

Valentin Crastan

# Elektrische Energieversorgung 2

Energie- und Elektrizitätswirtschaft,  
Kraftwerktechnik, alternative Stromerzeugung,  
Dynamik, Regelung und Stabilität,  
Betriebsplanung und -führung

Mit 578 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I    Energiewirtschaft

<b>1</b>	<b>Energiewirtschaftliche Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1	Grundbegriffe, Einführung	3
1.1.1	Energiesektor	3
1.1.2	Nutzprozesse	4
1.1.3	Geschichtlicher Rückblick	5
1.2	Energiebedarf	6
1.2.1	Entwicklung und Aufteilung am Beispiel der Schweiz	6
1.2.2	Zusammenhang des Endenergieverbrauchs mit der wirtschaftlichen Aktivität	10
1.2.3	Weltweiter Energiebedarf	11
1.2.3.1	Pro-Kopf-Energieverbrauch	11
1.2.3.2	Aufteilung auf die Energieträger	12
1.2.4	Entwicklung der Weltbevölkerung	15
1.2.5	Zukünftige Entwicklung des Weltenergiebedarfs	15
1.2.6	Nachhaltigkeit	17
1.3	Verfügbarkeit der Primärenergie	18
1.3.1	Nicht erneuerbare Energien	19
1.3.2	Erneuerbare Energien	20
1.3.2.1	Gezeitenenergie	20
1.3.2.2	Geothermische Energie	20
1.3.2.3	Solarenergie	21
1.3.3	Potential und Nutzung der wichtigsten Solarenergiearten	22
1.3.3.1	Wärmepumpe	22
1.3.3.2	Wasserkraft	23
1.3.3.3	Windkraft	23
1.3.3.4	Biomasse	23
1.3.3.5	Solarstrahlung	24
1.4	Ökologische Probleme	27
1.4.1	Vorwiegend lokale Wirkungen	27
1.4.2	Verstärkung des Treibhauseffektes	27
1.4.3	Vermeidungsstrategien	28
1.5	Nachhaltige Umgestaltung der Energiesysteme	31

<b>2</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsberechnungen</b>	<b>33</b>
2.1	Investitionsrechnung, Diskontierungsverfahren	34
2.1.1	Kapitalwertmethode	34
2.1.2	Annuitätsmethode	36
2.2	Kosten der Energie	38
2.2.1	Kosten der elektrischen Energie	38
2.2.2	Spezifische Energiekosten an den Kraftwerksklemmen	39
2.2.3	Spezifische Jahreskosten der Kraftwerke	41
2.2.4	Kosten der elektrischen Energie am Verbraucher	41
2.3	Strompreisgestaltung (Prof. Dipl. Ing. M. Höckel)	43
2.3.1	Verteilung der Selbstkosten des Netzes	43
2.3.1.1	Modelle für die Zuordnung der Leistungskosten	45
2.3.1.2	Verteilung der Kosten auf versch. Spannungsebenen	49
2.3.2	Stromtarife	52
2.3.2.1	Anforderungen	52
2.3.2.2	Tarfniveau	53
2.3.2.3	Tarifstrukturen	54
2.3.2.4	Beispielrechnung eines Tarifsystems	54
<b>3</b>	<b>Elektrizitätswirtschaft</b>	<b>61</b>
3.1	Verbrauch elektrischer Energie	61
3.1.1	Struktur des Energieverbrauchs	62
3.1.2	Schwankungen des Energieverbrauchs	62
3.2	Deckung des Elektrizitätsbedarfs	65
3.2.1	Kraftwerkarten	65
3.2.2	Kraftwerkeinsatz	66
3.2.2.1	Jahreszeitlicher Einsatz	66
3.2.2.2	Tageszeitlicher Einsatz	66
3.2.3	Wasserspeicherung	68
3.2.4	Energieaustausch	69
3.3	Wasserkraftwerke	70
3.4	Thermische Kraftwerke	72
3.5	Wettbewerb im Elektrizitätssektor	76
3.5.1	Einführung	76
3.5.2	Grundpfeiler des Wettbewerbs und Probleme	76
3.5.2.1	Konkurrenz zwischen Produzenten	77
3.5.2.2	Freie Wahl des Energielieferanten	77
3.5.2.3	Übergangsprobleme	77
3.5.3	Reorganisationsmodelle	79
3.5.3.1	Alleinabnehmer-Modell (Single buyer)	79

