

Adolf J. Schwab

Elektroenergiesysteme

Erzeugung, Übertragung und Verteilung
elektrischer Energie

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Eine Einführung

Unter anfänglicher Mitwirkung von:

Stefan Börninck, Markus Hemmer,
Bernd Hoferer, Yannick Julliard,
Rajiv Kumar, Carsten Meinecke,
Michael Merkle, Ricard Petranovic

Springer Vieweg

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 Enrgiewende	21
2.2 Elektroenergiesysteme	30
2.3 Verbundsysteme	37
3. Energieressourcen Energieverbrauch	49
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie	49
3.2 Primärenergieressourcen	55
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch . .	58
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen	66
3.2.3 Energiefluss	71
3.3 Klimawandel	73
3.4 Energieeffizienz	76
4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken	79
4.1 Thermodynamische Grundbegriffe	82
4.1.1 Dampfgehalt	83
4.1.2 Entropie, T(S)-Diagramm	85
4.1.3 Carnot-Prozess und thermischer Wirkungsgrad	88
4.1.4 Arbeitsfluid Wasser Dampf im T(s)-Diagramm	91
4.1.5 Enthalpie, h(s)-Diagramm	93
4.2 Dampfkraftwerksprozess	97
4.2.1 Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungsgrad	97
4.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads	100
4.2.2.1 Zwischenüberhitzung	101

Inhaltsverzeichnis

4.2.2.2	Regenerative Speisewasservorwärmung	102
4.2.2.3	Kühlmitteltemperatur	104
4.2.2.4	Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks	104
4.2.3	Exergetischer Wirkungsgrad	109
4.3	Dampfkraftwerkkomponenten	110
4.3.1	Dampferzeuger	111
4.3.1.1	Dampferzeugerbauarten	111
4.3.1.2	Feuerungen	116
4.3.1.3	Leistungsregelung bei Dampferzeugern	118
4.3.1.4	Rauchgasreinigung	120
4.3.2	Dampfturbinen	125
4.3.2.1	Bauarten	125
4.3.2.2	Leistungsregelung von Dampfturbinen	131
4.3.3	Kondensator, Kühleinrichtungen	134
4.3.3.1	Kondensator	134
4.3.3.2	Kühlarten	136
4.3.3.3	Abwärmenutzung	138
4.4	Leistungsregelung in Dampfkraftwerken	140
4.4.1	Festdruckbetrieb	140
4.4.2	Gleitdruckbetrieb	141
4.4.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	142
4.4.4	Vergleichende Betrachtung	143
4.5	Gasturbinenkraftwerke	144
4.6	Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD)	150
4.7	Kraft-Wärme-Kopplung	153
4.7.1	Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie	153
4.7.2	Kraft-Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung	155
	Stromerzeugung in Kernkraftwerken	159
5.1	Kernenergie	162
5.1.1	Kernfusion	163
5.1.2	Kernfission (Kernspaltung)	166
5.1.3	Nachzerfallswärme	177
5.1.4	Brennstoffkreislauf	181
5.2	Druckwasserreaktoren (DWR)	185
5.3	Siedewasserreaktoren (SWR)	188
5.4	Gasgekühlte Reaktoren	190
5.5	Brutreaktoren	192

