7	Kraft-Wärme-Kopplung	157
4.7.1	Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie	157
4.7.2	Kraft-Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung	159
5.	Stromerzeugung in Kernkraftwerken	165
5.1	Kernenergie	168
5.1.1	Kernfusion	169
5.1.2	Kernfission (Kernspaltung)	172
5.1.3	Nachzerfallswärme	183
5.1.4	Brennstoffkreislauf	187
5.2	Druckwasserreaktoren (DWR)	191
5.3	Siedewasserreaktoren (SWR)	194
5.4	Gasgekühlte Reaktoren	196
5.5	Brutreaktoren	198

5.6	Kernkraftwerke der Generation IV	201
5.7	Leistungsregelung von Kernreaktoren	202
5.7.1	Leistungsregelung von Druckwasserreaktoren ..	205
5.7.2	Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren ..	207
5.7.3	Leistungsregelung von gasgekühlten Reaktoren	208
5.7.4	Leistungsregelung von natriumgekühlten Reak- toren	208
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraft- werke	209
5.7.6	Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken	210
6.	Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien	213
6.1	Wasserkraftwerke	214
6.1.1	Laufwasserkraftwerke	215
6.1.2	Speicherkraftwerke	216
6.1.3	Pumpspeicherkraftwerke	218
6.1.4	Gezeitenkraftwerke	220
6.1.5	Turbinentypen	222
	6.1.5.1 Kaplan-Turbine	223
	6.1.5.2 Francis-Turbine	224
	6.1.5.3 Pelton-Turbine	225
6.1.6	Leistungsregelung	226
6.2	Windkraftanlagen	228
6.2.1	Mechanische Leistung	229
6.2.2	Generatorkonzepte	230
6.2.3	Leistungsregelung von Windturbinen	232
6.2.4	Einbindung von Windkraftanlagen in die Netze der öffentlichen Stromversorgung	234
6.2.5	Stand der Technik und Ausblick	235
6.3	Solarenergieanlagen	240
6.3.1	Direkte Nutzung der Solarenergie	243
	6.3.1.1 Photovoltaik-Anlagen	243
	6.3.1.2 Solarthermische Anlagen	251
6.4	Biomasse - Kraftwerke	255
6.5	Geothermische Stromerzeugung	258
6.6	Brennstoffzellen	261
6.7	Virtuelle Kraftwerke	263
6.8	Speicher elektrischer Energie	264
6.8.1	Kurzzeitspeicher	266

6.8.1.1	Pumpspeicherkraftwerke	266
6.8.1.2	Druckgasspeicher-Kraftwerke	267
6.8.1.3	Wiederaufladbare Batterien	268
6.8.1.4	Wasserstofftechnologie	274
6.8.1.5	Wärmespeicher/Power to Heat (PtH, P2H)	276
6.8.1.6	Schwungradspeicher	277
6.8.1.7	Supraleitende magnetische Energiespei- cher	277
6.8.1.8	Virtuelle Speicher	278
6.8.2	Langzeitspeicher	278
6.8.2.1	Power to Gas (PtG, P2G)	278
6.8.2.2	Innereuropäische Kooperation	279
6.8.3	Back-Up Versorgung	279
7.	Kraftwerkleittechnik	283
7.1	Leittechnik-Funktionen	284
7.2	Verfahrens- und leittechnische Struktur eines Kraft- werkprozesses	286
7.3	Prozessleitsysteme	289
7.3.1	Verbindungsprogrammierte Prozessleitsysteme	289
7.3.2	Speicherprogrammierbare Prozessleitsysteme . .	291
7.3.3	Prozessleitsysteme mit Feldbus	300
7.3.4	Energiemanagementsysteme	301
7.3.4.1	Prozessnahe Anwendungen	302
7.3.4.2	Betriebliche Anwendungen	304
7.3.4.3	Business Anwendungen	304
7.3.4.4	Fernwartung	304
7.4	Prozessvisualisierung	305
7.5	Energiemanagementsysteme der Generation IV	307
8.	Umwandlung mechanischer Energie mittels Synchron- generatoren	313
8.1	Vollpol- und Schenkelpolgeneratoren	314
8.2	Wirkungsweise von Synchrongeneratoren	317
8.2.1	Der Synchrongenerator im Leerlauf	317
8.2.2	Der Synchrongenerator bei Belastung	323
8.2.3	Einfluss der Sättigung	328
8.2.4	Dämpferwicklung	330
8.3	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	332

