

## Inhaltsverzeichnis:

Adolf J. Schwab

### **Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie**

ISBN: 3-540-29664-6

<b>1. Elektrische Energie, Lebensstandard, Versorgungssicherheit</b> .....	1
<b>2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme</b> .....	9
2.1. Historische Entwicklung .....	9
2.2. Liberalisierung des Strommarkts.....	11
2.3. Elektroenergiesysteme.....	14
2.4. Verbundsysteme .....	20
<b>3. Energieressourcen – Energieverbrauch</b> .....	29
3.1. Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie.....	29
3.2. Primärenergieressourcen.....	35
3.2.1. Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch.....	39
3.2.2. Unerschöpfliche Ressourcen .....	45
<b>4. Umwandlung von Primärenergie in Kraftwerken</b> .....	51
4.1. Thermodynamische Grundbegriffe.....	54
4.1.1. Dampfgehalt .....	54
4.1.2. Entropie und T(s)-Diagramm .....	56
4.1.3. Carnot-Prozess im T(s)-Diagramm .....	60
4.1.4. Enthalpie und h(s)-Diagramm .....	63
4.2. Dampfkraftwerksprozess.....	67
4.2.1. Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungsgrad .....	67
4.2.2. Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrad .....	70
4.2.3. Exergetischer Wirkungsgrad .....	76
4.3. Dampfkraftwerkkomponenten .....	77
4.3.1. Dampferzeuger .....	77
4.3.1.1. Dampferzeugerbauarten.....	77
4.3.1.2. Feuerungen .....	82
4.3.1.3. Leistungsregelung bei Dampferzeugern.....	85
4.3.1.4. Rauchgasreinigung.....	86
4.3.2. Dampfturbinen .....	89
4.3.2.1. Bauarten.....	89
4.3.2.2. Leistungsregelung von Dampfturbinen .....	95
4.3.3. Kondensator, Kühleinrichtungen.....	99
4.3.3.1. Kondensator .....	99
4.3.3.2. Kühlarten .....	100
4.3.3.3. Abwärmenutzung.....	102
4.4. Leistungsregelung in Dampfkraftwerken .....	104
4.4.1. Festdruckbetrieb .....	104
4.4.2. Gleitdruckbetrieb.....	106
4.4.3. Modifizierter Gleitdruckbetrieb .....	106
4.4.4. Vergleichende Betrachtung .....	107
4.5. Gasturbinenkraftwerke .....	109

4.6. Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke .....	114
4.7. Kraft/Wärme-Kopplung.....	117
4.7.1. Kraft/Wärme-Kopplung in der Industrie.....	118
4.7.2. Kraft/Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung.....	120
4.8. Kernkraftwerke.....	122
4.8.1. Kernenergie .....	123
4.8.1.1. Kernfusion .....	124
4.8.1.2. Kernfission (Kernspaltung) .....	127
4.8.1.3. Brennstoffkreislauf.....	139
4.8.2. Druckwasserreaktoren (DWR).....	142
4.8.3. Siedewasserreaktoren (SWR) .....	145
4.8.4. Gasgekühlte Reaktoren .....	147
4.8.5. Brutreaktoren .....	149
4.8.6. Leistungsregelung von Kernreaktoren .....	152
4.9. Wasserkraftwerke .....	157
4.9.1. Laufwasserkraftwerke .....	158
4.9.2. Speicherkraftwerke .....	159
4.9.3. Pumpspeicherkraftwerk .....	161
4.9.4. Gezeitenkraftwerke .....	162
4.9.5. Turbinentypen.....	163
4.9.5.1. Kaplan-Turbine.....	164
4.9.5.2. Francis-Turbine .....	164
4.9.5.3. Pelton-Turbine .....	166
4.9.6. Leistungsregelung .....	167
4.10. Windkraftanlagen .....	169
4.10.1. Mechanische Leistung .....	170
4.10.2. Generatorkonzepte .....	171
4.10.3. Leistungsregelung von Windturbinen.....	173
4.11. Solarenergieanlagen .....	176
4.11.1. Photovoltaik-Anlagen.....	179
4.11.2. Solarthermische Anlagen.....	183
4.12. Brennstoffzellen .....	185
4.13. Virtuelle Kraftwerke .....	187
<b>5. Kraftwerkleittechnik .....</b>	<b>189</b>
5.1. Leittechnik-Funktionen .....	190
5.2. Verfahrens- und leittechnische Struktur eines Kraftwerksprozesses .....	192
5.3. Prozessleitsysteme .....	195
5.3.1. Verbindungsprogrammierte Prozessleitsysteme.....	195
5.3.2. Speicherprogrammierbare Prozessleitsysteme .....	197
5.3.3. Prozessleitsysteme mit Feldbus .....	206
5.3.4. Energiemanagementsysteme .....	207
5.3.4.1. Prozessnahe Anwendungen.....	208
5.3.4.2. Betriebliche Anwendungen .....	210
5.3.4.3. Business Anwendungen .....	210
5.4. Prozessvisualisierung .....	210
<b>6. Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie.....</b>	<b>215</b>
6.1. Vollpol- und Schenkelpolgeneratoren .....	216
6.2. Wirkungsweise von Synchrongeneratoren.....	219
6.2.1. Der Synchrongenerator im Leerlauf.....	219
6.2.2. Der Synchrongenerator bei Belastung (Ankerrückwirkung) .....	225

