

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Symmetrische Komponenten und Raumzeiger .....</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | Modaltransformation .....  | 1         |
| 1.2      | Symmetrische Komponenten .....   | 6         |
| 1.3      | Raumzeiger .....   | 9         |
| 1.3.1    | Raumzeigerkomponenten in ruhenden Koordinaten .....                          | 9         |
| 1.3.2    | Raumzeigerkomponenten in rotierenden Koordinaten .....                       | 12        |
| 1.4      | Zusammenhang zwischen Raumzeiger und Zeiger .....                            | 15        |
| <b>2</b> | <b>Betriebsmittelgleichungen in Symmetrischen Komponenten .....</b>          | <b>19</b> |
| 2.1      | Leitungen .....  | 19        |
| 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<br>ohne Übertrager .....  | 43        |
| 2.2.5    | Bestimmung der Ersatzschaltungsparameter .....                               | 50        |
| 2.3      | Generatoren, Motoren und Ersatznetze .....                                   | 50        |
| 2.4      | Nichtmotorische Lasten .....   | 54        |
| <b>3</b> | <b>Netzgleichungssysteme in Symmetrischen Komponenten .....</b>              | <b>57</b> |
| 3.1      | Zusammengefasste Darstellung der Betriebsmittelgleichungen .....             | 57        |
| 3.2      | Knotenspannungs-Gleichungssysteme .....                                      | 59        |
| 3.2.1    | Gleichungssystem für die Berechnung von Fehlern und<br>der Netzdynamik ..... | 60        |
| 3.2.2    | Gleichungssystem für die Leistungsflussberechnung .....                      | 64        |
| <b>4</b> | <b>Leistungsflussberechnung .....</b>  | <b>67</b> |
| 4.1      | Knotenspezifikation .....  | 67        |
| 4.2      | Knotenpunktverfahren .....   | 68        |
| 4.3      | Newtonverfahren .....  | 70        |
| <b>5</b> | <b>Berechnung von Einfach- und Doppelfehlern .....</b>                       | <b>77</b> |
| 5.1      | Fehlerarten .....  | 77        |
| 5.2      | Fehlerbedingungen .....  | 78        |
| 5.3      | Fehlerbedingungen in Symmetrischen Komponenten .....                         | 81        |
| 5.4      | Berechnung von Einfachquerfehlern .....                                      | 91        |
| 5.4.1    | Dreipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung .....                      | 97        |
| 5.4.2    | Einpoliger Erdkurzschluss oder Erdschluss .....                              | 98        |
| 5.4.3    | Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung .....                               | 100       |
| 5.4.4    | Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung .....                              | 102       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.5      | Berechnung von Einfachlängsfehlern .....   | 104        |
| 5.5.1    | Dreipolige Unterbrechung .....   | 107        |
| 5.5.2    | Zweipolige Unterbrechung .....   | 108        |
| 5.5.3    | Einpolige Unterbrechung .....  | 110        |
| 5.6      | Berechnung von Doppelfehlern .....   | 113        |
| 5.7      | Überlagerungsverfahren .....   | 119        |
| 5.7.1    | Berechnung von Kurzschlüssen nach dem Überlagerungsverfahren .....   | 120        |
| 5.7.2    | Berechnung von Unterbrechungen nach dem Überlagerungsverfahren ...   | 128        |
| <b>6</b> | <b>Fehlermatrizenverfahren .....</b>   | <b>135</b> |
| 6.1      | Fehlermatrizen .....   | 135        |
| 6.2      | Fehlermatrizen in Symmetrischen Komponenten .....  | 138        |
| 6.3      | Nachbildung von Kurzschlüssen an der Knotenadmittanzmatrix .....   | 142        |
| 6.4      | Nachbildung von Kurzschlüssen an der Knotenimpedanzmatrix .....  | 150        |
| 6.5      | Nachbildung von Kurzschlüssen auf Leitungen .....  | 152        |
| 6.6      | Abschalten von Leitungen und Transformatoren .....   | 155        |
| 6.7      | Abschalten von kurzschlussbehafteten Leitungen .....   | 161        |
| 6.8      | Abschalten von Generatoren, Motoren und Lasten .....   | 161        |
| 6.9      | Berücksichtigung von Unsymmetriezuständen .....  | 162        |
| 6.10     | Zusammenfassung des Berechnungsablaufs .....   | 167        |
| 6.11     | Anwendung des Fehlermatrizenverfahrens zur Kurzschlussstromberechnung<br>nach IEC und DIN EN 60909-0 ..... | 168        |
| <b>7</b> | <b>Berechnung quasistationärer Vorgänge .....</b>  | <b>175</b> |
| 7.1      | Algebro-Differentialgleichungssystem .....   | 175        |