3.5.3.2	Wettbewerb auf der Großhandelsstufe . . . . .	80
3.5.3.3	Wettbewerb auf der Kleinhandelsstufe . . . . .	82
3.5.4	Privatisierung, Regulierung der Monopole . . . . .	83
3.5.5	Konsequenzen der Marktöffnung . . . . .	84
3.6	Funktionsweise liberalisierter Elektrizitätsmärkte (Dr. -Ing. J. Kreusel). . . . .	85
3.6.1	Motivation für Liberalisierung und Privatisierung . . . . .	85
3.6.2	Der Aufbau wettbewerblich organisierter Märkte. . . . .	89
3.6.2.1	Aufgaben und Rollen im liberalisierten Markt . . . . .	89
3.6.2.2	Netzzugangsmodelle. . . . .	93
3.6.3	Dienstleistungsmarkt . . . . .	95
3.6.3.1	Systembetreiber. . . . .	95
3.6.3.2	Netzbetreiber und Zählerdienstleister. . . . .	99
3.6.4	Wettbewerbsmarkt . . . . .	104
3.6.4.1	Großhandel. . . . .	104
3.6.4.2	Börsenhandel . . . . .	108
3.6.4.3	Energiedienstleister. . . . .	111
3.6.4.4	Bilanzkreisverantwortliche. . . . .	119
3.6.5	Besonderheiten internationaler Realisierungen liberalisierter Elektrizitätsmärkte. . . . .	122
3.6.5.1	Vereinigte Staaten von Amerika . . . . .	124
3.6.5.2	Großbritannien. . . . .	125
3.6.5.3	Skandinavien . . . . .	126
3.6.5.4	Kontinentaleuropa . . . . .	126
3.6.5.5	Zusammenfassung internationaler Beispiele . . . . .	127
3.6.6	Erfahrungen in liberalisierten Märkten . . . . .	128
3.6.6.1	Auswirkungen der Liberalisierung . . . . .	129
3.6.6.2	Übergangseffekte. . . . .	133
3.7	Risikomanagement (Prof. Dipl. Ing. M. Hoeckel). . . . .	135
3.7.1	Unsicherheiten in der Elektrizitätswirtschaft . . . . .	136
3.7.1.1	Risiken bei der Elektrizitätserzeugung . . . . .	137
3.7.1.2	Unsicherheit bei der Elektrizitätsnachfrage. . . . .	139
3.7.1.3	Elektrizitätsübertragung und -Verteilung. . . . .	140
3.7.1.4	Hohe Unsicherheiten. . . . .	140
3.7.2	Quantifizierung der Risiken - Volatility. . . . .	140
3.7.2.1	Was ist ein Risiko. . . . .	140
3.7.2.2	Stufen der Risikokalkulation. . . . .	142
3.7.2.3	Risikomessung . . . . .	143
3.7.2.4	Risikostrategien . . . . .	145
3.7.3	Hedging . . . . .	146
3.7.3.1	Forwards. . . . .	146
3.7.3.2	Futures. . . . .	148
3.7.3.3	Optionen. . . . .	149
3.7.4	Strommärkte und ihre Produkte. . . . .	152

## Inhaltsverzeichnis

3.7.5	Methoden des Risikomanagements	154
3.7.5.1	Modellierung des Spotpreises	155
3.7.5.2	Risikoneutrale Evaluation des flexiblen Vertrags	156
3.7.5.3	Eine einfache Risiko-averse Strategie	160

## Teil II Kraftwerktechnik, Energieumwandlung

4	Wasserkraftwerke	165
4.1	Hydrologische Planungsgrundlagen	165
4.2	Laufkraftwerke	167
4.2.1	Wasserbewirtschaftung	168
4.2.2	Ausführung	168
4.2.3	Auslegung	170
4.3	Speicherkraftwerke	170
4.3.1	Tages- und Wochenspeicherwerke	170
4.3.2	Jahresspeicherwerke (Saisonspeicherwerke)	172
4.3.3	Pumpspeicherung	176
4.4	Wasserturbinen	177
4.4.1	Pelton-Turbine	178
4.4.1.1	Strahldurchmesser und Wassermenge	180
4.4.1.2	Optimale Umfangsgeschwindigkeit	181
4.4.1.3	Durchmesser, spezifische Drehzahl	181
4.4.2	Reaktionsturbinen	184
4.4.2.1	Kavitationserscheinung	186
4.4.2.2	Energiediagramm	187
4.4.2.3	Durchfluss- und Druckzahl	187
4.4.2.4	Zusammenhang zwischen $n_q$ , $q_a$ und $\eta$	188
4.4.2.5	Turbinenauslegung	189
4.4.2.6	Typen von Reaktionsturbinen und Kreiselpumpen	192
4.4.3	Turbinenwahl	193
4.5	Dynamik	195
4.5.1	Druckstollen	196
4.5.2	Wasserschloss	198
4.5.3	Starre Druckleitung	199
4.5.4	Gesamtmodell des hydraulischen Systems	200
4.5.4.1	Nichtlineares Blockdiagramm	200
4.5.4.2	Übertragungsfunktion	200
4.5.5	Elastischer Druckstoß	202
4.5.5.1	Druckleitungsmodelle mit Elastizität	203
4.5.5.2	Übertragungsfunktion der elastischen Druckleitung	206

