

Inhaltsverzeichnis

1	Symmetrische Komponenten und Raumzeiger	1
1.1	Modaltransformation	1
1.2	Symmetrische Komponenten	6
1.3	Raumzeiger	10
1.3.1	Raumzeigerkomponenten in ruhenden Koordinaten	10
1.3.2	Raumzeigerkomponenten in rotierenden Koordinaten	13
1.4	Zusammenhang zwischen Raumzeiger und Zeiger	16
2	Betriebsmittelgleichungen in Symmetrischen Komponenten	19
2.1	Leitungen	20
2.2	Transformatoren	27
2.2.1	Beziehungen zwischen den Wicklungsgrößen	27
2.2.2	Beziehungen zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen	30
2.2.3	Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten	35
2.2.4	Stromgleichungen für die Symmetrischen Komponenten ohne Übertrager	43
2.2.5	Bestimmung der Ersatzschaltungsparameter	49
2.3	Generatoren, Motoren und Ersatznetze	51
2.4	Nichtmotorische Lasten	54
3	Netzgleichungssysteme in Symmetrischen Komponenten	57
3.1	Zusammengefasste Darstellung der Betriebsmittelgleichungen	58
3.2	Knotenspannungs-Gleichungssysteme	60
3.2.1	Gleichungssystem für die Berechnung von Fehlern und der Netzdynamik	60
3.2.2	Gleichungssystem für die Leistungsflussberechnung	65
4	Leistungsflussberechnung	69
4.1	Knotenspezifikation	69
4.2	Knotenpunktverfahren	70
4.3	Newtonverfahren	73

4.4	Berechnung unsymmetrischer Leistungsflüsse	79
4.4.1	Knotenpunktverfahren	86
4.4.2	Newtonverfahren	88
4.4.3	Fehlermatrizenverfahren	90
5	Berechnung von Einfach- und Doppelfehlern	99
5.1	Fehlerarten	99
5.2	Fehlerbedingungen	100
5.3	Fehlerbedingungen in Symmetrischen Komponenten	103
5.4	Berechnung von Einfachquerfehlern	112
5.4.1	Dreipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung	118
5.4.2	Einpoliger Erdkurzschluss oder Erdschluss	119
5.4.3	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung	121
5.4.4	Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung	123
5.5	Berechnung von Einfachlängsfehlern	124
5.5.1	Dreipolige Unterbrechung	128
5.5.2	Zweipolige Unterbrechung	129
5.5.3	Einpolige Unterbrechung	130
5.6	Berechnung von Doppelfehlern	133
5.7	Überlagerungsverfahren	140
5.7.1	Berechnung von Kurzschlüssen nach dem Überlagerungsverfahren	142
5.7.2	Berechnung von Unterbrechungen nach dem Überlagerungsverfahren	150
6	Fehlermatrizenverfahren	157
6.1	Fehlermatrizen	157
6.2	Fehlermatrizen in Symmetrischen Komponenten	160
6.3	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Knotenadmittanzmatrix	165
6.4	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Knotenimpedanzmatrix	172
6.5	Nachbildung von Kurzschlüssen auf Leitungen	174
6.6	Abschalten von Leitungen und Transformatoren	177
6.7	Abschalten von kurzschlussbehafteten Leitungen	183
6.8	Abschalten von Generatoren, Motoren und Lasten	184
6.9	Berücksichtigung von Unsymmetriezuständen	185
6.10	Zusammenfassung des Berechnungsablaufs für Kurzschlüsse und Unterbrechungen sowie Unsymmetrien	190
6.11	Anwendung des Fehlermatrizenverfahrens zur Kurzschlussstromberechnung nach IEC und DIN EN 60909-0	191
7	Berechnung quasistationärer Vorgänge	199
7.1	Algebro-Differentialgleichungssystem	200
7.1.1	Netzgleichungen	200