8.4	Leistungsgleichungen der Synchronmaschine	335
8.5	Stationäre Betriebszustände	337
8.6	Phasenschieberbetrieb	338
8.7	Belastungsgrenzen des Synchrongenerators	340
8.8	Sternpunktbehandlung bei Synchrongeneratoren	344
8.9	Erregungsverfahren für Synchrongeneratoren	347
8.9.1	Gleichstromerregemaschinen	347
8.9.2	Drehstromerregemaschinen	349
8.9.3	Statische Erregereinrichtungen	350
8.9.4	Dynamisches Verhalten von Erregereinrichtungen	351
8.10	Der Synchrongenerator im Kurzschluss	352
8.10.1	Generatorferner Kurzschluss	353
8.10.2	Generatornaher Kurzschluss	360
8.11	Mathematische Modelle für Synchrongeneratoren	365
8.11.1	Dreiphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb	365
8.11.2	Einphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb	369
8.11.3	Ermittlung der Mit-, Gegen- und Nullimpedanz eines Synchrongenerators	378
8.11.4	Die $dq0$ -Transformation	381
8.11.4.1	Mathematische Vorgehensweise	384
8.11.4.2	Elektrische Leistung und Drehmoment	395
8.11.4.3	Kopplung des Generatormodells mit dem Elektroenergiesystem	397
8.12	Virtueller Synchrongenerator	398
9.	Bereitstellung elektrischer Energie auf verschiedenen Spannungsebenen	401
9.1	Wirkungsweise und Ersatzschaltbild von Transformatoren	405
9.2	Kurzschlussersatzschaltbild	415
9.2.1	Ersatzschaltbilder mit umgerechneten Größen	415
9.2.2	Messung der Kurzschlussimpedanz	418
9.2.3	Berechnung der Kurzschlussimpedanz	420
9.2.4	Zeigerdiagramme des Kurzschlussersatzschaltbilds	421

9.2.5	Kurzschlussersatzschaltbild für Dreiwicklungs- transformatoren	422
9.3	Kaskadierte und parallel geschaltete Transformatoren .	423
9.3.1	Kaskadierte Transformatoren	423
9.3.2	Parallelbetrieb von Transformatoren	426
9.4	Spartransformatoren	427
9.5	Drehstromtransformatoren	428
9.5.1	Kernbauformen	428
9.5.2	Schaltgruppen	430
9.5.2.1	Schaltgruppe Yy0	435
9.5.2.2	Schaltgruppe Dy5	439
9.5.2.3	Schaltgruppe Yd5	440
9.5.2.4	Schaltgruppe Yz5	441
9.5.3	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz von Drehstrom- transformatoren	442
9.5.3.1	Mitimpedanz von Drehstromtransfor- matoren	442
9.5.3.2	Nullimpedanz von Drehstromtransfor- matoren	443
9.6	Regeltransformatoren	450
9.6.1	Längsregler	451
9.6.1.1	Unter Last schaltbare Transformatoren	451
9.6.1.2	Längsregler mit Zusatztransformatoren	453
9.6.2	Querregler	455
9.6.3	Schrägregler	456
9.7	Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms	456
9.8	Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren . . .	459
10.	Transport und Übertragung elektrischer Energie . . .	465
10.1	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung, HDÜ	465
10.1.1	Transportnetze	466
10.1.2	Hochspannungsnetze	469
10.1.3	Höhe der Netzspannung	469
10.1.3.1	Übertragungsverluste	469
10.1.3.2	Übertragungskapazität	470
10.2	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ	473
10.2.1	Netzgeführte HGÜ mit Thyristoren	474
10.2.2	Selbstgeführte HGÜ mit IGBT-Leistungshalb- leitern	477

