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 Klemmengleichungen 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