| 7.1.1    | Netzgleichungen .....  | 176        |
| 7.1.2    | Differentialgleichungen der Generatoren .....  | 177        |
| 7.1.3    | Differentialgleichungen der Motoren .....  | 177        |
| 7.2      | Berechnung der transienten Stabilität .....  | 179        |
| <b>8</b> | <b>Betriebsmittelgleichungen in Raumzeigerkomponenten .....</b>  | <b>193</b> |
| 8.1      | Allgemeine Formen .....  | 193        |
| 8.2      | Leitungen .....  | 199        |
| 8.2.1    | Gleichungen der induktiven und kapazitiven Leitungsabschnitte .....  | 199        |
| 8.2.2    | Leitungsmodell ohne Querglieder .....  | 201        |
| 8.2.3    | Leitungsmodell als T-Glied .....   | 203        |
| 8.2.4    | Leitungsmodell als T-Kettenschaltung .....   | 204        |
| 8.2.5    | Leitungsmodell als $\Pi$ -Glied .....  | 205        |
| 8.2.6    | Leitungsmodell als $\Pi$ -Kettenschaltung .....  | 206        |
| 8.2.7    | Anfangswerte für die Zustandsgrößen .....  | 207        |
| 8.3      | Transformatoren .....  | 208        |
| 8.3.1    | Zustandsgleichungen des Einphasentransformators .....  | 209        |
| 8.3.2    | Zustandsgleichungen für die Wicklungsgrößen<br>der Drehstromtransformatoren .....                          | 209        |
| 8.3.3    | Beziehungen zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen .....  | 211        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 8.3.4     | Zustandsgleichungen und modifizierte Stromgleichungen<br>für die Schaltgruppen Yy0, Yd5 und Dy5 ..... | 213        |
| 8.3.5     | Anfangswerte für die Zustandsvariablen .....  | 218        |
| 8.4       | Synchrongeneratoren .....   | 219        |
| 8.4.1     | Gleichungssystem in dq0-Koordinaten .....   | 219        |
| 8.4.2     | Transientes Modell mit Raumzeigern für die Ständergrößen .....  | 221        |
| 8.4.3     | Anfangswerte für die Zustandsgrößen .....   | 226        |
| 8.4.4     | Quasistationäres Modell mit subtransienter Spannung .....   | 227        |
| 8.4.5     | Quasistationäres Modell mit konstanter transienter Spannung .....                                     | 234        |
| 8.4.6     | Stationäres Modell mit Polradspannung .....   | 236        |
| 8.4.7     | Berechnung der Modellparameter aus den Maschinenparametern .....                                      | 237        |
| 8.5       | Asynchronmaschinen .....  | 239        |
| 8.5.1     | Allgemeines Gleichungssystem mit Raumzeigern .....  | 240        |
| 8.5.2     | Transientes Modell mit Raumzeigern in Ständerkoordinaten .....  | 240        |
| 8.5.3     | Anfangswerte für die Raumzeiger .....   | 242        |
| 8.5.4     | Quasistationäres Modell mit transienter Spannung .....  | 243        |
| 8.5.5     | Stationäres Modell .....  | 245        |
| 8.5.6     | Berechnung der Modellparameter aus den Maschinendaten .....   | 248        |
| 8.6       | Nichtmotorische Lasten .....  | 249        |
| <b>9</b>  | <b>Erweitertes Knotenpunktverfahren .....</b>   | <b>255</b> |
| 9.1       | Klemmengleichungen der Betriebsmittel .....   | 255        |
| 9.2       | Knotenspezifikation und Knotenpunktsätze .....  | 256        |
| 9.3       | Netzgleichungssysteme des EKPV .....  | 257        |
| 9.3.1     | Gleichungssystem für ein L-C-Netz .....   | 261        |
| 9.3.2     | Gleichungssystem für ein L-Netz .....   | 266        |
| 9.3.3     | Gleichungssystem für ein C-Netz .....   | 270        |
| 9.4       | Berechnung der Netzeigenwerte nach dem EKPV .....   | 270        |
| <b>10</b> | <b>Fehlermatrizenverfahren in Raumzeigerkomponenten .....</b>   | <b>275</b> |
| 10.1      | Fehlerbedingungen und Fehlermatrizen .....  | 275        |
| 10.2      | Nachbildung von Kurzschlüssen an L- und R-Knoten .....  | 277        |
| 10.3      | Nachbildung von Kurzschlüssen an C-Knoten .....   | 286        |
| 10.4      | Nachbildung von Unterbrechungen an Betriebsmitteln .....  | 290        |
| <b>11</b> | <b>Netzzustandsschätzung .....</b>  | <b>295</b> |
| 11.1      | Messwerte und Messfehler .....  | 296        |
| 11.3      | Messmodell .....  | 299        |
| A.1       | MATLAB-Programm Leistungsflussberechnung .....  | 307        |
| A.2       | MATLAB-Programm Fehlermatrizenverfahren .....   | 311        |
| A.3       | Ergänzung zu den Fehlermatrizen .....   | 315        |
|           | Formelzeichen und Nebenzeichen .....  | 318        |
|           | Literatur .....   | 321        |
|           | Sachwortverzeichnis .....   | 322        |