

# 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 Bezugssgrößen . . . . .             | 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 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 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 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 Komplexe Rechnung</b>  | <b>61</b>  |
| 13.1 Rechenregel für komplexe Zahlen . . . . .                                   | 62         |
| 13.2 Komplexe Berechnung eines Wechselstromkreises . . . . .                     | 63         |
| <b>14 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 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-Begrenzungsdrosselpulen . . . . .                          | 105        |
| 15.9 Berücksichtigung von Kondensatoren<br>und nichtrotierenden Lasten . . . . . | 107        |
| 15.10 Berücksichtigung von statischen Umrichtern . . . . .                       | 107        |
| <b>16 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 Zweiwicklungs-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 Einschaltvorgänge . . . . .               | 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        |