6.2.3. Einfluss der Sättigung .....	230
6.2.4. Dämpferwicklung .....	232
6.3. Besonderheiten der Schenkelpolmaschine .....	234
6.4. Leistungsgleichungen der Synchronmaschine .....	237
6.5. Stationäre Betriebszustände .....	239
6.6. Phasenschieberbetrieb .....	240
6.7. Belastungsgrenzen des Synchrongenerators .....	242
6.8. Sternpunktbehandlung von Synchrongeneratoren .....	246
6.9. Erregungsverfahren .....	249
6.9.1. Gleichstromerregemaschinen .....	249
6.9.2. Drehstromerregemaschinen .....	251
6.9.3. Statische Erregereinrichtungen .....	252
6.9.4. Dynamisches Verhalten von Erregereinrichtungen .....	253
6.10. Der Synchrongenerator im Kurzschluss .....	254
6.10.1. Generatorferner Kurzschluss .....	255
6.10.2. Generatornaher Kurzschluss .....	262
6.11. Mathematische Modelle für Synchrongeneratoren .....	267
6.11.1. Grundsätzliches dreiphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb .....	267
6.11.2. Grundsätzliches einphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb .....	271
6.11.3. Ermittlung der Mit-, Gegen- und Nullimpedanz eines Synchrongenerators .....	280
6.11.4. Die $dq0$ Transformation .....	283
6.11.4.1. Mathematische Vorgehensweise der $dq0$ Transformation .....	286
6.11.4.2. Elektrische Leistung und Drehmoment .....	297
6.11.4.3. Kopplung des Generatormodells mit dem Elektroenergiesystem .....	299
<b>7. Bereitstellung elektr. Energie auf verschiedenen Spannungsebenen ....</b>	<b>303</b>
7.1. Wirkungsweise und Ersatzschaltbild von Transformatoren .....	307
7.2. Kurzschlussersatzschaltbild .....	317
7.2.1. Ersatzschaltbilder mit umgerechneten Größen .....	317
7.2.2. Messung der Kurzschlussimpedanz .....	320
7.2.3. Berechnung der Kurzschlussimpedanz .....	322
7.2.4. Zeigerdiagramme des Kurzschlussersatzschaltbilds .....	323
7.2.5. Kurzschlussersatzschaltbild für Dreiwicklungstransformatoren .....	324
7.3. Kaskadierte und parallel geschaltete Transformatoren .....	325
7.3.1. Kaskadierte Transformatoren .....	325
7.3.2. Parallelbetrieb von Transformatoren .....	328
7.4. Spartransformatoren .....	329
7.5. Drehstromtransformatoren .....	330
7.5.1. Kernbauform .....	330
7.5.2. Schaltgruppen .....	332
7.5.2.1. Schaltgruppe $Yy0$ .....	337
7.5.2.2. Schaltgruppe $Dy5$ .....	341
7.5.2.3. Schaltgruppe $Yd5$ .....	342
7.5.2.4. Schaltgruppe $Yz5$ .....	343
7.5.3. Mit-, Gegen- und Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren .....	344
7.5.3.1. Mitimpedanz von Drehstromtransformatoren .....	344
7.5.3.2. Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren .....	345
7.6. Regeltransformatoren .....	352