- 7.1.2 Differentialgleichungen der Generatoren 201
- 7.1.3 Differentialgleichungen der Motoren 202
- 7.2 Berechnung der transienten Stabilität 202
- 8 Betriebsmittelgleichungen in Raumzeigerkomponenten 217**
 - 8.1 Allgemeine Formen 217
 - 8.2 Leitungen 223
 - 8.2.1 Gleichungen der induktiven und kapazitiven Leitungsabschnitte . 223
 - 8.2.2 Leitungsmodell ohne Querglieder 225
 - 8.2.3 Leitungsmodell als T-Glied 227
 - 8.2.4 Leitungsmodell als T-Kettenschaltung 228
 - 8.2.5 Leitungsmodell als Π -Glied 230
 - 8.2.6 Leitungsmodell als Π -Kettenschaltung 230
 - 8.2.7 Anfangswerte für die Zustandsgrößen 231
 - 8.3 Transformatoren 233
 - 8.3.1 Zustandsgleichungen des Einphasentransformators 233
 - 8.3.2 Zustandsgleichungen für die Wicklungsgrößen der Drehstromtransformatoren 234
 - 8.3.3 Beziehungen zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen . . . 236
 - 8.3.4 Zustandsgleichungen und modifizierte Stromgleichungen für die Schaltgruppen $Yy0$, $Yd5$ und $Dy5$ 238
 - 8.3.5 Anfangswerte für die Zustandsvariablen 243
 - 8.4 Synchrongeneratoren 244
 - 8.4.1 Gleichungssystem in $dq0$ -Koordinaten 244
 - 8.4.2 Transientes Modell mit Raumzeigern für die Ständergrößen . . . 246
 - 8.4.3 Anfangswerte für die Zustandsgrößen 252
 - 8.4.4 Quasistationäres Modell mit subtransienter Spannung 254
 - 8.4.5 Quasistationäres Modell mit konstanter transienter Spannung . . . 262
 - 8.4.6 Stationäres Modell mit Polradspannung 264
 - 8.4.7 Berechnung der Modellparameter aus den Maschinenparametern 265
 - 8.5 Asynchronmaschinen 267
 - 8.5.1 Allgemeines Gleichungssystem mit Raumzeigern 267
 - 8.5.2 Transientes Modell mit Raumzeigern in Ständerkoordinaten . . . 268
 - 8.5.3 Anfangswerte für die Raumzeiger 270
 - 8.5.4 Quasistationäres Modell mit transienter Spannung 271
 - 8.5.5 Stationäres Modell 273
 - 8.5.6 Berechnung der Modellparameter aus den Maschinendaten 276
 - 8.6 Nichtmotorische Lasten 277
- 9 Erweitertes Knotenpunktverfahren 283**
 - 9.1 Klemmgleichungen der Betriebsmittel 284
 - 9.2 Knotenspezifikation und Knotenpunktsätze 284

9.3	Netzgleichungssysteme des EKPV	286
9.3.1	Gleichungssystem für ein L-C-Netz	289
9.3.2	Gleichungssystem für ein L-Netz	295
9.3.3	Gleichungssystem für ein C-Netz	298
9.4	Berechnung der Netzeigenwerte nach dem EKPV	298
10	Fehlermatrizenverfahren in Raumzeigerkomponenten	303
10.1	Fehlerbedingungen und Fehlermatrizen	303
10.2	Nachbildung von Kurzschlüssen an L- und R-Knoten	306
10.3	Nachbildung von Kurzschlüssen an C-Knoten	315
10.4	Nachbildung von Unterbrechungen an Betriebsmitteln	319
11	Netzzustandsschätzung	325
11.1	Messwerte und Messfehler	326
11.2	Gleichungssystem zur Bestimmung des Zustandsvektors	328
11.3	Messmodell	330
Anhang	337
A.1	MATLAB-Programme Leistungsflussberechnung	337
A.2	MATLAB-Programm Fehlermatrizenverfahren	349
A.3	Ergänzung zu den Fehlermatrizen	352
A.4	Impedanzen von Einleiterkabeln mit Cross-Bonding	354
Formelzeichen und Nebenzeichen	359
Literatur	363
Sachverzeichnis	365