10.2.3	HGÜ-Leistungsschalter	479
10.3	Betriebsverhalten von Leitungen	481
10.3.1	Elektrisch lange und kurze Leitungen	481
10.3.2	Mathematisches Modell elektrisch langer Leitungen	484
10.3.3	Verlustlose Leitung	489
10.3.3.1	Ausgewählte betriebliche Spezialfälle	489
10.3.3.2	Leerlauf am Leitungsende	490
10.3.3.3	Kurzschluss am Leitungsende	492
10.3.3.4	Belastung mit dem Wellenwiderstand	494
10.3.4	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer elektrisch langen Leitung	498
10.3.5	Betriebsverhalten elektrisch kurzer Leitungen .	502
10.3.5.1	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	502
10.3.5.2	Längs- und Querspannungsabfall	504
10.4	Blindleistungskompensation in Hochspannungsnetzen .	506
10.4.1	Kompensation induktiver Blindleistung	507
10.4.1.1	Parallel-Kompensation	507
10.4.1.2	Reihen-Kompensation	508
10.4.2	Kompensation kapazitiver Blindleistung	511
10.5	FACTS (Flexible AC-Transmission Systems)	512
10.5.1	Klassifizierung von FACTS-Betriebsmitteln ...	514
10.5.2	Parallel geschaltete FACTS-Regler	515
10.5.2.1	Thyristor-Controlled Reactor, TCR .	516
10.5.2.2	Thyristor-Switched Capacitor, TSC .	517
10.5.2.3	Static VA _r Compensator, SVC	518
10.5.2.4	STATCOM	519
10.5.3	Seriengeschaltete FACTS-Betriebsmittel	521
10.5.3.1	Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC	521
10.5.3.2	Static Synchronous Series Compensator, SSSC	523
10.5.4	Kombinierte FACTS-Regler	524
10.5.4.1	Unified Power Flow Controller, UPFC	524
10.5.4.2	Dynamic Power Flow Controller, DFC	525
10.5.4.3	FACTS HGÜ-Kupplungen	526
10.5.5	FACTS-Regelung	527
10.6	Betriebsimpedanzen von Mehrleitersystemen	529

10.6.1	Berechnung von Betriebsimpedanzen in Längs- richtung	529
10.6.1.1	Carson-Formel	533
10.6.1.2	Tabellenbücher	534
10.6.1.3	Messung der Impedanzen	534
10.6.2	Berechnung der Betriebskapazitäten	537
11.	Verteilung elektrischer Energie	545
11.1	Netztopologien	546
11.1.1	Strahlennetze	547
11.1.2	Ringnetze	548
11.1.3	Maschennetze	549
11.2	110 kV-Verteilnetze	550
11.3	Mittelspannungsnetze	553
11.3.1	Mittelspannungs-Ortsnetze	554
11.3.2	Mittelspannungs-Industrienetze	557
11.3.3	Mittelspannungsnetze in Großgebäuden bzw. Gebäudekomplexen	561
11.3.4	Eigenbedarfsnetze	562
11.4	Niederspannungsnetze	565
11.4.1	Niederspannungs-Ortsnetze	565
11.4.2	Niederspannungs-Industrienetze	567
11.4.3	Großgebäudenetze	571
11.5	Smart Grids	572
11.5.1	Smart Metering	576
11.5.2	Smart Homes	578
11.5.3	Smart Cities	579
11.5.4	Kommunikationswege für Smart Grids	580
11.6	Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungs- netzen	582
11.6.1	Netze mit geringem Stromrichteranteil	584
11.6.2	Netze mit hohem Stromrichteranteil	586
12.	Sternpunktbehandlung	589
12.1	Netze mit isolierten Sternpunkten	590
12.2	Über Kompensationsreaktanzen geerdete Netze	595
12.3	Netze mit geerdeten Sternpunkten	597
12.4	Sternpunktbehandlung mit symmetrischen Kompo- nenten	599
12.5	Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen	601

12.5.1	TN-Netze	603
12.5.2	TT-Netze	604
12.5.3	I-Netze	605
13.	Schaltanlagen	609
13.1	Schaltgeräte	611
13.1.1	Sicherungen	613
13.1.2	Lastschalter	619
13.1.3	Leistungsschalter	621
13.1.4	Trennschalter	626
13.1.5	Kurzschlussstrombegrenzer	628
13.1.6	Schaltgeräteübersicht	631
13.2	Niederspannungsschaltanlagen	632
13.2.1	Niederspannungsschaltanlagen im Wohn-Installationsbereich	633
13.2.2	Niederspannungsschaltanlagen bis 630 A	635
13.2.3	Niederspannungsschaltanlagen über 630 A	636
13.3	Mittelspannungsschaltanlagen	639
13.3.1	Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung	643
13.3.2	Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung	647
13.4	Hochspannungsschaltanlagen	648
13.4.1	Freiluftschaltanlagen	649
13.4.2	Gekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Innenraumaufstellung	651
13.4.3	Topologie von Hochspannungsschaltanlagen ...	654
13.5	Umspannstationen	660
13.6	Anforderungen an Schaltanlagen	663
14.	Netzschutz	667
14.1	Schutztechnik-Grundlagen	668
14.2	Schutzgerätetechnik	673
14.3	Schutzprinzipien und -kriterien	676
14.3.1	Überstromschutz	676
14.3.1.1	Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais)	677
14.3.1.2	Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais)	678
14.3.1.3	UMZ-Schutz mit Richtungskriterium	680