7.6.1. Längsregler.....	353
7.6.1.1. Unter Last schaltbare Transformatoren.....	353
7.6.1.2. Längsregler mit Zusatztransformatoren.....	355
7.6.2. Querregler.....	356
7.6.3. Schrägregler.....	358
7.7. Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms.....	359
7.8. Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren.....	362
<b>8. Transport und Übertragung elektrischer Energie.....</b>	<b>367</b>
8.1. Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung, HDÜ.....	367
8.1.1. Transportnetze.....	368
8.1.2. Übertragungsnetze.....	371
8.1.3. Höhe der Transport- bzw. Übertragungsspannung.....	371
8.1.3.1. Übertragungsverluste.....	371
8.1.3.2. Übertragungskapazität.....	372
8.2. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ.....	375
8.3. Betriebsverhalten von Leitungen.....	379
8.3.1. Elektrisch lange und kurze Leitungen.....	379
8.3.2. Mathematisches Modell elektrisch langer Leitungen.....	382
8.3.3. Verlustlose Leitung.....	387
8.3.3.1. Ausgewählte betriebliche Spezialfälle.....	387
8.3.3.2. Leerlauf am Leitungsende.....	388
8.3.3.3. Kurzschluss am Leitungsende.....	390
8.3.3.4. Belastung mit dem Wellenwiderstand.....	392
8.3.4. Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer elektrisch langen Leitung.....	396
8.3.5. Betriebsverhalten elektrisch kurzer Leitungen.....	400
8.3.5.1. Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm.....	400
8.3.5.2. Längs- und Querspannungsabfall.....	402
8.4. Blindleistungskompensation in Hochspannungsnetzen.....	404
8.4.1. Kompensation induktiver Blindleistung.....	405
8.4.1.1. Parallel-Kompensation.....	405
8.4.1.2. Reihen-Kompensation.....	406
8.4.2. Kompensation kapazitiver Blindleistung.....	409
8.5. FACTS (Flexible AC-Transmission Systems).....	410
8.5.1. Klassifizierung von FACTS-Betriebsmitteln.....	412
8.5.2. Parallel geschaltete FACTS-Regler.....	413
8.5.2.1. Thyristor-Controlled Reactor, TCR.....	414
8.5.2.2. Thyristor-Switched Reactor, TSC.....	415
8.5.2.3. Static VA <sub>r</sub> Compensator, SVC.....	416
8.5.2.4. STATCOM.....	417
8.5.3. Seriengeschaltete FACTS-Betriebsmittel.....	419
8.5.3.1. Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC.....	419
8.5.3.2. Static Synchronous Series Compensator, SSSC.....	421
8.5.4. Kombinierte FACTS-Regler.....	422
8.5.4.1. Unified Power Flow Controller, UPFC.....	422
8.5.4.2. Dynamic Power Flow Controller, DFC.....	423
8.5.4.3. FACTS HGÜ-Kupplungen.....	424
8.5.5. FACTS-Regelung.....	425
8.6. Berechnung der Betriebsimpedanz von Mehrleitersystemen.....	427
8.6.1. Berechnung von Betriebsimpedanzen in Längsrichtung.....	427
8.6.1.1. Carson-Formel.....	431

