

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Modellierung von Energieversorgungsnetzen	5
2.1	Modellierung der Generatoren	5
2.1.1	Zerlegung in orthogonale Komponenten	8
2.1.2	0dq-Transformation	9
2.2	Modellierung der Netzeinspeisungen	11
2.2.1	Zerlegung in orthogonale Komponenten	13
2.2.2	0dq-Transformation	13
2.3	Modellierung der Transformatoren	14
2.4	Modellierung der Freileitungen und Kabel	16
2.5	Modellierung der Lasten als R,L-Impedanzen	17
3	Grundlegende Betrachtungen zur minimalen Zustandsform	19
3.1	Torimpedanz- und Toradmittanzmatrix	20
3.2	Minimale Zustandsform für R,L,C-modellierte Netze	24
3.3	Kopplung der Zustandsformen von Teilnetzen	31
4	Formulierung numerisch stabiler Algorithmen	35
4.1	Bestimmung der reellen Nullstellen	36
4.2	Bestimmung der komplexen Nullstellen	38
4.3	Bestimmung der Partialbruchzerlegung	43
4.4	Eigenwertspektren und Zustandsformen von Energieversorgungsnetzen	43
5	Stationäre Berechnung	49
5.1	Transformation des passiven RST-Netzes	50
5.1.1	Zerlegung in orthogonale Komponenten	51
5.1.2	0dq-Transformation	53
5.2	Beschaltung der Tore des passiven Netzes	54
5.2.1	Anschluss von Betriebsmitteln	55

5.2.2	Realisierung von Zustandsänderungen	58
5.3	Lösung des resultierenden Gleichungssystems	60
5.3.1	Trust-Region-Dogleg-Verfahren	61
5.3.2	Skalierung der Jacobi-Matrix	64
5.4	Bestimmung von Lastwinkeln und Erregerspannungen der zugehörigen Generatoren	66
5.5	Vergleich mit anderen Lastflussprogrammen	67
5.5.1	Vergleich für R,L-modellierte Netze	68
5.5.2	Vergleich für R,L,C-modellierte Netze	68
6	Transiente Berechnung	73
6.1	Aufstellen der Modellgleichungen	74
6.2	Lösung mithilfe des Floquet-Theorems	77
6.2.1	Bestimmung der zugehörigen stationären Lösung	78
6.2.2	Bestimmung der zugehörigen homogenen Lösung	79
6.2.3	Berücksichtigung von Ein- und Ausschaltvorgängen	85
6.3	Lösung mithilfe der Odq-Transformation	90
6.3.1	Odq-Transformation des Differenzialgleichungssystems	90
6.3.2	Bestimmung der zugehörigen stationären Lösung	95
6.3.3	Bestimmung der zugehörigen homogenen Lösung	95
6.3.4	Berücksichtigung von Ein- und Ausschaltvorgängen	96
6.4	Verifikation und Vergleich der beiden Verfahren	98
6.4.1	Vergleich der Verfahren untereinander und mit dem SimPowerSystem	99
6.4.2	Benötigte Rechenzeiten	110
7	Berechnung von elektromechanischen Schwingungen	113
7.1	Elektromechanische Modellierung von Synchronmaschinen	113
7.1.1	Ableitung der mechanischen Differenzialgleichung	113
7.1.2	Berechnung des elektrischen Momentes	116
7.1.3	Kopplung des elektrischen und mechanischen Systems	119
7.2	Vergleich mit numerischen Methoden	123
7.2.1	Vergleich für ein 4 Knotenpunktnetz	123
7.2.2	Vergleich für ein 10 Knotenpunktnetz	129
7.2.3	Vergleich für ein 50 Knotenpunktnetz	131
7.2.4	Benötigte Rechenzeiten	136
8	Inter-Area-Schwingungen in Energieversorgungsnetzen	139
8.1	Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen	139
8.2	Anregung elektromechanischer Schwingungen	143
8.3	Anregung und Entdämpfung von Inter-Area-Schwingungen	151

8.3.1	Einfluss der Betriebskapazitäten von Freileitungen	156
8.3.2	Untersuchung weiterer Einflussparameter auf das Dämpfungsverhalten	161
8.4	Reduktion auf ein 9 Knotenpunktnetz	165
8.4.1	Untersuchung weiterer Einflussparameter auf das Dämpfungsverhalten	173
8.5	Weitere Netzverkleinerung	177
9	Zusammenfassung und Ausblick	183
	Literaturverzeichnis	189
A	Generatordaten	195
B	Eigenschaften der modifizierten Knotenadmittanzmatrix	201
C	Modifizierte Müller-Methode	215
D	Struktur der Wechselstrom- und Kopplungsmatrix	219
E	Daten der verwendeten Netze	225
	Stichwortverzeichnis	252