14.3.2	Distanzschutz	681
14.3.3	Vergleichsschutz	686
14.3.3.1	Messgrößenvergleichsschutz	686
14.3.3.2	Phasenvergleichsschutz	688
14.3.3.3	Signalvergleichsschutz	688
14.3.4	Erdschlussmeldung	689
14.4	Schutztechnik aus Sicht einzelner Betriebsmittel	690
14.4.1	Leitungsschutz	690
14.4.1.1	Strahlennetze	691
14.4.1.2	Ringleitungen und Maschennetze ...	691
14.4.2	Transformatorschutz	692
14.4.2.1	Transformatordifferenzialschutz	692
14.4.2.2	Buchholzrelais	693
14.4.3	Generatorschutz	694
14.4.4	Blockschutz	695
14.4.5	Sammelschienenenschutz	698
14.4.6	Schaltanlagenenschutz	699
14.5	Schutzkoordination	700
14.5.1	Stromstaffelung im Strahlennetz	701
14.5.2	Zeitstaffelung im Strahlennetz	702
14.5.3	Schutzkoordination in Ring- und Maschennetzen mit UMZ-Schutz	704
14.5.4	Zeitstaffelung mit Distanzrelais	705
14.6	ANSI Schutz Codes	707
14.7	Schutz in Niederspannungsnetzen	708
14.7.1	Nullung (TN-Netze)	711
14.7.2	Schutzerdung (TT-Netze)	714
14.7.3	Schutzleitungssystem (IT-Netze)	715
14.7.4	Fehlerstrom-(FI)-Schutzschaltung	716
14.7.5	Fehlervoltages-(FU)-Schutzschaltung	717
14.7.6	Schutztrennung	718
14.7.7	Schutzisolierung	719
14.8	Wide Area Monitoring Systeme	720
15.	Frequenz- und Spannungsregelung	725
15.1	Frequenzregelung	730
15.1.1	Alleinbetrieb	730
15.1.2	Parallelbetrieb	733
15.1.3	Netzfrequenzregler	737

15.1.4	Verbundbetrieb	739
15.1.5	Dynamisches Verhalten der Frequenzregelung ..	743
15.1.6	Netzregelverbund (NRV)	750
15.2	Spannungsregelung	751
15.2.1	Spannungsqualität	751
15.2.2	Spannungsregelung in Übertragungs- und Trans- portnetzen	751
15.2.3	Stellglieder der Spannungs-/Blindleistungsrege- lung	753
15.2.4	Spannungs-/Blindleistungsoptimierung	754
15.3	Begrenzungsregelungen	755
16.	Netzleittechnik	759
16.1	Netzleitstellen	763
16.1.1	SCADA-Funktionen	763
16.1.2	Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungs- funktionen HEO	767
16.1.3	Rechnerstruktur und Datenbanksystem	768
16.1.4	Schnittstellen zu anderen Systemen	770
16.2	Stationsleittechnik	771
16.3	Feldleittechnik	774
16.4	Fernwirktechnik	775
16.5	Tonfrequenz- und Funkrundsteuerung	777
16.5.1	Tonfrequenzrundsteuerung	777
16.5.2	Funkrundsteuerung	779
17.	Netzbetrieb	781
17.1	Netzführung in Transportnetzen	782
17.1.1	Transportnetzführung in der klassischen Strom- versorgung, so genannte Lastverteilung	785
17.1.1.1	Lastprognose	786
17.1.1.2	Lastverteilung	792
17.1.1.3	Kraftwerksauswahl, Order of Merit ..	795
17.1.1.4	Netzführung in der Schaltwarte	797
17.1.2	Transportnetzführung im liberalisierten Strom- markt, so genannte Systemführung	800
17.1.3	Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheits- bereitschaft	806
17.1.4	EMS-Funktionen	808
17.2	Netzführung in Verteilnetzen	812