4.5.6	Gesamtmodell mit Elastizität . . . . .	207
4.5.6.1	Übertragungsfunktion. . . . .	207
4.5.6.2	Nichtlineares Blockschaltbild. . . . .	207
4.5.7	Wasserturbinen- und Wasserkraftwerks-Modell. . . . .	207
4.5.7.1	p.u. Gleichungen . . . . .	208
4.5.7.2	Linearisierung der Turbine . . . . .	210
4.5.7.3	Übertragungsfunktion der Turbine . . . . .	211
5	Thermische Kraftwerke, Wärmepumpe . . . . .	215
5.1	Dampfturbinenprozess. . . . .	215
5.1.1	Rankine- und Clausius-Rankine Kreisprozess . . . . .	215
5.1.2	Zwischenüberhitzung und Speisewasservorwärmung . . . . .	218
5.2	Gasturbinenprozess. . . . .	219
5.2.1	Einfacher offener Gasturbinenprozess. . . . .	219
5.2.1.1	Idealisierter Prozess. . . . .	220
5.2.1.2	Realer Prozess. . . . .	220
5.2.1.3	Wirkungsgrad, Leistung . . . . .	222
5.2.2	Rekuperation. . . . .	224
5.2.3	Carnotisierung . . . . .	225
5.3	Kombiprozesse. . . . .	226
5.4	Wärme-Kraft-Kopplung. . . . .	228
5.4.1	Entnahme-Kondensationsschaltung . . . . .	228
5.4.2	Gegendruckanlage. . . . .	230
5.4.3	Gasturbinen. . . . .	231
5.4.4	Blockheizkraftwerke. . . . .	232
5.4.5	Wärme-Kraft-Kopplung und CO <sub>2</sub> -Produktion. . . . .	232
5.5	Fossilgefeuerte Dampfkraftwerke. . . . .	233
5.5.1	Luft-Brennstoff-Rauchgas/Asche-Kreislauf . . . . .	233
5.5.2	Wasser-Dampf-Kreislauf, Verluste. . . . .	233
5.5.3	Kühlwasserkreislauf. . . . .	235
5.5.4	Blockregelung (Dipl. Ing. H. Kleinen). . . . .	237
5.5.5	Dynamik. . . . .	240
5.6	Kernkraftwerke. . . . .	243
5.6.1	Energiegewinnung durch Kernspaltung. . . . .	243
5.6.1.1	Uranspaltung . . . . .	243
5.6.1.2	Konversionsvorgänge. . . . .	245
5.6.2	Reaktorkonzepte. . . . .	246
5.6.2.1	Leichtwasserreaktoren. . . . .	246
5.6.2.2	Schwerwasserreaktoren. . . . .	248
5.6.2.3	Graphitmoderierte Reaktoren. . . . .	248
5.6.2.4	Schnelle Brutreaktoren. . . . .	249

5.6.3	Dampfkreisprozess und Regelung . . . . .	249
5.6.4	Reaktorsicherheit und Brennstoffkreislauf . . . . .	250
	5.6.4.1 Reaktorsicherheit . . . . .	250
	5.6.4.2 Brennstoffkreislauf und Entsorgung . . . . .	250
5.6.5	Risiken der Kernkraft . . . . .	252
	5.6.5.1 Sicherheit des Kraftwerks . . . . .	253
	5.6.5.2 Brennstoffkreislauf . . . . .	253
	5.6.5.3 Abfallbeseitigung . . . . .	254
	5.6.5.4 Kernwaffenherstellung . . . . .	254
5.6.6	Wirkung der Radioaktivität . . . . .	254
	5.6.6.1 Aktivität . . . . .	255
	5.6.6.2 Strahlendosis . . . . .	256
	5.6.6.3 Äquivalentdosis . . . . .	256
	5.6.6.4 Natürliche Radioaktivität . . . . .	257
5.7	Kraftwerke mit kombiniertem Gas- und Dampfprozess (Dipl. Ing. H. Kleinen) . . . . .	258
5.7.1	GUD-Kraftwerk . . . . .	258
	5.7.1.1 Allgemeines . . . . .	258
	5.7.1.2 Technische Ausführung . . . . .	259
	5.7.1.3 Betrieb . . . . .	259
5.7.2	GUD-Kraftwerke mit Zusatzfeuerung im Abhitzeessel . . . . .	260
5.7.3	Verbundkraftwerke . . . . .	261
5.7.4	Kombikraftwerk mit atmosphärischem Dampferzeuger . . . . .	262
5.7.5	Kraftwerke mit Kohleumwandlung unter Druck . . . . .	262
5.7.6	Dynamisches Verhalten . . . . .	264
5.8	Kraftwerksleittechnik (Dipl. Ing. H. Kleinen) . . . . .	265
5.8.1	Entwicklung . . . . .	265
5.8.2	Aufbau . . . . .	266
5.8.3	Ausblick . . . . .	267
5.9	Die Wärmepumpe . . . . .	268
5.9.1	Energiewirtschaftliche Bedeutung . . . . .	268
	5.9.1.1 Exergetischer Vergleich . . . . .	268
	5.9.1.2 Vergleich der Energie-Nutzungsgrade . . . . .	271
5.9.2	Prinzip und Aufbau . . . . .	274
	5.9.2.1 Der idealisierte Kreisprozess . . . . .	274
	5.9.2.2 Der reale Kreisprozess . . . . .	276
	5.9.2.3 Leistungsziffer . . . . .	278
5.9.3	Einsatz . . . . .	278
	5.9.3.1 Verlauf der Außentemperatur . . . . .	279
	5.9.3.2 Art und Bemessung der Wärmeverteilungsanlage . . . . .	280

