

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrische Energie, Lebensstandard, Versorgungssicherheit	1
2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme.....	11
2.1 Historische Entwicklung	11
2.2 Liberalisierung des Strommarkts	14
2.3 Elektroenergiesysteme	19
2.4 Verbundsysteme	25
3. Energieressourcen – Energieverbrauch.....	35
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie	35
3.2 Primärennergieressourcen.....	42
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch ...	45
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen	52
3.3 Klimawandel	57
4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken	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
5.	Stromerzeugung in Kernkraftwerken	141
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	Gasgekühlte 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 Reak- toren	184
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraft- werke	185
6.	Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien	189
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
7.	Kraftwerkleittechnik	253
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
8.	Umwandlung mechanischer Energie mittels Synchrongeneratoren	283
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	Gleichstromerregermaschinen	317
8.9.2	Drehstromerregermaschinen	319
8.9.3	Statische Erregereinrichtungen	320
8.9.4	Dynamisches Verhalten von Erregereinrich-tungen	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
9. Bereitstellung elektr. Energie auf verschiedenen Spannungsebenen	371
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 Kurzschlussersatzschaltbilds	391
9.2.5 Kurzschlussersatzschaltbild für Drewicklungstransformatoren	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	Schräggregler	426
9.7	Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms	427
9.8	Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren	429
10.	Transport und Übertragung elektrischer Energie	435
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 _r 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 Mehrleiter-systemen	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
11.	Verteilung elektrischer Energie	511
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-Industrienetze	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
12. Sternpunktbehandlung	553
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
13. Schaltanlagen	573
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
14.	Netzschutz	631
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	Sammelschienschutz	662
14.4.6	Schaltanlagenschutz	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 Maschennet- zen 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
15. Frequenz- und Spannungsregelung.....	687
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 Trans- portnetzen	713
15.2.3 Stellglieder der Spannungs-/Blindleistungsre- gelung	714
15.2.4 Spannungs-/Blindleistungsoptimierung	715
15.3 Begrenzungsregelungen	716
16. Netzleittechnik	721
16.1 Netzteileitstellen	725
16.1.1 SCADA-Funktionen	725
16.1.2 Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungs- funktionen 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
17. Netzbetrieb	743
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
18. Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb	777
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 Netznoten	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 Leistungsströmen 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
19. Kurzschlussstromberechnung	819
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 Erdbe- rührungen	851
19.3.5.3	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdbe- rührungen	852
19.4	Kurzschluss impedanzen 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-Kurzschlusswechsel- stroms I_k'' aus der Knotenadmittanzmatrix	864
20.	Stabilität von Elektroenergiesystemen	867
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 Kleinsi- gnalstabilität	877
20.1.3.2	Untersuchung der Kleinsignalstabi- lität 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
21.	Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen ..	907
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 ₂ -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

A.	Rechnen mit komplexen Größen	949
A.1	Komplexe Zeigerdarstellung	949
A.1.1	Komplexe Darstellung von Zweipolen	951
A.1.2	Zählpfeilsysteme	952
A.1.3	Zeigerdiagramme	954
A.1.4	Wechselstromleistung	958
B.	Rechnen in Drehstromsystemen	961
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
C.	Rechnen mit bezogenen Größen	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
D.	Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder	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
E.	Unsymmetrische Kurzschlussströme	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
F.	Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug)	1005
G.	Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme	1007
G.1	Direkte Verfahren	1007
G.1.1	Gauß'sches Eliminationsverfahren	1008
G.1.2	Gauß-Jordan-Algorithmus	1012

XXX Inhaltsverzeichnis

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
H.	Methode der Zustandsvariablen	1023
I.	IEEE Engineering Ethics Code	1029