

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Dreiphasige transiente Modellierung von Betriebsmitteln	3
2.1	Leistungstransformatoren	3
2.1.1	Grundsätzliche Vorgehensweise	3
2.1.1.1	Aufstellung der Induktivitätsmatrix	4
2.1.1.2	Berechnung der induktiven Modellparameter	7
2.1.1.3	Bestimmung der Spulenwiderstände	10
2.1.1.4	Inversion der Impedanzmatrix	12
2.1.1.5	Berücksichtigung von Phasendrehungen	14
2.1.2	Zwe Wicklungstransformatoren	19
2.1.2.1	Umspanner mit der Schaltgruppe YNyn	19
2.1.2.2	Umspanner mit Dreieckwicklung	28
2.1.2.3	Verallgemeinerung der Sternpunktbehandlung	32
2.1.2.4	Spartransformator	37
2.1.3	Mehrwicklungstransformatoren	43
2.1.3.1	Umspanner mit Ausgleichwicklung	43
2.1.3.2	Umspanner mit Zickzackwicklung	53
2.1.3.3	Umspanner mit Zickzack- sowie Ausgleichwicklung	64
2.1.3.4	Dre Wicklungstransformatoren mit Stern- und Dreieckwicklungen	72
2.1.3.5	Spartransformator in zwei Ausführungen	82
2.1.3.6	Transformator mit Schrägeinstellung	93
2.1.4	Klassifikation der Verknüpfungsmatrizen	107
2.2	Freileitungen	108
2.2.1	Modellierung ohne Erdseil	109
2.2.1.1	Aufstellung der Induktivitätsmatrix	109
2.2.1.2	Aufstellung der Impedanzmatrix	113

	2.2.1.3	Aufstellung der Admittanzmatrix	113
	2.2.1.4	Berechnung der Parameter	114
	2.2.2	Berücksichtigung eines einzelnen Erdseils	117
	2.2.3	Berücksichtigung zweier Erdseile	121
	2.2.4	Verdrillte Freileitungen	124
2.3	Lasten		126
	2.3.1	Lasten mit geerdetem Sternpunkt	126
	2.3.2	Lasten mit freiem Sternpunkt	127
2.4	Kapazitäten		128
	2.4.1	Kapazitäten von Transformatoren	129
	2.4.2	Kapazitäten von Freileitungen	130
	2.4.3	Leistungskondensatoren	131
3	Dreiphasige transiente Tormatrizen von Energieversorgungsnetzen		133
3.1	Dreiphasige transiente Knotenadmittanzmatrix		133
3.2	Torimpedanzmatrix		136
	3.2.1	Berechnung der Polstellen	137
		3.2.1.1 Intervallschachtelung	138
		3.2.1.2 Muller-Methode	140
	3.2.2	Bestimmung der zu einfachen Nullstellen gehörigen Koeffizientenmatrizen	145
	3.2.3	Bestimmung der zu mehrfachen Nullstellen gehörigen Koeffizientenmatrizen	147
3.3	Toradmittanzmatrix		150
	3.3.1	Herleitung der Berechnungsmethode	151
		3.3.1.1 Netze ohne Typ-U-Transformatoren	152
		3.3.1.2 Hinzufügen von Betriebsmittelmatrizen	156
	3.3.2	Konkrete Berechnung	157
3.4	Torhybridmatrizen		159
	3.4.1	Unterschiedliche Herleitungen	159
	3.4.2	Gemeinsames Ergebnis	163
3.5	Symmetrische Netze		166
	3.5.1	Entkopplung durch Transformation der transienten Knotenadmittanzmatrix	167
	3.5.2	Getrennte Behandlung der entkoppelten Teilnetze	169
	3.5.3	Rücktransformation der zusammengesetzten Teilergebnisse	172

4	Aufstellung einer minimalen dreiphasigen Zustandsform	175
4.1	Ziel der Ausführungen	175
4.2	Zerlegung in Rang-1-Matrizen	176
4.3	Zerlegung von Rang-1-Matrizen	179
4.4	Aufstellung der die Zustandsform beschreibenden Matrizen .	180
4.5	Eigenschaften der Zustandsform	183
5	Numerische Überprüfung der vorgestellten Verfahren	185
5.1	Hilfsmittel zur Verifikation	185
5.1.1	Vergleich zweier Sätze von Nullstellen	186
5.1.2	Vergleich zweier Matrizen	187
5.2	Betrachtetes Demonstrationsbeispielnetz	188
5.3	Berechnung der transienten Tormatrizen für das Beispielnetz	190
5.3.1	Verifikation der Torimpedanzmatrix	190
5.3.2	Verifikation der Toradmittanzmatrix	192
5.3.3	Verifikation zweier Torhybridmatrizen	194
5.4	Berechnung der Zustandsform für das Beispielnetz	196
5.5	Vollständige Symmetrierung des Beispielnetzes	197
6	Anwendungsbeispiele	201
6.1	Erdschlusskompensation	201
6.1.1	Beschränkungen der einphasigen Modellierung	201
6.1.2	Dreiphasige Modellierung	204
6.2	Modellierung eines Höchstspannungsnetzes	212
6.3	Berechnung einer Einschwingspannung	219
7	Zusammenfassung und Ausblick	223
	Schrifttumsverzeichnis	225
	Sachregister	229