## TEIL III Alternative Stromerzeugung

6	Windkraftwerke	285
6.1	Die kinetische Energie des Windes	285
6.1.1	Theoretische Windleistung	285
6.1.2	Windgeschwindigkeit	286
6.1.3	Energieangebot	287
6.1.4	Die Weibull-Verteilung	288
6.2	Windradtypen und deren Leistung	290
6.3	Horizontalachsige Windrotoren	293
6.3.1	Theorie von Betz	293
6.3.2	Tragflügeltheorie	295
6.3.3	Moderne Windturbinen	297
6.4	Der Darrieus-Rotor	297
6.4.1	Rotorgeometrie	298
6.4.2	Kräfte auf die Flügelemente	299
6.4.3	Tragflügeltheorie	300
6.5	Der Savoniusrotor	301
6.5.1	Aufbau	301
6.5.2	Leistungsabgabe	302
6.5.3	Drehmoment	303
6.6	Betrieb und Regelung	304
6.6.1	Leistung und Betriebsarten	304
6.6.2	Leistungsregelung	305
6.6.3	Netzbetrieb	306
6.6.4	Inselbetrieb	307
7	Photovoltaik	309
7.1	Physikalische Grundlagen	309
7.1.1	Photoleitung	310
7.1.2	Der photovoltaische Effekt	312
7.2	Verhalten des p-n-Übergangs, Photostrom	313
7.3	Solarzelle	319
7.3.1	Kennlinie und Ersatzschema	319
7.3.2	Wirkungsgrad	322
7.3.2.1	Diskussion der Verlustfaktoren	322
7.3.2.2	Möglichkeiten zur Wirkungsgradverbesserung	323
7.3.3	Solarzellentypen	325



7.4	Die Sonne als Energiequelle . . . . .	326
7.4.1	Extraterrestrische Strahlungsintensität . . . . .	326
7.4.2	Scheinbare Sonnenbewegung relativ zur Erde . . . . .	327
7.4.3	Berechnung des Sonnenstands . . . . .	330
7.4.4	Berechnung der Strahlungsintensität . . . . .	330
7.4.5	Strahlungsenergie pro Tag . . . . .	332
7.4.6	Wirkung der Atmosphäre . . . . .	334
7.4.7	Strahlungsintensität mit Atmosphäre . . . . .	335
7.5	Systemtechnik . . . . .	337
7.5.1	Inselsysteme . . . . .	337
7.5.2	Netzgekoppelte PV-Anlagen . . . . .	338
7.5.3	Wechselrichter . . . . .	339
7.5.4	Modellierung der Solarmodule . . . . .	341
8	Brennstoffzelle . . . . .	345
8.1	Aufbau und Typen . . . . .	345
8.2	Prinzip und Modell . . . . .	347
8.2.1	Elektrochemische Grundlagen . . . . .	347
8.2.2	Lineares Modell . . . . .	349
8.3	Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen . . . . .	350
8.3.1	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) . . . . .	350
8.3.2	Keramik-Brennstoffzelle (SOFC) . . . . .	351
8.3.3	Systemtechnik . . . . .	352
9	Kernfusion . . . . .	353
9.1	Grundlagen des Fusionsprozesses . . . . .	353
9.1.1	Fusionsreaktionen . . . . .	353
9.1.2	Energieverteilung im Plasma . . . . .	354
9.2	Der Fusionsreaktor . . . . .	355
9.2.1	Prinzip des (d-t)-Fusionsreaktors . . . . .	355
9.2.1.1	Plasmareaktion . . . . .	357
9.2.1.2	Mantelreaktionen . . . . .	357
9.2.2	Energiebilanz des Plasmas . . . . .	358
9.2.3	Das Einschlussproblem . . . . .	361
9.2.3.1	Der magnetische Einschluss . . . . .	361
9.2.3.2	Der inertielle Einschluss . . . . .	363
9.3	Vorzüge und technologische Probleme . . . . .	363

## Teil IV Regelung und Stabilität des Energieversorgungssystems

10	Modellierung und Simulation. . . . .	•	367
10.1	Generatormodelle und sonstige Einspeisungen. . . . .		368
10.1.1	Kurzzeitbereich der SM. . . . .		368
10.1.2	Langzeitbereich der SM. . . . .		372
10.1.3	Sonstige Einspeisungen. . . . .		373
10.1.3.1	Transformatoren mit Längsregelung. . . . .		373
10.1.3.2	Transformatoren mit Schräg- oder Querverregelung. . . . .		374
10.1.3.3	Geregelte Kompensationsanlagen. . . . .		374
10.1.3.4	Asynchronmaschinen. . . . .		374
10.2	Lastmodelle. . . . .		375
10.2.1	Statische Last. . . . .		375
10.2.2	Dynamische Last. . . . .		377
10.3	Netzdarstellung. . . . .		378
10.4	Simulationsprogramme (Dr. Ing. M. Polier). . . . .		379
10.4.1	Modellierung des elektrischen Netzes. . . . .		381
10.4.2	Allgemeines Modell zur Analyse von Stabilitätsproblemen. . . . .		388
10.4.3	Numerische Integration. . . . .		389
10.4.3.1	Explizite Verfahren. . . . .		389
10.4.3.2	Implizite Verfahren. . . . .		391
10.4.3.3	Vergleich der Verfahren. . . . .		393
10.4.4	Genauigkeit und Stabilität numerischer Integrationsverfahren. . . . .		393
10.4.4.1	Genauigkeit. . . . .		394
10.4.4.2	Stabilität. . . . .		395
10.4.5	Simulationsalgorithmen. . . . .		401
10.4.6	Behandlung von Nichtlinearitäten. . . . .		403
10.4.7	Dynamische Modellierung. . . . .		406
10.4.8	Initialisierung (Berechnung von Anfangsbedingungen). . . . .		408
10.4.8.1	Beispiel Spannungsregler. . . . .		408
10.4.8.2	Verallgemeinerung. . . . .		411
11	Drehzahl- und Frequenzleistungsregelung. . . . .		413
11.1	Primärregelung. . . . .		414
11.1.1	Wasserturbinen. . . . .		416
11.1.2	Dampfkraftwerk. . . . .		417
11.1.2.1	Festdruckregelung. . . . .		417
11.1.2.2	Gleitdruckregelung. . . . .		419
11.1.3	Gasturbinen- und Kombikraftwerke. . . . .		420