17.3 Netzbereitstellung	817
18. Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb	823
18.1 Leistungsflussrechnung	824
18.1.1 Mathematisches Netzmodell mit Admittanzmatrix.....	825
18.1.1.1 Vierleiternetze (Netze mit Sternpunkt-leiter)	828
18.1.1.2 Dreileiter-Drehstromnetze.....	831
18.1.2 Hybridmatrix $\underline{H}$	833
18.1.3 Impedanzmatrix	836
18.1.4 Berechnung der Knotenspannungen und Lei-tungsströme bei vorgegebenen Lastströmen ...	837
18.1.5 Berechnung der Knotenspannungen bei vorge-gebenen Knotenleistungen	838
18.1.6 Behandlung unterschiedlicher Netzknoten	841
18.2 Varianten der Leistungsflussrechnung	843
18.2.1 Schnelle Leistungsflussrechnung	843
18.2.2 Optimale Leistungsflussrechnung	844
18.2.3 Probabilistische Leistungsflussrechnung	844
18.3 Manuelle Berechnung von Leitungsströmen in kleinen Netzen.....	845
18.3.1 Die an einem Ende belastete Leitung	846
18.3.2 Die mehrfach belastete Leitung	849
18.3.3 Die beidseitig gespeiste Leitung, gleiche Versorgungsspannung	852
18.3.4 Die beidseitig gespeiste Leitung bei unterschied-lichen Versorgungsspannungen	853
18.3.5 Vereinfachungen in der Berechnung	854
18.3.6 Berechnung der Stromverteilung in Netzen ...	855
18.3.6.1 Strahlennetze	855
18.3.6.2 Ringnetze.....	856
18.3.6.3 Maschennetze	857
19. Kurzschlussstromberechnung	865
19.1 Begriffswelt und Methodik der Kurzschlussstromberech-nung	867
19.1.1 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I''_k	868

19.1.2	Berechnung aus I''_k abgeleiteter Kurzschluss-	
	stromgrößen	869
19.1.2.1	Stoßkurzschlussstrom i_p	869
19.1.2.2	Ausschaltwechselstrom I_b	870
19.1.2.3	Dauerkurzschlussstrom I_k	870
19.1.2.4	Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom	
	I_{th}	871
19.2	Der symmetrische Kurzschluss	871
19.2.1	Berechnung von I''_k bei einfacher Generator-	
	speisung	872
19.2.2	Berechnung von I''_k bei Netzeinspeisung	878
19.2.3	Berechnung von I''_k bei mehrfacher Einspeisung	882
	19.2.3.1 Das Verfahren der Ersatzspannungs-	
	quelle	882
	19.2.3.2 Rechenbeispiel zum Verfahren der Er-	
	satzspannungsquelle	884
19.3	Unsymmetrische Fehler	890
19.3.1	Berechnungsformeln für unsymmetrische Fehler	893
19.3.2	Berechnungsbeispiel „Unsymmetrische Kurz-	
	schlussströme“	894
	19.3.2.1 Aufstellen der Ersatzschaltbilder des	
	Mit-, Gegen- und Nullsystems	895
19.3.3	Berechnung der Mit- und Gegenimpedanzen ..	896
19.3.4	Berechnung der Nullimpedanzen	896
19.3.5	Berechnung der finalen Impedanzen Z_+ , Z_-	
	und Z_0	896
	19.3.5.1 Einpoliger Kurzschluss	897
	19.3.5.2 Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdbe-	
	rührung	897
	19.3.5.3 Zweipoliger Kurzschluss mit Erdbe-	
	rührung	898
19.4	Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel ...	899
19.4.1	Generatoren	900
19.4.2	Netzeinspeisung	901
19.4.3	Transformatoren	902
19.4.4	Kraftwerksblöcke	903
19.4.5	Freileitungen und Kabel	904
19.4.6	Motoren	904
19.4.7	Sonstige Betriebsmittel	905

