

# Inhalt

Vorwort.....	5
<b>1</b>	<b>Verhalten von Netzen.....</b> 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	Einzugbereich..... 70
1.4.12	Kritische Kurzschlusszeit..... 74
1.4.13	Anwendung des Einzugbereichs..... 75
1.5	Stabilitätsbegriffe..... 80
<b>2</b>	<b>Diagonaltransformation.....</b> 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 $h\alpha q$ nach <i>Park</i> .....	107
2.7	Raumzeigerkomponenten $h\alpha z$ nach <i>Kovács</i> .....	112
2.8	Anwendung der Komponenten.....	115
<b>3</b>	<b>Beschreibungsgleichungen der Synchronmaschinen</b> .....	<b>117</b>
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
<b>4</b>	<b>Quasistationäre Betriebszustände</b> .....	<b>147</b>
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
<b>5</b>	<b>Lösung der Park'schen Gleichungen</b> .....	<b>177</b>
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
<b>6</b>	<b>Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung .....</b>	<b>233</b>
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
<b>7</b>	<b>Asynchronmaschinen .....</b>	<b>313</b>
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
<b>8</b>	<b>Mehrmaschinenprobleme .....</b>	<b>329</b>
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	<b>Anhang</b> .....	<b>385</b>
9.1	Maschinendaten .....	385
9.2	Hinweis auf das Programm EMTP-ATP .....	389
9.3	Hinweis auf das Programm Netomac .....	390
10	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>393</b>
11	<b>Bezeichnungen</b> .....	<b>405</b>
11.1	Formelzeichen .....	405
11.2	Indizes .....	412
11.3	Schreibweisen .....	416
11.4	Kennzeichnungen .....	416
12	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>419</b>