11.2	Frequenzregelung im Inselnetz . . . . .	424
11.2.1	Primärregelung . . . . .	424
11.2.2	Sekundärregelung . . . . .	426
11.3	Frequenzleistungsregelung im Verbund . . . . .	427
11.4	Europäischer Stromaustausch, UCTE . . . . .	429
<b>12</b>	<b>Synchronisierung und Polradwinkelstabilität . . . . .</b>	<b>431</b>
12.1	Synchrongruppe am starren Netz . . . . .	431
12.1.1	Torsionsschwingungen . . . . .	431
12.1.2	Störungen des Gleichgewichts . . . . .	433
12.1.2.1	Statische Stabilität . . . . .	434
12.1.2.2	Stabilität im Kurzzeitbereich . . . . .	435
12.1.3	Wirkung der Netzreaktanzen . . . . .	437
12.1.4	Statische Stabilität der unregulierten SM . . . . .	437
12.1.5	Statische Stabilität mit Spannungsregelung . . . . .	439
12.1.6	Verhalten im Kurzzeitbereich . . . . .	441
12.2	Dynamik der kleinen Störungen . . . . .	442
12.2.1	Wirkung der Drehzahlregelung . . . . .	446
12.2.2	Wirkung der Spannungsregelung . . . . .	446
12.2.3	Wirkung des Pendeldämpfungsgeräts . . . . .	447
12.3	Verhalten bei großen Störungen . . . . .	449
12.3.1	Transiente Analyse . . . . .	452
12.3.1.1	Rasche Änderung des Antriebsmoments . . . . .	453
12.3.1.2	Kurzschluss im Netz . . . . .	453
12.3.1.3	Zu- und Abschaltung einer Zwischenlast . . . . .	455
12.3.2	Stabilisierungsmaßnahmen . . . . .	457
12.4	Modellierung mit subsynchronen Schwingungen . . . . .	460
12.4.1	Synchronmaschine . . . . .	460
12.4.2	Netzverbindung . . . . .	461
12.4.3	Polar-dq-Transformation . . . . .	462
12.4.4	Mechanik . . . . .	462
12.4.5	Hydraulisches oder thermisches System und Drehzahlregelung . . . . .	462
12.5	Transiente Analyse von Mehrmaschinensystemen . . . . .	463
12.5.1	Elektrisch statische Darstellung der Generatoren . . . . .	463
12.5.2	Netzdarstellung . . . . .	464
12.5.3	Die elektrische Leistung . . . . .	465
12.5.3.1	Netzdarstellung in Generatorkoordinaten . . . . .	466
12.5.3.2	Gesamtssystem in Parkvektordarstellung . . . . .	467
12.5.4	Systeme mit $m > 3$ . . . . .	472
12.5.5	Spannungsunabhängigkeit der Last . . . . .	472
12.5.6	Stabilität im Großen . . . . .	473

12.5.7	Ordnungsreduktion . . . . .	475
12.5.7.1	Kohärente Generatoren . . . . .	476
12.5.7.2	Transiente Analyse und Kohärenz . . . . .	476
12.5.7.3	Berechnung der synchronisierenden Leistung . . . . .	478
12.6	Lineare Analyse von Mehrmaschinensystemen . . . . .	479
12.6.1	Berücksichtigung von Spannung und Leistung . . . . .	483
12.6.2	Netzreduktion . . . . .	483
12.6.3	Ordnungsreduktion der Generatorübertragungsfunktionen . . . . .	484
12.7	Polradwinkelstabilität und ihre Analyse in der Praxis des Netzbetriebs (Prof. Dr.-Ing. H. Weber) . . . . .	485
12.7.1	Entstehungsursachen von Polradwinkelpendelungen . . . . .	487
12.7.2	Einfluss von Leistungs transit auf die Polradwinkelstabilität . . . . .	492
12.7.3	Einfluss der Verbraucherstruktur auf die Polradwinkelstabil.. . . .	495
12.7.4	Identifizierung destabilisierender Spannungsregler in Mehrmaschinensystemen . . . . .	498
<b>13</b>	<b>Spannungsregelung und Spannungsstabilität . . . . .</b>	<b>501</b>
13.1	Erregersystem und Spannungsregelung der SM . . . . .	502
13.1.1	Erregersysteme . . . . .	502
13.1.1.1	Erregersystem mit Gleichstromgenerator . . . . .	502
13.1.1.2	Erregersystem mit Wechselstromgenerator . . . . .	503
13.1.1.3	Statische Erregung (Stromrichtererregung) . . . . .	503
13.1.2	Spannungsregelung der Synchronmaschine . . . . .	504
13.1.2.1	Übertragungsfunktion der Synchronmaschine . . . . .	505
13.1.2.2	Reglerauslegung . . . . .	508
13.1.2.3	Verhalten bei kapazitiver Belastung . . . . .	510
13.1.2.4	Wirkung der Drehzahl . . . . .	511
13.1.2.5	Kopplung mit dem Synchronisierkreis . . . . .	512
13.1.2.6	Netzverbindung . . . . .	513
13.2	Regelung von Stufentransformatoren . . . . .	514
13.2.1	Reglerauslegung . . . . .	514
13.2.2	Lastflussberechnung mit Regeltransformator . . . . .	516
13.3	Geregelte Kompensationsanlagen . . . . .	518
13.3.1	Parallelkompensation mit SVC . . . . .	518
13.3.2	Statischer Konverter (STATCON) . . . . .	521
13.3.3	Seriekompensation . . . . .	522
13.4	Statische Spannungsstabilität einer SM . . . . .	524
13.4.1	(u,p)-Kennlinien bei konstantem Leistungsfaktor . . . . .	525
13.4.1.1	Spannungsunabhängige Wirklast . . . . .	527
13.4.1.2	Wirklast mit spannungsabhängigen Lastanteil . . . . .	528
13.4.1.3	Verhalten bei reiner Impedanzlast! . . . . .	528

