

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