5.6	Kernkraftwerke der Generation IV	195
5.7	Leistungsregelung von Kernreaktoren	196
5.7.1	Leistungsregelung von Druckwasserreaktoren . .	199
5.7.2	Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren . .	201
5.7.3	Leistungsregelung von gasgekühlten Reaktoren	202
5.7.4	Leistungsregelung von natriumgekühlten Reaktoren	202
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraftwerke	203
6.	Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien	207
6.1	Wasserkraftwerke	208
6.1.1	Laufwasserkraftwerke	209
6.1.2	Speicherkraftwerke	210
6.1.3	Pumpspeicherkraftwerke	212
6.1.4	Gezeitenkraftwerke	214
6.1.5	Turbinentypen	216
6.1.5.1	Kaplan-Turbine	217
6.1.5.2	Francis-Turbine	218
6.1.5.3	Pelton-Turbine	219
6.1.6	Leistungsregelung	220
6.2	Windkraftanlagen	222
6.2.1	Mechanische Leistung	223
6.2.2	Generatorkonzepte	224
6.2.3	Leistungsregelung von Windturbinen	226
6.2.4	Einbindung von Windkraftanlagen in die Netze der öffentlichen Stromversorgung	228
6.2.5	Stand der Technik und Ausblick	229
6.3	Solarenergieanlagen	234
6.3.1	Direkte Nutzung der Solarenergie	237
6.3.1.1	Photovoltaik-Anlagen	237
6.3.1.2	Solarthermische Anlagen	244
6.4	Biomasse - Kraftwerke	248
6.5	Geothermische Stromerzeugung	251
6.6	Brennstoffzellen	254
6.7	Virtuelle Kraftwerke	256
6.8	Speicher elektrischer Energie	257
6.8.1	Kurzzeitspeicher	259
6.8.1.1	Pumpspeicherkraftwerke	259

6.8.1.2	Druckgasspeicher-Kraftwerke	260
6.8.1.3	Wiederaufladbare Batterien	261
6.8.1.4	Wasserstofftechnologie	266
6.8.1.5	Wärmespeicher	268
6.8.1.6	Schwungradspeicher	269
6.8.1.7	Supraleitende magnetische Energiespeicher	269
6.8.2	Langzeitspeicher	270
6.8.2.1	Power to Gas	270
6.8.2/2	Innereuropäische Kooperation	271
6.8.3	Back-Up Versorgung	271
7.	Kraftwerkleittechnik	275
7.1	Leittechnik-Funktionen	276
7.2	Verfahrens- und leittechnische Struktur eines Kraftwerkprozesses	278
7.3	Prozessleitsysteme	281
7.3.1	Verbindungsprogrammierte Prozessleitsysteme	281
7.3.2	Speicherprogrammierbare Prozessleitsysteme. .	283
7.3.3	Prozessleitsysteme mit Feldbus	292
7.3.4	Energiemanagementsysteme	293
7.3.4.1	Prozessnahe Anwendungen	294
7.3.4.2	Betriebliche Anwendungen	296
7.3.4.3	Business Anwendungen	296
7.3.4.4	Fernwartung	296
7.4	Prozessvisualisierung	297
7.5	Energiemanagementsysteme der Generation IV	299
8.	Umwandlung mechanischer Energie mittels Synchron- generatoren	305
8.1	Vollpol- und Schenkelpolgeneratoren	306
8.2	Wirkungsweise von Synchrongeneratoren	309
8.2.1	Der Synchrongenerator im Leerlauf	309
8.2.2	Der Synchrongenerator bei Belastung	315
8.2.3	Einfluss der Sättigung	320
8.2.4	Dämpferwicklung	322
8.3	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	324
8.4	Leistungsgleichungen der Synchronmaschine	327
8.5	Stationäre Betriebszustände	329
8.6	Phasenschieberbetrieb	330

8.7	Belastungsgrenzen des Synchrongenerators	332
8.8	Sternpunktbehandlung bei Synchrongeneratoren	336
8.9	Erregungsverfahren für Synchrongeneratoren	339
8.9.1	Gleichstromerregemaschinen	339
8.9.2	Drehstromerregemaschinen	341
8.9.3	Statische Erregereinrichtungen	342
8.9.4	Dynamisches Verhalten von Erregereinrichtungen	343
8.10	Der Synchrongenerator im Kurzschluss	344
8.10.1	Generatorferner Kurzschluss	345
8.10.2	Generator-naher Kurzschluss	352
8.11	Mathematische Modelle für Synchrongeneratoren	357
8.11.1	Dreiphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb	357
8.11.2	Einphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb	361
8.11.3	Ermittlung der Mit-, Gegen- und Nullimpedanz eines Synchrongenerators	370
8.11.4	Die dqO -Transformation	373
	8.11.4.1 Mathematische Vorgeliensweise	376
	8.11.4.2 Elektrische Leistung und Drehmoment	387
	8.11.4.3 Kopplung des Generatormodells mit dem Elektroenergiesystem	389
8.12	Virtueller Synchrongenerator	390

