

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Formelzeichen . . . . .                                | IX        |
| Abkürzungen . . . . .                                  | XI        |
| Indizes . . . . .                                      | XII       |
| Nebenzeichen, oben rechts, links . . . . .             | XIII      |
| Nationale und internationale Gremien . . . . .         | XIII      |
| <b>1 Einleitung</b>                                    | <b>1</b>  |
| <b>2 Begriffe und Definitionen</b>                     | <b>3</b>  |
| <b>3 Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms</b>      | <b>5</b>  |
| <b>4 Einteilung der Kurzschlussarten</b>               | <b>9</b>  |
| <b>5 Methoden zur Kurzschlussberechnung</b>            | <b>11</b> |
| 5.1 Überlagerungsverfahren . . . . .                   | 11        |
| 5.2 Ersatzspannungsquelle . . . . .                    | 13        |
| 5.3 Berechnung mit Bezugsgrößen . . . . .              | 16        |
| <b>6 Allgemeines zu DIN EN 60909-0 (VDE 0102)</b>      | <b>19</b> |
| <b>7 Die Bedeutung von DIN EN 60909-0</b>              | <b>21</b> |
| <b>8 Versorgungsnetze</b>                              | <b>25</b> |
| 8.1 Berechnungsgrößen für Versorgungsnetze . . . . .   | 25        |
| 8.2 Einseitig gespeiste Leitung . . . . .              | 25        |
| 8.3 Strahlennetz . . . . .                             | 26        |
| 8.4 Ringnetz . . . . .                                 | 27        |
| 8.5 Maschennetz . . . . .                              | 27        |
| <b>9 Netzformen bei der Kurzschlussstromberechnung</b> | <b>29</b> |
| 9.1 Netzformen für die Niederspannung . . . . .        | 29        |
| 9.2 Netzformen für die Mittelspannung . . . . .        | 31        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 9.3       | Netzformen für die Hochspannung . . . . .                                   | 35         |
| <b>10</b> | <b>Systeme bis 1 kV . . . . .</b>   | <b>39</b>  |
| 10.1      | TN-System . . . . .   | 39         |
| 10.2      | Berechnung des Fehlerstroms in der Praxis . . . . .                         | 40         |
| 10.3      | TT-System . . . . .   | 43         |
| 10.4      | IT-System . . . . .   | 45         |
| <b>11</b> | <b>Umwandlung der Netzformen . . . . .</b>                                  | <b>47</b>  |
| 11.1      | Schaltungen . . . . .   | 47         |
| 11.2      | Einfach gespeistes Netz . . . . .   | 48         |
| 11.3      | Mehrfach gespeiste und vermaschte Netze . . . . .                           | 49         |
| <b>12</b> | <b>Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen . . . . .</b>                    | <b>51</b>  |
| 12.1      | Netze mit isoliertem, freiem Sternpunkt . . . . .                           | 53         |
| 12.2      | Netze mit Erdschlusskompensation . . . . .                                  | 54         |
| 12.3      | Netze mit niederohmiger Sternpunktbehandlung . . . . .                      | 57         |
| <b>13</b> | <b>Komplexe Rechnung . . . . .</b>  | <b>61</b>  |
| 13.1      | Rechenregel für komplexe Zahlen . . . . .                                   | 62         |
| 13.2      | Komplexe Berechnung eines Wechselstromkreises . . . . .                     | 63         |
| <b>14</b> | <b>Symmetrische Komponenten . . . . .</b>                                   | <b>65</b>  |
| 14.1      | Symmetrisches System . . . . .  | 65         |
| 14.2      | Symmetrierung und Entsymmetrierung . . . . .                                | 66         |
| 14.3      | Impedanzen der symmetrischen Komponenten . . . . .                          | 69         |
| <b>15</b> | <b>Impedanzen von Drehstrom-Betriebsmitteln . . . . .</b>                   | <b>73</b>  |
| 15.1      | Netzeinspeisungen . . . . .   | 74         |
| 15.2      | Generatoren . . . . .   | 76         |
| 15.3      | Transformatoren . . . . .   | 79         |
| 15.4      | Stelltransformatoren . . . . .  | 85         |
| 15.5      | Kabel und Freileitungen . . . . .   | 86         |
| 15.6      | Windkraftanlagen . . . . .  | 100        |
| 15.6.1    | Windkraftwerk mit Asynchrongenerator . . . . .                              | 101        |
| 15.6.2    | Windkraftwerk mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator                     | 102        |
| 15.6.3    | Windkraft mit Vollumrichter . . . . .                                       | 103        |
| 15.7      | Asynchronmaschinen . . . . .  | 103        |
| 15.8      | Kurzschlussstrom-Begrenzungs-drosselspulen . . . . .                        | 105        |
| 15.9      | Berücksichtigung von Kondensatoren<br>und nichtrotierenden Lasten . . . . . | 107        |
| 15.10     | Berücksichtigung von statischen Umrichtern . . . . .                        | 107        |
| <b>16</b> | <b>Impedanzkorrekturen . . . . .</b>  | <b>109</b> |
| 16.1      | Korrekturfaktor von Generatoren $K_G$ . . . . .                             | 109        |
| 16.2      | Kraftwerksblock $K_{KW}$ . . . . .  | 110        |
| 16.3      | Korrekturfaktor für Transformatoren $K_T$ . . . . .                         | 111        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>17 Berechnung der Kurzschlussströme</b>                                | <b>113</b> |
| 17.1 Dreipoliger Kurzschluss . . . . .                                    | 113        |