8.6.1.2. Tabellenbücher.....	432
8.6.1.3. Messung der Impedanzen .....	432
8.6.2. Berechnung der Betriebskapazitäten .....	435
<b>9. Verteilung elektrischer Energie.....</b>	<b>443</b>
9.1. Netztopologien .....	444
9.1.1. Strahlennetze.....	444
9.1.2. Ringnetze.....	445
9.1.3. Maschennetze .....	446
9.2. 110 kV-Verteilnetze.....	448
9.3. Mittelspannungsnetze .....	451
9.3.1. Mittelspannungs-Ortsnetze .....	452
9.3.2. Mittelspannungs-Industrienetze .....	455
9.3.3. Mittelspannungsnetze in Großgebäuden bzw. Gebäudekomple-	
xen.....	459
9.3.4. Eigenbedarfsnetze .....	460
9.4. Niederspannungsnetze .....	463
9.4.1. Niederspannungs-Ortsnetze .....	463
9.4.2. Niederspannungs-Industrienetze .....	465
9.4.3. Großgebäudenetze .....	469
9.4.4. Bordnetze .....	470
9.5. Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungsnetzen.....	472
9.5.1. Netze mit geringem Stromrichteranteil.....	474
9.5.2. Netze mit hohem Stromrichteranteil.....	475
<b>10. Sternpunktbehandlung .....</b>	<b>479</b>
10.1. Netze mit isolierten Sternpunkten .....	480
10.2. Über Kompensationsreaktanzen geerdete Netze .....	484
10.3. Netze mit geerdeten Sternpunkten .....	487
10.4. Sternpunktbehandlung mit symmetrischen Komponenten .....	489
10.5. Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen .....	491
10.5.1. TN-Netze .....	493
10.5.2. TT-Netze.....	495
10.5.3. I-Netze .....	495
<b>11. Schaltanlagen.....</b>	<b>499</b>
11.1. Schaltgeräte.....	500
11.1.1. Sicherungen.....	502
11.1.2. Lastschalter .....	508
11.1.3. Leistungstrennschalter.....	510
11.1.4. Trennschalter.....	515
11.1.5. Kurzschlussstrombegrenzer .....	517
11.1.6. Schaltgeräteübersicht .....	510
11.2. Niederspannungsschaltanlagen.....	521
11.2.1. Niederspannungsschaltanlagen im Wohn-Installationsbereich....	522
11.2.2. Niederspannungsschaltanlagen bis 630 A.....	524
11.2.3. Niederspannungsschaltanlagen über 630 A .....	525
11.3. Mittelspannungsschaltanlagen.....	528
11.3.1. Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung .....	532
11.3.2. Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung.....	536
11.4. Hochspannungsschaltanlagen .....	537
11.4.1. Freiluftschaltanlagen.....	538

11.4.2. Gekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Innenraumaufstellungen .....	540
11.4.3. Topologie von Hochspannungsschaltanlagen .....	543
11.5. Umspannstationen .....	549
11.6. Anforderungen an Schaltanlagen.....	552
<b>12. Netzschutz .....</b>	<b>555</b>
12.1. Schutztechnik-Grundlagen .....	556
12.2. Schutzgerätetechnik.....	561
12.3. Schutzprinzipien und –kriterien .....	564
12.3.1. Überstromschutz.....	564
12.3.1.1. Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais).....	565
12.3.1.2. Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais) .....	566
12.3.1.3. UMZ-Schutz mit Richtungskriterium .....	568
12.3.2. Distanzschutz .....	569
12.3.3. Vergleichsschutz.....	574
12.3.3.1. Messgrößenvergleichsschutz .....	574
12.3.3.2. Phasenvergleichsschutz.....	576
12.3.3.3. Signalvergleichsschutz .....	576
12.3.4. Erdschlussmeldung .....	577
12.4. Schutztechnik aus Sicht einzelner Betriebsmittel.....	578
12.4.1. Leitungsschutz.....	578
12.4.1.1. Strahlennetze .....	579
12.4.1.2. Ringleitungen und Maschennetze .....	579
12.4.2. Transformatorschutz.....	580
12.4.2.1. Transformator-differentialschutz .....	580
12.4.2.2. Buchholzrelais .....	581
12.4.3. Generatorschutz .....	582
12.4.4. Blockschutz.....	583
12.4.5. Sammelschienenschutz.....	586
12.4.6. Schaltanlagen-schutz.....	587
12.5. Schutzkoordinaten .....	588
12.5.1. Stromstaffelung im Strahlennetz.....	589
12.5.2. Zeitstaffelung im Strahlennetz .....	590
12.5.3. Schutzkoordinaten in Ring- und Maschennetzen mit UMZ-Schutz.....	592
12.5.4. Zeitstaffelung mit Distanzrelais .....	593
12.6. ANSI Schutz Codes .....	595
12.7. Schutz in Niederspannungsnetzen .....	596
12.7.1. Nullung (TN-Netze).....	599
12.7.2. Schutzerdung (TT-Netze) .....	602
12.7.3. Schutzleitungssystem (IT-Netze).....	603
12.7.4. Fehlerstrom-(FI)-Schutzschaltung .....	604
12.7.5. Fehler-spannungs-(FU)-Schutzschaltung .....	605
12.7.6. Schutztrennung.....	606
12.7.7. Schutzisolation .....	607
<b>13. Frequenz- und Spannungsregelung .....</b>	<b>611</b>
13.1. Frequenzregelung .....	616
13.1.1. Alleinbetrieb .....	616
13.1.2. Parallelbetrieb.....	619
13.1.3. Netzfrequenzregler .....	623

