

Inhalt

Vorwort	5
1 Verhalten von Netzen	13
1.1 Ausgleichvorgänge in Energieversorgungsnetzen	13
1.1.1 Netzaufbau	13
1.1.2 Dynamische Systeme	15
1.1.3 Stationärer Betrieb	17
1.1.4 Störung	19
1.1.5 Ausgleichvorgang	20
1.2 Einführung des Per-Unit-Systems	26
1.3 Statische Stabilität	28
1.3.1 Die Stabilität im Kleinen	28
1.3.2 Stationärer Betrieb eines Netzes	29
1.3.3 Stabilität des Betriebspunkts	36
1.3.4 Innenimpedanz des Generators	39
1.3.5 Stabilität im Inselnetz	42
1.4 Transiente Stabilität	42
1.4.1 Frequenzabhängigkeit der Ersatzschaltung	43
1.4.2 Bewegungsgleichung	43
1.4.3 Mechanische Analogie	46
1.4.4 Linearisierung der Bewegungsgleichungen	48
1.4.5 Transienter Ausgleichvorgang	53
1.4.6 Flächenkriterium	56
1.4.7 Kurzschluss am Abzweig	60
1.4.8 Unsymmetrische Kurzschlüsse	62
1.4.9 Anwendung des Flächenkriteriums	65
1.4.10 Zustandsraumdarstellung	68
1.4.11 Einzugsbereich	70
1.4.12 Kritische Kurzschlusszeit	74
1.4.13 Anwendung des Einzugsbereichs	75
1.5 Stabilitätsbegriffe	80
2 Diagonaltransformation	85
2.1 Symmetrische Drehstromnetze	85
2.2 Modell der Synchronmaschine	89
2.3 Transformationsmatrizen	91

2.4	Orthogonalkomponenten $h\alpha\beta$ nach <i>Clarke</i>	96
2.5	Symmetrische Komponenten $h\pi n$ nach <i>Fortescue</i>	103
2.6	Zweiachsenkomponenten hdq nach <i>Park</i>	107
2.7	Raumzeigerkomponenten hsz nach <i>Kovács</i>	112
2.8	Anwendung der Komponenten	115
3	Beschreibungsgleichungen der Synchronmaschinen	117
3.1	Ständerwicklungen	117
3.2	Läuferwicklungen	120
3.3	Flussverkettungen	122
3.4	Bewegungsgleichung	125
3.4.1	Drehmomentenbildung	125
3.4.2	Drehbewegung	126
3.4.3	Trägheitsmomente	127
3.5	Einführung des Per-Unit-Systems	130
3.6	Park'sche Gleichungen in bezogenen Größen	134
3.7	Steigerung der Modellgenauigkeit	140
3.8	Stationärer Betrieb der Synchronmaschine	142
3.8.1	Startwerte zur Simulation der Park'schen Gleichungen	142
3.8.2	Zeigerdiagramm der Synchronmaschine	144
4	Quasistationäre Betriebszustände	147
4.1	Kurzschluss	147
4.2	Transienter Kurzschlussstrom	150
4.3	Subtransienter Kurzschlussstrom	158
4.4	Kurzschlussstromverlauf	162
4.5	Lastschaltungen	166
4.6	Unsymmetrische Belastung	170
4.7	Statische Stabilitätsgrenze	171
5	Lösung der Park'schen Gleichungen	177
5.1	Maschine ohne Dämpferwicklung	177
5.1.1	Entstehung des Gleichstromglieds ($R_a=0; R_f=0$)	179
5.1.2	Abklingen des Gleichstromglieds ($R_a\neq 0; R_f=0$)	181
5.1.3	Abklingendes Wechselstromglied ($R_a=0; R_f\neq 0$)	185
5.1.4	Vollständiger transienter Kurzschlussstrom ($R_a\neq 0; R_f\neq 0$)	188
5.2	Maschine mit Dämpferwicklung	191
5.2.1	Reaktanzoperatoren	191
5.2.2	Kurzschlussstrom	194
5.3	Bildung des Drehmoments	197
5.4	Energiebilanz	198
5.5	Vereinfachte Modelle der Synchronmaschine	203