9. Bereitstellung elektrischer Energie auf verschiedenen Spannungsebenen 393

9.1	Wirkungsweise und Ersatzschaltbild von Transformatoren	397
9.2	Kurzschlussersatzschaltbild	407
9.2.1	Ersatzschaltbilder mit umgerechneten Größen	407
9.2.2	Messung der Kurzschlussimpedanz	410
9.2.3	Berechnung der Kurzschlussimpedanz	412
9.2.4	Zeigerdiagramme des Kurzschlussersatzschaltbilds	413
9.2.5	Kurzschlussersatzschaltbild für Dreiwicklungs- transformatoren	414
9.3	Kaskadierte und parallel geschaltete Transformatoren	415
9.3.1	Kaskadierte Transformatoren	415

9.3.2	Parallelbetrieb von Transformatoren	418
9.4	Spartransformatoren	419
9.5	Drehstromtransformatoren	420
9.5.1	Kernbauformen	420
9.5.2	Schaltgruppen	422
9.5.2.1	Schaltgruppe Yyü	427
9.5.2.2	Schaltgruppe Dy5	431
9.5.2.3	Schaltgruppe Yd5	432
9.5.2.4	Schaltgruppe Yz5	433
9.5.3	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren	434
9.5.3.1	Mitimpedanz von Drehstromtransformatoren	434
9.5.3.2	Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren	435
9.6	Regeltransformatoren	442
9.6.1	Längsregler	443
9.6.1.1	Unter Last schaltbare Transformatoren	443
9.6.1.2	Längsregler mit Zusatztransformatoren	445
9.6.2	Querregler	447
9.6.3	Schrägregler	448
9.7	Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms	448
9.8	Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren	451
10.	Transport und Übertragung elektrischer Energie . . .	457
10.1	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung, HDÜ	457
10.1.1	Transportnetze	458
10.1.2	Hochspannungsnetze	461
10.1.3	Höhe der Netzspannung	461
10.1.3.1	Übertragungsverluste	461
10.1.3.2	Übertragungskapazität	462
10.2	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ	465
10.2.1	Netzgeführte HGÜ mit Thyristoren	466
10.2.2	Selbstgeführte HGÜ mit IGBT-Leistungshalbleitern	469
10.2.3	HGÜ-Leistungsschalter	471
10.3	Betriebsverhalten von Leitungen	473
10.3.1	Elektrisch lange und kurze Leitungen	473

10.3.2	Mathematisches Modell elektrisch langer Leitungen	476
10.3.3	Verlustlose Leitung	481
10.3.3.1	Ausgewählte betriebliche Spezialfälle	481
10.3.3.2	Leerlauf am Leitungsende	482
10.3.3.3	Kurzschluss am Leitungsende	484
10.3.3.4	Belastung mit dem Wellenwiderstand	486
10.3.4	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer elektrisch langen Leitung	490
10.3.5	Betriebsverhalten elektrisch kurzer Leitungen	494
10.3.5.1	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	494
10.3.5.2	Längs- und Querspannungsabfall...	496
10.4	Blindleistungskompensation in Hochspannungsnetzen	498
10.4.1	Kompensation induktiver Blindleistung	499
10.4.1.1	Parallel-Kompensation	499
10.4.1.2	Reihen-Kompensation	500
10.4.2	Kompensation kapazitiver Blindleistung	503
10.5	FACTS (Flexible AC-Transmission Systems)	504
10.5.1	Klassifizierung von FACTS-Betriebsmitteln ...	506
10.5.2	Parallel geschaltete FACTS-Regler	507
10.5.2.1	Thyristor-Controlled Reactor, TCR	508
10.5.2.2	Thyristor-Switched Capacitor, TSC	509
10.5.2.3	Static VA _r Compensator, SVC	510
10.5.2.4	STATCOM	511
10.5.3	Seriengeschaltete FACTS-Betriebsmittel	513
10.5.3.1	Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC	513
10.5.3.2	Static Synchronous Series Compensator, SSSC	515
10.5.4	Kombinierte FACTS-Regler	516
10.5.4.1	Unified Power Flow Controller, UPFC	516
10.5.4.2	Dynamic Power Flow Controller, DFC	517
10.5.4.3	FACTS HGÜ-Kupplungen	518
10.5.5	FACTS-Regelung	519
10.6	Betriebsimpedanzen von Mehrleitersystemen	521
10.6.1	Berechnung von Betriebsimpedanzen in Längsrichtung	521
10.6.1.1	Carson-Formel	525
10.6.1.2	Tabellenbücher	526