13.1.4. Verbundbetrieb .....	625
13.1.5. Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Frequenzregelung.....	629
13.2. Spannungsregelung.....	636
13.2.1. Spannungsqualität.....	636
13.2.2. Spannungsregelung in Übertragungs- und Transportnetzen .....	637
13.2.3. Stellglieder als Spannungs-/Blindleistungsregelung .....	638
13.2.4. Spannungs-/Blindleistungsoptimierung.....	639
13.3. Begrenzungsregelungen.....	640
<b>14. Netzleittechnik .....</b>	<b>645</b>
14.1. Netzleitstellen.....	649
14.1.1. SCADA-Funktionen .....	649
14.1.2. Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen HEO .....	653
14.1.3. Rechnerstruktur und Datenbanksystem.....	654
14.1.4. Schnittstellen zu anderen Systemen.....	656
14.2. Stationsleittechnik .....	657
14.3. Feldleittechnik .....	660
14.4. Fernwirktechnik.....	661
14.5. Tonfrequenz- und Funkrundsteuerung.....	663
14.5.1. Tonfrequenzrundsteuerung.....	663
14.5.2. Funkrundsteuerung.....	665
<b>15. Netzbetrieb .....</b>	<b>667</b>
15.1. Netzführung .....	668
15.1.1. Transportnetzführung in der klassischen Stromversorgung, so genannte Lastverteilung.....	671
15.1.1.1. Lastprognose.....	672
15.1.1.2. Lastverteilung .....	678
15.1.1.3. Kraftwerksauswahl .....	681
15.1.1.4. Netzführung in der Schaltwarte .....	682
15.1.2. Transportnetzführung im liberalisierten Strommarkt, so genannte Systemführung.....	684
15.1.3. EMS-Funktionen .....	689
15.1.4. Netzbetrieb in Verteilnetzen.....	693
15.2. Netzbereitstellung .....	695
<b>16. Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb .....</b>	<b>701</b>
16.1. Leistungsflussrechnung .....	702
16.1.1. Mathematisches Netzmodell mit Admittanzmatrix .....	703
16.1.1.1. Vierleiternetze (Netze mit Sternpunktleiter) .....	706
16.1.1.2. Dreileiter-Drehstromnetze .....	709
16.1.2. Hybridmatrix $\underline{H}$ .....	711
16.1.3. Impedanzmatrix .....	714
16.1.4. Berechnung der Knotenspannung .....	715
16.1.5. Berechnung der Knotenspannung bei vorgegebenen Knotenleistungen (Leistungsflussrechnung) .....	716
16.1.6. Behandlung unterschiedlicher Netzknoten .....	719
16.2. Varianten der Leistungsflussrechnung.....	721
16.2.1. Schnelle Leistungsflussrechnung .....	721
16.2.2. Optimale Leistungsflussrechnung.....	722
16.2.3. Probabilistische Leistungsflussrechnung .....	722