5.5.1	Vernachlässigung des transformatorischen Effekts.	204
5.5.2	Effektivwertmodell.	207
5.6	Linearisiertes Modell.	213
5.7	Torsionsschwingungen.	216
5.7.1	Modell des Wellenstrangs.	216
5.7.2	Einfaches Modell.	219
5.7.3	Fehlerfortschaltung.	223
5.7.4	Genauere Untersuchungen.	225
5.8	Erzwungene Schwingungen.	226
6	Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung.	233
6.1	Wirkleistungsbereitstellung.	234
6.1.1	Dynamik der Kraftwerksblöcke.	235
6.1.2	Thermische Kraftwerke.	235
6.1.2.1	Prinzip des Kohlekraftwerks.	235
6.1.2.2	Dynamisches Verhalten der Komponenten.	236
6.1.2.3	Aufbau der Stellorgane und Regler.	239
6.1.2.4	Regelvorgang bei einem Lastsprung.	240
6.1.2.5	Gasturbinenkraftwerke.	242
6.1.2.6	Kernkraftwerke.	243
6.1.3	Wasserkraftwerke.	243
6.1.4	Regenerative Kraftwerke.	248
6.1.5	Energiespeicher.	248
6.1.6	Netzregelung.	249
6.1.6.1	Parallelbetrieb.	249
6.1.6.2	Leistungsregelung.	252
6.1.6.3	Verbundregelung.	253
6.2	Blindleistungsbereitstellung.	255
6.2.1	Blindleistungsbedarf.	255
6.2.2	Synchronmaschine als Blindleistungserzeuger.	261
6.2.3	Statische Kompensatoren.	262
6.2.4	Wirkleistungssteuerung.	265
6.2.5	Stufentransformatoren.	266
6.2.6	Serienkompensation.	271
6.2.7	Hochspannungsgleichstromübertragung HGÜ.	273
6.3	Verbesserung der transienten Stabilität.	274
6.3.1	Variation der Reaktanz.	275
6.3.2	Parallelkompensation.	277
6.3.3	Geschaltete Widerstände.	278
6.3.4	Transformator mit Stufensteller.	281
6.3.5	Static Synchronous Compensator STATCOM.	283
6.3.6	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ.	285

6.4	Verbesserung der statischen Stabilität	286
6.5	Pendeldämpfung	287
6.5.1	Leistungssteuerung	288
6.5.2	Reaktanzsteuerung	292
6.5.3	Widerstandsteuerung	294
6.5.4	Steuerung der Transformatorstufenstellung	294
6.5.5	Steuerung des STATCOM	295
6.6	Optimale Dämpfungsstrategie	295
6.6.1	Probleme der Dämpfungsregelung	295
6.6.2	Dämpfungsoptimaler Regler	298
6.6.3	Zeitoptimaler Regler	299
6.6.4	Dämpfung nach <i>Ljapunov</i>	303
6.7	Spannungsregler	304
6.8	Dämpferwicklungen	310
7	Asynchronmaschinen	313
7.1	Einfache Asynchronmaschine	313
7.2	Hochlaufvorgang	317
7.3	Variabler Läuferwiderstand	320
7.4	Dynamisches Verhalten der Asynchronmaschine	322
7.5	Sammelschienenumschaltung	324
8	Mehrmaschinenprobleme	329
8.1	Kupplungsmatrix	329
8.2	Ersatznetze	333
8.2.1	Statische Ersatznetze	333
8.2.2	Dynamische Ersatznetze	337
8.2.2.1	Eigenbewegungen	338
8.2.2.2	Ordnungsreduktion	341
8.2.2.3	Kohärente Schwingungen	343
8.3	Integrationsverfahren	345
8.3.1	Eigenwertbetrachtungen	345
8.3.2	Numerische Integration	346
8.3.3	Implizite Verfahren	350
8.3.4	Trapezregel	352
8.3.5	Runge-Kutta-Verfahren	353
8.3.6	Nichtlineare Differenzialgleichungen	353
8.3.7	Kopplung der Integrationsverfahren	354
8.3.8	Differenzenleitwertverfahren	356
8.3.8.1	Induktivität	357
8.3.8.2	Ohmsch-induktiver Kreis	358
8.3.8.3	Erweiterung auf größere Systeme	359

8.3.8.4	Behandlung der Zweige	360
8.3.8.5	Anwendung	361
8.3.8.6	Kopplung des Differenzenleitwertverfahrens	362
8.4	Lastfluss und Stabilität	363
8.4.1	Spannungsstabilität	363
8.4.1.1	Stromiteration	363
8.4.1.2	Spannungsregelung	365
8.4.1.3	Spannungskollaps	367
8.4.2	Winkelstabilität	369
8.4.2.1	Lang gestreckte Netze	369
8.4.2.2	Vermaschte Netze	371
8.4.2.3	Stabilitätsindex	372
8.4.3	Lastfluss	379
9	Anhang	385
9.1	Maschinendaten	385
9.2	Hinweis auf das Programm EMTP-ATP	389
9.3	Hinweis auf das Programm Netomac	390
10	Literaturverzeichnis	393
11	Bezeichnungen	405
11.1	Formelzeichen	405
11.2	Indizes	412
11.3	Schreibweisen	416
11.4	Kennzeichnungen	416
12	Stichwortverzeichnis	419