19.4.8	Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen	906
19.5	Kurzschlussstromberechnung mit bezogenen Größen ..	906
19.5.1	Das per-unit-Verfahren	907
19.5.2	Das %/MVA-Verfahren	908
19.6	Digitale Kurzschlussstromberechnung	910
19.6.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I_k'' aus der Knotenadmittanzmatrix ...	910
20.	Stabilität von Elektroenergiesystemen	913
20.1	Polradwinkelstabilität	915
20.1.1	Leistungs-/Polradwinkelkurve	916
20.1.2	Bewegungsgleichung eines Synchrongenerators	918
20.1.3	Kleinsignalstabilität	922
20.1.3.1	Grafische Untersuchung der Kleinsignalstabilität	923
20.1.3.2	Untersuchung der Kleinsignalstabilität mit Übertragungsfunktionen ...	926
20.1.3.3	Methode der Zustandsvariablen	928
20.1.4	Großsignalstabilität	929
20.1.4.1	Numerische Integration des Bewegungsdifferenzialgleichungssystems	930
20.1.4.2	Großsignalstabilität mit der Methode der Zustandsvariablen	932
20.1.4.3	Ljapunov-Verfahren	933
20.2	Spannungsstabilität	942
20.3	Netzzusammenbrüche	946
21.	Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen .	955
21.1	Versorgungsqualität	955
21.2	Strommarktliberalisierung	959
21.3	Netzzugang im deutschen Strommarkt	962
21.4	Stromhandel	964
21.4.1	Großhandelsmärkte	967
21.4.2	Regelleistungsmärkte	967
21.4.3	Strommarkt 2.0	968
21.4.4	CO ₂ -Emissionshandel	970
21.4.5	Energy Trading	971
21.5	Bilanzkreise und Bilanzierungsgebiete	973
21.6	Stromkosten und Strompreise	978
21.6.1	Kalkulation der Stromkosten	979

21.6.1.1	Stromerzeugungskosten	980
21.6.1.2	Ermittlung von Netznutzungsentgelten	983
21.6.2	Kalkulation der Strompreise	985
21.6.3	Stromausfallkosten	988
21.7	Methoden zur Investitionsrechnung	990
21.8	Asset Management	993

Anhang

A.	Rechnen mit komplexen Größen	1001
A.1	Komplexe Zeigerdarstellung	1001
A.1.1	Komplexe Darstellung von Zweipolen	1003
A.1.2	Zählfeilsysteme	1004
A.1.3	Zeigerdiagramme	1006
A.1.4	Wechselstromleistung	1010
B.	Rechnen in Drehstromsystemen	1013
B.1	Begriffe und Größen in Drehstromsystemen	1013
B.1.1	Spannungen und Ströme in Drehstromnetzen ..	1013
B.1.2	Spannungen und Ströme von Drehstromerzeugern und -verbrauchern	1015
B.2	Drehstromleistung elektrischer Betriebsmittel	1017
B.2.1	Drehstromverbraucher am Drehstromnetz	1019
B.2.2	Stern-Dreieck-Anlaufschaltung	1021
C.	Rechnen mit bezogenen Größen	1023
C.1	Referenzgrößen	1024
C.1.1	Bezogene Spannungen	1025
C.1.2	Bezogene Leistungen	1026
C.1.3	Bezogene Ströme	1026
C.1.4	Bezogene Impedanzen	1027
C.2	Rechnen mit pu-Größen	1029
D.	Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder	1035
D.1	Induktionsgesetz, induzierte und selbstinduzierte Spannung	1035
D.1.1	Induzierte Spannung	1035
D.1.2	Selbstinduzierte Spannung	1038
D.2	Windungsfluss, Spulenfluss und Flussverkettung einer Wicklung	1038

D.3 Magnetische Streuung ($X = X_h + X_\sigma$)	1041
E. Unsymmetrische Kurzschlussströme	1043
E.1 Die Methode der symmetrischen Komponenten	1043
E.2 Berechnungsformeln für unsymmetrische Kurzschlussströme	1047
E.2.1 Berechnungsformel für einpolige Kurzschlussströme	1048
E.2.2 Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse ohne Erdberührung	1049
E.3 Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung	1052
F. Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug)	1057
G. Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme	1059
G.1 Direkte Verfahren	1059
G.1.1 Gauß'sches Eliminationsverfahren	1060
G.1.2 Gauß-Jordan-Algorithmus	1064
G.1.3 Dreiecksfaktorisierung	1064
G.1.4 Optimal geordnete Dreiecksfaktorisierung	1068
G.2 Iterationsverfahren	1069
G.2.1 Stromiterationsverfahren	1069
G.2.1.1 Jacobi-Verfahren (Gesamtschrittverfahren)	1069
G.2.1.2 Gauß-Seidel-Verfahren (Einzelschrittverfahren)	1070
G.2.1.3 Newton-Raphson-Verfahren	1071
H. Methode der Zustandsvariablen	1075
I. IEEE Code of Ethics	1081
Index	1085