10.6.1.3	Messung der Impedanzen	526
10.6.2	Berechnung der Betriebskapazitäten	529
11.	Verteilung elektrischer Energie	537
11.1	Netztopologien	538
11.1.1	Strahlennotze	539
11.1.2	Ringnetze	540
11.1.3	Maschennetze	541
11.2	110 kV-Verteilnetze	542
11.3	Mittelspannungsnetze	545
11.3.1	Mittelspannungs-Ortsnetze	546
11.3.2	Mittelspannungs-Industrienetze	549
11.3.3	Mittelspannungsnetze in Großgebäuden bzw. Gebäudekomplexen	553
11.3.4	Eigenbedarfsnetze	554
11.4	Niederspannungsnetze	557
11.4.1	Niederspannungs-Ortsnetze	557
11.4.2	Niederspannungs-Industrienetze	559
11.4.3	Großgebäudenetze	563
11.4.4	Bordnetze	564
11.5	Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungs- netzen	566
11.5.1	Netze mit geringem Stromrichteranteil	568
11.5.2	Netze mit hohem Stromrichteranteil	569
11.6	Smart Grids	570
11.6.1	Smart Metering	573
11.6.2	Smart Homes	576
11.6.3	Smart Cities	576
11.6.4	Kommunikationswege für Smart Grids	577
12.	Sternpunktbehandlung	581
12.1	Netze mit isolierten Sternpunkten	582
12.2	Über Kompensationsreaktanzen geerdete Netze	587
12.3	Netze mit geerdeten Sternpunkten	589
12.4	Sternpunktbehandlung mit symmetrischen Kompo- nenten	591
12.5	Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen	593
12.5.1	TN-Netze	595
12.5.2	TT-Netze	596
12.5.3	I-Netz	597

13. Schaltanlagen	601
13.1 Schaltgeräte	603
13.1.1 Sicherungen	605
13.1.2 Lastschalter	611
13.1.3 Leistungsschalter	613
13.1.4 Trennschalter	618
13.1.5 Kurzschlussstrombegrenzer	620
13.1.6 Schaltgeräteübersicht	623
13.2 Niederspannungsschaltanlagen	624
13.2.1 Niederspannungsschaltanlagen im Wohn-Installationsbereich	625
13.2.2 Niederspannungsschaltanlagen bis 630 A	627
13.2.3 Niederspannungsschaltanlagen über 630 A	628
13.3 Mittelspannungsschaltanlagen	631
13.3.1 Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung	635
13.3/2 Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung	639
13.4 Hochspannungsschaltanlagen	640
13.4.1 Freiluftschaltanlagen	641
13.4.2 Gekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Innenraumaufstellung	643
13.4.3 Topologie von Hochspannungsschaltanlagen . . .	646
13.5 Umspannstationen	652
13.6 Anforderungen an Schaltanlagen	655
14. Netzschutz	659
14.1 Schutztechnik-Grundlagen	660
14.2 Schutzgerätetechnik	665
14.3 Schutzprinzipien und -kriterien	668
14.3.1 Überstromschutz	668
14.3.1.1 Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais)	669
14.3.1.2 Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais)	670
14.3.1.3 UMZ-Schutz mit Richtungskriterium	672
14.3.2 Distanzschutz	673
14.3.3 Vergleichsschutz	678
14.3.3.1 Messgrößenvergleichsschutz	678