16.3. Manuelle Berechnung von Leitungsströmen in kleinen Netzen.....	723
16.3.1. Die an einem Ende belastete Leitung .....	724
16.3.2. Die mehrfach belastete Leitung .....	727
16.3.3. Die beiderseitig gespeiste Leitung, gleiche Versorgungsspannung.....	730
16.3.4. Die beiderseitig gespeiste Leitung bei unterschiedlichen Versorgungsspannung .....	731
16.3.5. Vereinfachungen in der Berechnung .....	732
16.3.6. Berechnung der Stromverteilung in Netzen .....	733
16.3.6.1. Strahlennetze .....	733
16.3.6.2. Ringnetze .....	734
16.3.6.3. Maschennetze .....	735
<b>17. Kurzschlussstromberechnung.....</b>	<b>743</b>
17.1. Begriffswelt und Methodik der Kurzschlussstromberechnung.....	745
17.1.1. Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I_k''$ .....	746
17.1.2. Berechnung aus $I_k''$ abgeleiteter Kurzschlussstromgrößen .....	747
17.1.2.1. Berechnung des Stoßkurzschlussstroms $i_p$ .....	747
17.1.2.2. Ausschaltwechselstrom $I_b$ .....	748
17.1.2.3. Dauerkurzschlussstrom $I_k$ .....	748
17.1.2.4. Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom $I_{th}$ .....	749
17.2. Der symmetrische Kurzschluss .....	749
17.2.1. Berechnung von $I_k''$ bei einfacher Generatorspeisung .....	750
17.2.2. Berechnung von $I_k''$ bei Netzeinspeisung .....	756
17.2.3. Berechnung von $I_k''$ bei mehrfacher Einspeisung .....	760
17.2.3.1. Das Verfahren der Ersatzspannungsquelle .....	760
17.2.3.2. Rechenbeispiel zum Verfahren der Ersatzspannungsquelle .....	762
17.3. Unsymmetrische Fehler .....	768
17.3.1. Berechnungsformeln für unsymmetrische Fehler .....	771
17.3.2. Berechnungsbeispiel „Unsymmetrische Kurzschlussströme“ .....	772
17.3.2.1. Aufstellen der Ersatzschaltbilder des Mit-, Gegen- und Nullsystems.....	773
17.3.3. Berechnung der Mit- und Gegenimpedanzen .....	774
17.3.4. Berechnung der Nullimpedanzen.....	774
17.3.5. Berechnung der finalen Impedanzen $Z_+$ , $Z_-$ und $Z_0$ .....	774
17.3.5.1. Einpoliger Kurzschluss .....	775
17.3.5.2. Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung .....	775
17.3.5.3. Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung .....	776
17.4. Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel .....	777
17.4.1. Generatoren.....	778
17.4.2. Netzeinspeisung .....	779
17.4.3. Transformatoren .....	780
17.4.4. Kraftwerksblöcke .....	781
17.4.5. Freileitungen und Kabel.....	782
17.4.6. Motoren .....	782
17.4.7. Sonstige Betriebsmittel .....	783
17.4.8. Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen .....	784
17.5. Kurzschlussstromberechnung mit bezogenen Größen .....	784
17.5.1. Das per-unit-Verfahren .....	785
17.5.2. Das %/MVA-Verfahren .....	786
17.6. Digitale Kurzschlussstromberechnung.....	788