13.4.1.4	Wirkung von Transf. mit variabler Übersetzung ..	528
13.4.2	(u,q)-Kennlinien bei vorgegebener Wirklast .....	529
13.4.3	Darstellung <b>mit</b> der Generatorblindleistung .....	532
13.4.3.1	Sicherheitsindizes .....	535
13.4.3.2	Lastkennlinien .....	535
13.5	Statische Spannungsstabilität im vermaschten Netz .....	536
13.6	Dynamik .....	538
13.6.1	Kurzzeitanalyse .....	538
13.6.2	Langzeitin stabilität .....	539

## Teil V Betriebsplanung und -führung

14	Betriebsplanung .....	543
14.1	Mikroökonomische Grundlagen .....	543
14.2	Betriebsoptimierung der vertikal integrierten Energieversorgung ...	545
14.2.1	Netzberechnung .....	546
14.2.1.1	Leistungseinspeisung, Zweigleistung, Verluste ...	546
14.2.1.2	Verlustberechnung .....	547
14.2.1.3	DC-Leistungsfluss .....	548
14.2.2	Netzberechnung mit Spannungseinkopplung .....	549
14.2.3	Optimaler Leistungsfluss (OPF) .....	550
14.2.3.1	Wirkleistungsoptimierung mit Verlustfunktion ...	551
14.2.3.2	Berücksichtigung der Blindleistungen .....	553
14.2.3.3	Begrenzung der Leistungsflüsse der Leitungen ...	554
14.2.3.4	Beispiel einer momentanen Optimierungsrechnung	555
14.2.4	Optimale Speicherbewirtschaftung .....	560
14.2.5	Einsatzplan der thermischen Gruppen .....	562
14.2.6	Die langfristige Optimierung .....	564
14.2.7	Die mittelfristige Optimierung .....	566
14.2.8	Die Kurzzeit-Optimierung .....	566
14.2.9	Momentane Optimierung .....	567
14.2.10	Tarifierung .....	567
14.3	Betriebsoptimierung bei Wettbewerb .....	568
14.3.1	Mathematische Grundlagen .....	568
14.3.1.1	Verlustloses Netz ohne Kapazitätsbeschränkungen	568
14.3.1.2	Berücksichtigung von Netzverlusten, Netzkosten und Generator-Leistungsbegrenzungen .....	570
14.3.1.3	Optimalitätsbedingungen bei Engpässen .....	571
14.3.2	Pool-Lösung und ausgehandelter Netzzugang .....	572

14.3.3	Betriebsoptimierung bei ausgehandeltem Netzzugang (Dr. -Ing. J. Kreusel) . . . . .	572
14.3.3.1	Konsequenzen der Liberalisierung für Erzeugungs- planung und Systembetriebsführung . . . . .	573
14.3.3.2	Auswirkungen auf den Planungsprozess und die eingesetzten Werkzeuge. . . . .	574
15	FACTS-Elemente ( 114 S) (Dr. -Ing. D. Westermann). . . . .	579
15.1	Übersicht . . . . .	579
15.2	Technologie. . . . .	584
15.2.1	Halbleiterbauelemente. . . . .	584
15.2.2.1	Dioden. . . . .	585
15.2.2.2	Thyristoren. . . . .	586
15.2.2.3	Gate Turn-OffThyristor (GTO). . . . .	587
15.2.2.4	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). . . . .	588
15.2.2.5	Insulated Gate Turn-Off Thyristor (IGCT). . . . .	589
15.2.2	Spannungsumrichter, VSC. . . . .	590
15.2.3	Steuerverfahren und Eliminierung von Oberwellen. . . . .	596
15.2.3.1	Grundschwingungsverfahren. . . . .	596
15.2.3.2	Pulsweitenmodulation (PWM). . . . .	596
15.2.4	Berechnung der Verzerrung. . . . .	598
15.2.4.1	Spannungsverzerrung. . . . .	598
15.2.4.2	Netzseitige Stromverzerrung. . . . .	598
15.2.4.3	Stromverzerrung im Zwischenkreis. . . . .	599
15.2.5	Schutz- und Leitsystem. . . . .	601
15.3	Aufbau und stationäres Betriebsverhalten. . . . .	605
15.3.1	Shunt-Elemente, SVC und STATCOM. . . . .	605
15.3.1.1	Aufbau. . . . .	605
15.3.1.2	Strom~/Spannungscharakteristik und Vierpolform. . . . .	609
15.3.1.3	P-ü-Diagramm. . . . .	610
15.3.2	Serie-Elemente TCSC und SSSC. . . . .	613
15.3.2.1	Aufbau. . . . .	613
15.3.2.2	Strom-/Spannungscharakteristik und Vierpolform. . . . .	614
15.3.2.3	P-ü-Diagramm. . . . .	617
15.3.3	Parallel-serielle Elemente PAR und UPFC. . . . .	619
15.3.3.1	Aufbau. . . . .	619
15.3.3.2	Strom-/Spannungscharakteristik und Vierpolform. . . . .	620
15.3.3.3	P-ü-Diagramm. . . . .	623
15.3.4	Anwendung im Netz. . . . .	629
15.3.4.1	Abschätzung der Dimensionierung. . . . .	629
15.3.4.2	Analytische Lösung des Modellsystems. . . . .	630
15.3.4.3	Verbundkupplung - große Kurzschlussleistungen, . . . . .	632
15.3.4.4	Identische Leitungen. . . . .	633