| 17.2 Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung . . . . .                   | 115        |
| 17.3 Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung . . . . .                  | 116        |
| 17.4 Einpoliger Erdkurzschluss . . . . .                                  | 118        |
| 17.5 Stoßkurzschlussstrom $i_p$ . . . . .                                 | 121        |
| 17.6 Ausschaltwechselstrom $I_b$ . . . . .                                | 124        |
| 17.7 Dauerkurzschlussstrom $I_k$ . . . . .                                | 127        |
| <b>18 Kurzschlüsse in Netzen</b>  | <b>129</b> |
| 18.1 Unvermaschte Netze . . . . .   | 129        |
| 18.2 Vermaschte Netze . . . . .   | 130        |
| <b>19 Berücksichtigung von Motoren</b>                                    | <b>131</b> |
| 19.1 Kurzschluss an den Klemmen eines Asynchronmotors . . . . .           | 131        |
| 19.2 Motorengruppen eingespeist über Zwe Wicklungs-Transformatoren<br>133 |            |
| 19.3 Motorengruppen, eingespeist über Transformatoren . . . . .           | 133        |
| <b>20 Mechanische und thermische Kurzschlussstromfestigkeit</b>           | <b>137</b> |
| 20.1 Mechanische Kurzschlussstromfestigkeit . . . . .                     | 137        |
| 20.2 Thermische Kurzschlussstromfestigkeit . . . . .                      | 140        |
| 20.3 Kurzschlussstrom-Begrenzung . . . . .                                | 142        |
| <b>21 Berechnungsgrößen für die Kurzschlussfestigkeit</b>                 | <b>147</b> |
| 21.1 Kurzschlussfestigkeit der MS-Schaltanlagen . . . . .                 | 147        |
| 21.2 Kurzschlussfestigkeit der NS-Schaltanlagen . . . . .                 | 148        |
| <b>22 Überstrom-Schutzeinrichtungen</b>                                   | <b>151</b> |
| 22.1 Sicherungen . . . . .  | 152        |
| 22.2 Leitungsschutzschalter . . . . .                                     | 156        |
| 22.3 Leistungsschalter . . . . .  | 157        |
| <b>23 Kurzschluss auf der NS-Seite eines Transformators</b>               | <b>161</b> |
| <b>24 Kurzschlussströme in Gleichstromanlagen</b>                         | <b>167</b> |
| 24.1 Widerstände von Leitungsabschnitten . . . . .                        | 168        |
| 24.2 Stromrichter . . . . .   | 170        |
| 24.3 Batterien . . . . .  | 171        |
| 24.4 Kondensatoren . . . . .  | 173        |
| 24.5 Gleichstrommotoren . . . . .   | 174        |
| <b>25 Lastflussberechnung</b>   | <b>177</b> |
| 25.1 Darstellung eines Energieversorgungsnetzes . . . . .                 | 177        |
| 25.2 Lastmodellierung . . . . .   | 178        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>26 Beispiele: Berechnung der Kurzschlussströme</b>                   | <b>181</b> |
| 26.1 Beispiel 1: Kenngrößen des Kurzschlussstroms . . . . .             | 181        |
| 26.2 Beispiel 2: Berechnung der Einschaltvor-<br>gänge . . . . .        | 181        |
| 26.3 Beispiel 3: Symmetrische Komponenten . . . . .                     | 183        |
| 26.4 Beispiel 4: Nachweis der Schutzmaßnahmen . . . . .                 | 183        |
| 26.5 Beispiel 5: Hausanschlusskasten . . . . .                          | 185        |
| 26.6 Beispiel 6: Parallelschaltung von Transformatoren . . . . .        | 187        |
| 26.7 Beispiel 7: Anschluss eines Motors . . . . .                       | 188        |
| 26.8 Beispiel 8: Berechnung eines Abgangs . . . . .                     | 190        |
| 26.9 Beispiel 9: Berechnung einer Industrieanlage . . . . .             | 192        |
| 26.10 Beispiel 10: Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms . . . . | 193        |
| 26.11 Beispiel 11: Vermaschtes Netz . . . . .                           | 196        |
| 26.12 Beispiel 12: Versorgung einer Fabrik . . . . .                    | 199        |
| 26.13 Beispiel 13: Berechnung mit Impedanzkorrekturen . . . . .         | 201        |
| 26.14 Beispiel 14: Berechnung mit Impedanzkorrekturen . . . . .         | 204        |
| 26.15 Beispiel 15: Anschluss eines Transformators . . . . .             | 206        |
| 26.16 Beispiel 16: Parallelschaltung von Motoren . . . . .              | 208        |
| 26.17 Beispiel 17: Nachweis der Kurzschlussfestigkeit . . . . .         | 210        |
| 26.18 Beispiel 18: Kurzschlussfestigkeit von HS- und MS-Anlagen . . .   | 212        |
| 26.19 Beispiel 19: Berechnung eines Generators . . . . .                | 224        |
| 26.20 Beispiel 20: Berechnung einer Windkraftanlage . . . . .           | 227        |
| 26.21 Beispiel 21: Berechnung mit p.u.-Größen . . . . .                 | 228        |
| <b>27 Berechnungs-Programme</b>   | <b>231</b> |
| 27.1 DigSILENT PowerFactory . . . . .                                   | 231        |
| 27.1.1 Berechnungsfunktionen . . . . .                                  | 232        |
| 27.1.2 Rechnerausstattung . . . . .                                     | 233        |
| 27.1.3 Studentenlizenzen und Demo-Versionen . . . . .                   | 233        |
| 27.2 SIMARIS design . . . . .   | 233        |
| 27.2.1 SIMARIS Planungstools . . . . .                                  | 234        |
| 27.2.2 SIMARIS für die Berechnung und Dimensionierung . . . .           | 234        |
| 27.2.3 Rechnerausstattung . . . . .                                     | 238        |
| 27.2.4 Weitere Planungstools . . . . .                                  | 238        |