14.3.3.2	Phasenvergleichsschliutz	680
14.3.3.3	Signalvergleichsschutz	680
14.3.4	Erdschlussnieldung	681
14.4	Schutztechnik aus Sicht einzelner Betriebsmittel	682
14.4.1	Leitungsschutz	682
14.4.1.1	Strahlennetze	683
14.4.1.2	Ringleitungen und Mascheimetze ...	683
14.4.2	Transformatorschutz	684
14.4.2.1	Traiisformatordifferenzialschutz	684
14.4.2.2	Buchholzrelais	685
14.4.3	Generatorschutz	686
14.4.4	Blockschutz	687
14.4.5	Sarmnellschienenschutz	690
14.4.6	Schaltanlagenchutz	691
14.5	Schutzkoordination	692
14.5.1	Stromstaffelung im Strahlennetz	693
14.5.2	Zeitstaffelung im Strahlennetz	694
14.5.3	Schutzkoordination in Ring- und Maschennet- zen mit UMZ-Schutz	696
14.5.4	Zeitstaffelung mit Distanzrelais	697
14.6	ANSI Schutz Codes	699
14.7	Schutz in Niederspainmiigsnetzeii	700
14.7.1	Nullung (TN-Netze)	703
14.7.2	Schutzerdung (TT-Netze)	706
14.7.3	Schutzleitungssystem (IT-Netze)	707
14.7.4	Fehlerstrom-(FI)-Schutzschaltmig	708
14.7.5	Fehlerspannungs-(FU)-Schutzscialtung	709
14.7.6	Schutztrennung	710
14.7.7	Schutzisolierung	711
15.	Frequenz- und Spannungsregelung	715
15.1	Frequenzregelung	720
15.1.1	Alleinbetrieb	720
15.1.2	Parallelbetrieb	723
15.1.3	Netzfrequenzregler	727
15.1.4	Verbundbetrieb	729
15.1.5	Dynamisches Verhalten der Frequenzregelung .	733
15.2	Spannungsregelung	740
15.2.1	Spannungsqualität	740

15.2.2	Spannungsregelung in Übertragungs- und Transportnetzen	741
15.2.3	Stellglieder der Spannungs-/Blindleistungsregelung	742
15.2.4	Spannungs-/Blindleistungsoptimierung	743
15.3	Begrenzungsregelungen	744
16.	Netzleittechnik	749
16.1	Netzleitstellen	753
16.1.1	SCADA-Funktionen	753
16.1.2	Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen HEO	757
16.1.3	Rechnerstruktur und Datenbanksystem	758
16.1.4	Schnittstellen zu anderen Systemen	760
16.2	Stationsleittechnik	761
16.3	Feldleittechnik	764
16.4	Fernwirktechnik	765
16.5	Tonfrequenz- und Funkrundsteuerung	767
16.5.1	Tonfrequenzrundsteuerung	767
16.5.2	Funkrundsteuerung	769
17.	Netzbetrieb	771
17.1	Netzführung	772
17.1.1	Transportnetzführung in der klassischen Stromversorgung, so genannte Lastverteilung	775
17.1.1.1	Lastprognose	776
17.1.1.2	Lastverteilung	782
17.1.1.3	Kraftwerksauswahl, Order of Merit . .	785
17.1.1.4	Netzführung in der Schaltwarte	787
17.1.2	Transportnetzführung im liberalisierten Strommarkt, so genannte Systemführung	790
17.1.3	EMS-Funktionen	796
17.1.4	Netzbetrieb in Verteilnetzen	800
17.2	Netzbereitstellung	802
18.	Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb	807
18.1	Leistungsflussrechnung	808
18.1.1	Mathematisches Netzmodell mit Admittanzmatrix	809