	15.3.4.5	Unterschiedliche Leitungen	635
	15.3.4.6	Leistungsflussregelung auf 380 kV-Doppelleitung	636
	15.3.4.7	Regelung mit unterschiedlichen Spannungsebenen	637
	15.3.4.8	Verallgemeinerung	638
15.4		Modellierung für Effektivwertsimulationen	639
	15.4.1	Shuntelemente, STATCOM	639
	15.4.2	Serieelemente, SSSC	643
	15.4.3	Parallel-Serielle-Elemente, UPFC	646
	15.4.4	Modellsynthese	651
15.5		Einsatzortbestimmung	654
	15.5.1	Shuntelemente	655
	15.5.2	Serieelemente	656
	15.5.3	Dynamische Betrachtung	659
15.6		Verbesserung der transienten Stabilität	660
	15.6.1	Allgemeine Betrachtung	660
	15.6.2	Allgemeiner Ansatz	664
	15.6.3	Ausführungsbeispiele	667
	15.6.3.1	SVC, STATCOM, TCSC, SSSC und UPFC	668
	15.6.3.2	QBT	669
	15.6.3.3	PAR	670
15.7		Verbesserung der Versorgungsqualität	671
	15.7.1	Störungsursachen	672
	15.7.2	FACTS zur Verbesserung der Versorgungsqualität	674
	15.7.2.1	Dynamic Voltage Restorer	674
	15.7.2.2	Dynamic Uninterruptible Power Supply	676
	15.7.2.3	Solid State Transfer Switch	679
	15.7.3	Vergleich	683
<b>16</b>		<b>Leit- und Informationstechnik (Dr.-Ing. R. Apel)</b>	<b>685</b>
16.1		Überblick	685
	16.1.1	Aufgabe	685
	16.1.2	Historie	685
	16.1.3	Ausblick	686
16.2		Stationsleittechnik	686
	16.2.1	Anwendung	686
	16.2.1.1	Horizontale Integration	687
	16.2.1.2	Vertikale Integration	687
	16.2.2	Überwachung und Steuerung	687
	16.2.2.1	Prozess- und Feldbusebene	687
	16.2.2.2	Stationsbus	687
	16.2.2.3	Stationsebene	688

16.2.2.4	Ereignis-/Alarmbehandlung	689
16.2.2.5	Messwertbehandlung	690
16.2.3	Schutz	690
16.2.3.1	Verriegelung	690
16.2.3.2	Synchrocheck	690
16.2.3.3	Allgemeine Schutzfunktionen	690
16.2.3.4	Adaptiver Schutz	692
16.3	Fernwirktechnik	692
16.3.1	Infrastruktur	692
16.3.2	Protokolle	693
16.4.	Leitsystemtechnik	693
16.4.1.	Aufgaben	693
16.4.2.	Plattform/Systemarchitektur	694
16.4.2.1	Echtzeitdatenbank	695
16.4.2.2	Simulationsdatenbank	696
16.4.2.3	Pflegedatenbank	696
16.4.3	SCADA	697
16.4.3.1	Kommunikation	697
16.4.3.2	Datenhaltung/Mypen	698
16.4.3.3	Steuerung	703
16.4.3.4	Archivdatenverarbeitung	707
16.4.3.5	Datenpflege	711
16.4.3.6	Inter-Center Kommunikation	712
16.4.4	Mensch Maschine Kommunikation (MMI)	712
16.4.4.1	Bild und Darstellungskonzepte	713
16.4.4.2	Bildfunktionen	714
16.4.4.3	Mosaiktafel	715
16.4.4.4	Großbildprojektionen	716
16.4.4.5	Zuständigkeitsüberwachung	717
16.4.5	Integration von Leitsystemen in IT-Landschaften	718
16.4.6	Höhere Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen (HEO)	719
16.4.6.1	Übertragungsnetzführung	720
16.4.6.2	Verteilnetzführung	721
16.4.7	Leistungs-ZFrequenzregelung	723
<b>17</b>	<b>Netzleittechnik und Marktöffnung (Dipl.-Ing. O. Vollweider) ...</b>	<b>725</b>
17.1	Marktumfeld und Anforderungen	725
17.1.1	Marktumfeld	725
17.1.2	Prinzipielle Anforderungen an ein Netzleitsystem	726
17.2	Systemkonzeption für Netzleitsysteme	727
17.3	Systemarchitektur	728