17.6.1. Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I_k''$ aus der Knotenadmittanzmatrix .....	788
<b>18. Stabilität von Elektroenergiesystemen</b> .....	791
18.1. Polradwinkelstabilität.....	793
18.1.1. Leistungs-/Polradwinkelkurve .....	794
18.1.2. Bewegungsgleichung eines Synchrongenerators .....	796
18.1.3. Kleinsignalstabilität .....	800
18.1.3.1. Graphische Untersuchung der Kleinsignalstabilität .....	801
18.1.3.2. Untersuchung der Kleinsignalstabilität anhand von Über- tragungsfunktionen.....	804
18.1.3.3. Methode der Zustandsvariablen .....	806
18.1.4. Großsignalstabilität .....	807
18.1.4.1. Numerische Integration des Bewegungsdifferentialgleichungssystems .....	808
18.1.4.2. Untersuchung der Großsignalstabilität mit der Methode der Zustandsvariablen.....	810
18.1.4.3. Ljapunov-Verfahren .....	811
18.2. Spannungsstabilität.....	820
18.3. Netzzusammenbrüche .....	824
<b>19. Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen</b> .....	831
19.1. Energiewirtschaftsgesetz .....	831
19.2. Liberalisierung der Strommärkte .....	832
19.2.1. Netzzugang im deutschen Strommarkt.....	834
19.2.2. Bilanzkreise .....	836
19.3. Stromhandel.....	841
19.4. CO <sub>2</sub> Emissionshandel .....	845
19.5. Stromkosten und Strompreise.....	845
19.5.1. Kalkulation der Stromkosten.....	846
19.5.1.1. Stromerzeugungskosten.....	847
19.5.1.2. Ermittlung von Nutzungsentgelten.....	850
19.5.2. Kalkulation der Strompreise.....	852
19.5.3. Stromausfallkosten .....	855
19.6. Methoden der Investitionsrechnung .....	857
19.7. Asset Management .....	860
<b>A. Rechnen mit komplexen Größen</b> .....	865
A.1. Komplexe Zeigerdarstellung .....	865
A.1.1. Komplexe Darstellung von Zweipolen .....	867
A.1.2. Zählpfeilsysteme .....	868
A.1.3. Zeigerdiagramme .....	870
A.1.4. Wechselstromleistung .....	874
<b>B. Rechnen in Drehstromsystemen</b> .....	877
B.1. Begriffe und Größen in Drehstromsystemen .....	877
B.1.1. Spannungen und Ströme in Drehstromnetzen .....	877
B.1.2. Spannungen und Ströme von Drehstromerzeugern und –ver- brauchern.....	879
B.2. Drehstromleistung elektrischer Betriebsmittel.....	881
B.2.1. Drehstromverbraucher am Drehstromnetz .....	883
B.2.2. Stern-Dreieck-Anlaufschaltung.....	885
<b>C. Rechnen mit bezogenen Größen</b> .....	887

C.1. Referenzgrößen .....	888
C.1.1. Bezogene Spannungen.....	889
C.1.2. Bezogene Leistung .....	890
C.1.3. Bezogene Ströme .....	890
C.1.4. Bezogene Impedanzen .....	891
C.2. Rechnen mit pu-Größen.....	893
<b>D. Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder .....</b>	<b>899</b>
D.1. Induktionsgesetz, induzierte und selbstinduzierte Spannung.....	899
D.1.1. Induzierte Spannung .....	899
D.1.2. Selbstinduzierte Spannung .....	902
D.2. Windungsfluss, Spulenfluss und Flussverkettung einer Wicklung .....	902
D.3. Magnetische Streuung ( $X = X_h + X_\sigma$ ).....	905
<b>E. Unsymmetrische Kurzschlussströme .....</b>	<b>907</b>
E.1. Die Methode der symmetrischen Komponenten.....	907
E.2. Herleitung von Berechnungsformeln für unsymmetrische Kurz- schlussströme.....	911
E.2.1. Berechnungsformel für einpolige Kurzschlussströme.....	912
E.2.2. Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse ohne Erdbe- rührung.....	913
E.3. Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung.....	916
<b>F. Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug).....</b>	<b>921</b>
<b>G. Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme .....</b>	<b>923</b>
G.1. Direkte Verfahren .....	923
G.1.1. Gauß'sches Eliminationsverfahren .....	924
G.1.2. Gauß-Jordan-Algorithmus.....	928
G.1.3. Dreiecksfaktorisierung .....	928
G.1.4. Optimal geordnete Dreiecksfaktorisierung .....	932
G.2. Iterationsverfahren .....	932
G.2.1. Stromiterationsverfahren.....	932
G.2.2. Jacobi-Verfahren (Gesamtschrittverfahren).....	933
G.2.3. Gauß-Seidel-Verfahren (Einzelschrittverfahren).....	934
G.2.4. Newton-Ralphson-Verfahren.....	935
<b>H. Methode der Zustandsvariablen.....</b>	<b>939</b>
<b>I. IEEE Engineering Ethics Code.....</b>	<b>945</b>