18.1.1.1	Vierleiternetze (Netze mit Sternpunkt- leiter)	812
18.1.1.2	Dreileiter-Drehstromnetze	815
18.1.2	Hybridmatrix $H_{\underline{}}$	817
18.1.3	Impedanzmatrix	820
18.1.4	Berechnung der Knotenspannungen und Lei- tungsströme bei vorgegebenen Lastströmen ...	821
18.1.5	Berechnung der Knotenspannungen bei vorge- gebenen Knotenleistungen	822
18.1.6	Behandlung unterschiedlicher Netzknoten	825
18.2	Varianten der Leistungsflussrechnung	827
18.2.1	Schnelle Leistungsflussrechnung	827
18.2.2	Optimale Leistungsflussrechnung	828
18.2.3	Probabilistische Leistungsflussrechnung	828
18.3	Manuelle Berechnung von Leistungsströmen in kleinen Netzen	829
18.3.1	Die an einem Ende belastete Leitung	830
18.3.2	Die mehrfach belastete Leitung	833
18.3.3	Die beidseitig gespeiste Leitung, gleiche Versorgungsspannung	836
18.3.4	Die beidseitig gespeiste Leitung bei unterschied- lichen Versorgungsspannungen	837
18.3.5	Vereinfachungen in der Berechnung	838
18.3.6	Berechnung der Stromverteilung in Netzen ...	839
18.3.6.1	Strahlennetze	839
18.3.6.2	Ringnetze	840
18.3.6.3	Maschennetze	841
19.	Kurzschlussstromberechnung	849
19.1	Begriffswelt und Methodik der Kurzschlussstromberech- nung	851
19.1.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms	852
19.1.2	Berechnung aus I'' abgeleiteter Kurzschluss- stromgrößen	853
19.1.2.1	Stoßkurzschlussstrom i_p	853
19.1.2.2	Ausschaltwechselstrom I_5	854
19.1.2.3	Dauerkurzschlussstrom I_k	854

19.1.2.4	Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom	
	<i>I_{th}</i>	875
19.2	Der symmetrische Kurzschluss	855
19.2.1	Berechnung von I'' bei einfacher Generator- speisung	856
19.2.2	Berechnung von I' bei Netzeinspeisung	862
19.2.3	Berechnung von I'' bei mehrfacher Einspeisung	866
19.2.3.1	Das Verfahren der Ersatzspannungs- quelle	866
19.2.3.2	Rechenbeispiel zum Verfahren der Er- satzspannungsquelle	868
19.3	Unsymmetrische Fehler	874
19.3.1	Berechnungsformeln für unsymmetrische Fehler	877
19.3.2	Berechnungsbeispiel „Uasymmetrische Kurz- schlussströme“	878
19.3.2.1	Aufstellen der Ersatzschaltbilder des Mit-, Gegen- und Nullsystems	879
19.3.3	Berechnung der Mit- und Gegenimpedanzen	880
19.3.4	Berechnung der Nullimpedanzen	880
19.3.5	Berechnung der finalen Impedanzen Z_+ , Z_- und Z_0	880
19.3.5.1	Einpoliger Kurzschluss	881
19.3.5.2	Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdbe- rührung	881
19.3.5.3	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdbe- rührung	882
19.4	Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel . . .	883
19.4.1	Generatoren	884
19.4.2	Netzeinspeisung	885
19.4.3	Transformatoren	886
19.4.4	Kraftwerksblöcke	887
19.4.5	Freileitungen und Kabel	888
19.4.6	Motoren	888
19.4.7	Sonstige Betriebsmittel	889
19.4.8	Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen	890
19.5	Kurzschlussstromberechnung mit bezogenen Größen . . .	890
19.5.1	Das per-unit-Verfahren	891
19.5.2	Das %/MVA Verfahren	892
19.6	Digitale Kurzschlussstromberechnung	894