17.3.1	Domänenstruktur . . . . .	728
17.3.2	Komponentenarchitektur und Datenmodelle . . . . .	729
17.3.2.1	Komponentenarchitektur . . . . .	729
17.3.2.2	Struktur des Datenmodells . . . . .	730
17.4	Domänen- und Funktionsüberblick . . . . .	731
17.4.1	Kommunikation . . . . .	732
17.4.2	Echtzeitverarbeitung (SCADA). . . . .	732
17.4.3	Applikationen . . . . .	741
17.4.3.1	Archivierungs-und Energieabrechnung . . . . .	741
17.4.3.2	Nachfrage-undMulti-Energie-Management . . . . .	741
17.4.3.3	Verteilnetzführung . . . . .	742
17.4.3.4	Transportnetzführung . . . . .	743
17.4.3.5	Erzeugungs-Management . . . . .	744
17.4.3.6	Trainingssimulator. . . . .	744
17.4.3.7	Prozessdaten-Simulator. . . . .	746
17.4.4	Benutzeroberfläche. . . . .	747
17.5	Bedien- und Anwendungsfunktionen . . . . .	751
17.5.1	Zentrale Bedienfunktionen. . . . .	751
17.6	Daten-Management . . . . .	754
17.6.1	Konfigurations-Management . . . . .	754
17.6.2	Phasen der Dateneingabe. . . . .	754
17.6.3	Benutzeroberfläche. . . . .	756
17.6.4	Massendatenimport . . . . .	761
17.6.5	Standards und Technologien. . . . .	762
17.7	Systemkonfigurationen. . . . .	764
17.8	Integration und Workflow. . . . .	764
17.9	Ausblick . . . . .	766

## Teil VI Anhang

Anhang I	Thermodynamik . . . . .	771
1.1	Grundbegriffe. . . . .	771
1.1.1	Zustandsgrößen. . . . .	771
1.1.2	Thermodynamische Prozesse. . . . .	772
1.1.3	Erster Hauptsatz, Energiebilanz . . . . .	773
1.1.3.1	Geschlossene Systeme. . . . .	773
1.1.3.2	Fließprozesse (offene Systeme). . . . .	774
1.1.4	Entropie, zweiter Hauptsatz . . . . .	776

12	Kreisprozesse . . . . .	.777
1.2.1	Kreisprozess von Carnot . . . . .	.777
1.2.2	Exergiebegriff, Wirkungsgrade . . . . .	.778
1.2.3	Allgemeiner Kreisprozess . . . . .	.779
13	Teilprozesse . . . . .	.780
1.3.1	Isothermer Prozess . . . . .	.780
1.3.2	Isobarer Prozess . . . . .	.781
1.3.3	Isochorer Prozess . . . . .	.781
1.3.4	Adiabate Prozesse . . . . .	.782
1.3.4.1	Isentroper Prozess (reversible Adiabate) . . . . .	.783
1.3.4.2	Isoenthalper Prozess (adiabate Drosselung) . . . . .	.783
1.3.5	Polytrope Zustandsänderung . . . . .	.784
14	Technische Kreisprozesse . . . . .	.784
<b>Anhang II Kernphysikalische Grundlagen . . . . .</b>		<b>.787</b>
II. 1	Aufbau des Atoms und Bindungsenergie . . . . .	.787
11.2	Isotope . . . . .	.790
11.3	Radioaktivität . . . . .	.791
11.4	Kernreaktionen . . . . .	.792
II. 5	Wirkungsquerschnitt und Reaktionsrate.....	.792
II.6	Die Kernspaltung . . . . .	.794
11.6.1	Die Spaltung von $U^{235}$ . . . . .	.794
11.6.2	Spalt- und Brutstoffe . . . . .	.796
<b>Anhang III Dynamik und Regelungstechnik . . . . .</b>		<b>.799</b>
III. 1	Darstellung linearer Systeme . . . . .	.799
111.2	Stabilität . . . . .	.801
111.3	Kopplung linearer Systeme . . . . .	.802
111.4	Modale Analyse . . . . .	.803
111.5	Netzdarstellung . . . . .	.805
111.6	Elementare lineare Regelungstechnik . . . . .	.807
111.6.1	Vorgabe des Stellverhaltens . . . . .	.808
111.6.2	Synthese im Frequenzbereich . . . . .	.810

<b>Anhang IV</b>	<b>Berechnung der Blindleistungen im Rahmen der linearen Analyse von Mehrmaschinensystemen ....</b>	<b>813</b>
IV.1	Blindleistungsabgabe der Generatoren .....	813
IV.2	Lineare Analyse des Mehrmaschinensystems .....	814
<b>Anhang V</b>	<b>Optimierung .....</b>	<b>817</b>
V.1	Lagrange-Verfahren .....	817
V.2	Optimaler Leistungsfluss (OPF) .....	819
<b>Anhang VI</b>	<b>Gamma-Funktion .....</b>	<b>821</b>
<b>Anhang VII</b>	<b>Lösung der Aufgaben .....</b>	<b>823</b>
<b>Anhang VIII</b>	<b>Mollier-Diagramme, Kältemittel .....</b>	<b>827</b>
	Literaturverzeichnis .....	831