19.6.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I'_{f} aus der Knotenadmittanzmatrix ...	894
20.	Stabilität von Elektroenergiesystemen	897
20.1	Polradwinkelstabilität	899
20.1.1	Leistungs-/Polradwinkelkurve	900
20.1.2	Bewegungsgleichung eines Synchrongenerators	902
20.1.3	Kleinsignalstabilität	906
20.1.3.1	Grafische Untersuchung der Kleinsignalstabilität	907
20.1.3/2	Untersuchung der Kleinsignalstabilität mit Übertragungsfunktionen	910
20.1.3.3	Methode der Zustandsvariablen	912
20.1.4	Großsignalstabilität	913
20.1.4.1	Numerische Integration des Bewegungsdifferenzialgleichungssystems	914
20.1.4.2	Großsignalstabilität mit der Methode der Zustandsvariablen	916
20.1.4.3	Ljapunov-Verfahren	917
20.2	Spannungsstabilität	926
20.3	Netzzusammenbrüche	930
21.	Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen.	937
21.1	Versorgungsqualität	937
21.2	Strommarktliberalisierung	941
21.3	Netzzugang im deutschen Strommarkt	944
21 /1	Stromhandel	946
21.4.1	Großhandelsmärkte	949
21.4.2	Regelleistungsmärkte	949
21.4.3	Kapazitätsmärkte	950
21.4.4	CO ₂ -Emissionshandel	951
21.4.5	Energy Trading	953
21.5	Bilanzkreise und Bilanzierungsgebiete	955
21.6	Stromkosten und Strompreise	960
21.6.1	Kalkulation der Stromkosten	961
21.6.1.1	Stromerzeugungskosten	962
21.6.1.2	Ermittlung von Netznutzungsentgelten	965
21.6.2	Kalkulation der Strompreise	967
21.6.3	Stromausfallkosten	970
21.7	Methoden zur Investitionsrechnung	972

21.8 Asset Management	975
-----------------------	-----

Anhang

A. Rechnen mit komplexen Größen	983
A.1 Komplexe Zeigerdarstellung	983
A.1.1 Komplexe Darstellung von Zweipolen	985
A.1.2 Zählpfeilsysteme	986
A.1.3 Zeigerdiagramme	988
A.1.4 Wechselstromleistung	992
B. Rechnen in Drehstromsystemen	995
B.1 Begriffe und Größen in Drehstromsystemen	995
B.1.1 Spannungen und Ströme in Drehstromnetzen	995
B.1.2 Spannungen und Ströme von Drehstromerzeugern und -Verbrauchern	997
B.2 Drehstromleistung elektrischer Betriebsmittel	999
B.2.1 Drehstromverbraucher am Drehstromnetz	1001
B/2.2 Stern-Dreieck-Anlaufschaltung	1003
C. Rechnen mit bezogenen Größen	1005
C.1 Referenzgrößen	1006
C.1.1 Bezogene Spannungen	1007
C.1.2 Bezogene Leistungen	1008
C.1.3 Bezogene Ströme	1008
C.1.4 Bezogene Impedanzen	1009
C.2 Rechnen mit, pu-Größen	1011
D. Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder	1017
D.1 Induktionsgesetz, induzierte und selbstinduzierte Spannung	1017
D.1.1 Induzierte Spannung	1017
D.1.2 Selbstinduzierte Spannung	1020
D.2 Windungsfluss, Spulenfluss und Flussverkettung einer Wicklung	1020
D.3 Magnetische Streuung ($X = \quad + X_A$)	1023
E. Unsymmetrische Kurzschlussströme	1025
E.1 Die Methode der symmetrischen Komponenten	1025

E.2	Berechnungsformelii für unsymmetrische Kurzschlussströme	1029
E.2.1	Berechnungsforincl für einpolige Kurzschlussströme	1030
E.2.2	Berechnungsformel für zweipolige ^l Kurzschlüsse ohne Erdberührung	1031
E.3	Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung	1034
F.	Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug)	1039
G.	Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme	1041
G.1	Direkte Verfahren	1041
G.1.1	Gauß'sches Eliminationsverfallren	1042
G.1.2	Gauß-Jordan-Algorithmus	1046
G.1.3	Dreiecksfaktorisierung	1046
G.1.4	Optimal geordnete Dreiecksfaktorisierung	1050
G.2	Iterationsverfahren	1050
G.2.1	Stromiterat,ionsverfahren	1051
G.2.1.1	Jacobi-Verfahren (Gesamtschrittverfahren)	1051
G.2.1.2	Gauß-Seidel-Verfahren (Einzelschrittverfahren)	1052
G.2.1.3	Newton-Raphson-Verfahren	1053
H.	Methode der Zustandsvariablen	1057
I.	IEEE Engineering Ethics Code	1063
Index		1067