

Elektrische Energieversorgung III

**Drehstrommaschinen
Sternpunktbehandlung
Kurzschlußströme**

Von Univ.-Professor Dr.-Ing. Gerhard Herold
Universität Erlangen-Nürnberg

2., überarbeitete und stark erweiterte Auflage

Mit 273 Bildern und 64 Tabellen

J. Schlembach Fachverlag

Inhaltsverzeichnis

9 Rotierende Drehstrommaschinen.....	1
9.1 Grundlegende Wirkungsweise.....	1
9.1.1 Drehzahlen rotierender elektrischer Drehfeldmaschinen.....	1
9.1.2 Drehmomentenbildung in einer Drehstrommaschine.....	2
9.1.2.1 Idealisierte Maschine.....	2
9.1.2.2 Abweichungen von den idealen Bedingungen.....	4
9.1.3 Leistungsbilanz von rotierenden Drehstrommaschinen.....	5
9.1.4 Induktivitäten und Flüsse von Einphasenwicklungen.....	8
9.1.4.1 Durchflutung einer Ankerspule.....	8
9.1.4.2 Hauptinduktivität einer Einphasenwicklung.....	9
9.1.4.3 Wicklungsfaktor.....	10
9.1.4.4 Streuinduktivitäten.....	11
9.1.5 Induktivitäten von Dreiphasenwicklungen..... ^J	13
9.1.5.1 Induktivitäten einer Dreiphasenwicklung.....	13
9.1.5.2 Induktivitäten und Flüsse zweier gekoppelter Dreiphasenwicklungen.....	15
9.1.5.3 Nullfeld.....	17
9.1.6 Spannungsgleichungen rotierender Drehstrommaschinen.....	19
9.1.6.1 Magnetisch isotrope Maschine.....	19
9.1.6.2 Maschinen mit mehreren Läuferwicklungen.....	20
9.1.6.3 Magnetisch anisotrope Maschinen.....	21
9.1.6.4 Wicklungskapazitäten.....	23
9.1.7 Leistung und Drehmoment einer Drehstrommaschine.....	24
9.1.8 Mechanische Bewegungsgleichungen.....	26
9.1.8.1 Mechanisches System mit einer konzentrierten Masse.....	26
9.1.8.2 Mechanisches System mit mehreren konzentrierten Massen.....	28
9.1.8.3 Umrechnung mechanischer Größen auf andere Drehzahlen.....	30
9.1.8.4 Typische Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinien von Arbeitsmaschinen.....	31
9.2 Drehstrommaschinen im stationären Betrieb.....	33
9.2.1 Mitsystem-Ersatzschaltungen der magnetisch isotropen Maschine.....	33
9.2.1.1 Spannungsgleichungen.....	33
9.2.1.2 Ersatzschaltung der Synchronmaschine.....	34

9.2.1.3 Ersatzschaltung der Asynchronmaschine im Mitsystem.....	35
9.2.2 Gegensystem-Ersatzschaltung der magnetisch isotropen Maschine.....	36
9.2.2.1 Spannungsgleichungen.....	36
9.2.2.2 Ersatzschaltung.....	36
9.2.2.3 Gegenimpedanz einer Synchronmaschine mit Dämpferwicklung.....	37
9.2.3 Beschreibung der Schenkelpolmaschine.....	38
9.2.3.1 Mitsystem der Schenkelpolmaschine.....	38
9.2.3.2 Gegensystem der Schenkelpolmaschine.....	40
9.2.4 Die lineare Synchronmaschine im stationären Betrieb.....	42
9.2.4.1 Stromortskurve der magnetisch isotropen Maschine.....	42
9.2.4.2 Leistungen der magnetisch isotropen Synchronmaschine.....	43
9.2.4.3 Betriebsbereich der magnetisch isotropen Maschine.....	45
9.2.4.4 Stromortskurve der Schenkelpolmaschine.....	47
9.2.4.5 Leistungen der Schenkelpolmaschine.....	48
9.2.5 Stationärer Betrieb der Synchronmaschine bei Sättigung.....	50
9.2.5.1 Ersatzschaltung bei Berücksichtigung der Sättigung.....	50
9.2.5.2 Dauerkurzschluß bei dreipoligem Klemmen-Kurzschluß.....	52
9.2.5.3 Dauerkurzschlußstrom bei dreipoligem äußeren Kurzschluß.....	53
9.2.5.4 Dauerkurzschlußstrom bei unsymmetrischen Kurzschlüssen.....	54
9.2.5.5 Erregerstrom im Normalbetrieb.....	56
9.2.5.6 Turbomaschine im stationären Betrieb.....	59
9.2.6 Die Asynchronmaschine im stationären Betrieb.....	61
9.2.6.1 Lineare Maschine ohne Stromverdrängung.....	61
9.2.6.2 Asynchronmaschine mit Stromverdrängung.....	67
9.2.6.3 Antriebsmotor einer Kesselspeisepumpe.....	70
9.2.6.4 Stationärer unsymmetrischer Betrieb der Asynchronmaschine.....	74
9.3 Ausgleichsvorgänge bei konstanter Drehzahl.....	77
9.3.1 Ausgleichsvorgänge in ohmisch-induktiven Stromkreisen.....	77
9.3.1.1 Ohmisch-induktiver Gleichstromkreis.....	77
9.3.1.2 Gleichstromerregung zweier gekoppelter, fest verbundener Wicklungen.....	81
9.3.1.3 Transformation der Erregerströme in ein ruhendes Koordinatensystem.....	85
9.3.1.4 Ohmisch-induktiver Drehstromkreis.....	86
9.3.2 Drehfeldmaschinen mit einer Läuferwicklung.....	89
9.3.2.1 Zustandsgleichungssystem der Maschine.....	89
9.3.2.2 Dreipoliger Kurzschluß eines Asynchronmotors.....	92
9.3.2.3 Unsymmetrische transiente Vorgänge.....	94

9.3.2.4	Transienter Verlauf der einpoligen Leiterunterbrechung der Asynchronmaschine...	96
9.3.2.5	Dreipolige Unterbrechung der Spannungsversorgung der Asynchronmaschine. . . .	98
9.3.3	Drehfeldmaschinen mit zwei Läuferwicklungen.....	103
9.3.3.1	Zustandsgleichung und Eigenwerte.....	103
9.3.3.2	Dreipoliger Kurzschluß einer Turbomaschine.....	103
9.3.3.3	Eigenwerte bei zweipoligem Klemmenkurzschluß.....	107
9.3.4	Kurzschluß eigenwerte der Schenkelpolmaschine.....	107
9.3.5	Prinzip der Konstanz des Flusses.....	108
9.3.5.1	Zustandsvariablentransformation für eine Maschine mit einer Läuferwicklung....	109
9.3.5.2	Läuferfluß beim dreipoligen Kurzschluß der Asynchronmaschine.....	110
9.3.5.3	Ersatzschaltung für den transienten Vorgang.....	112
9.3.5.4	Zustandsvariablentransformation für eine Maschine mit zwei Läuferwicklungen.	115
9.3.5.5	Läuferflüsse beim dreipoligen Kurzschluß des Turbogenerators.....	117
9.3.5.6	Wiederkehrende Spannung nach einem dreipoligen Kurzschluß.....	119
9.3.5.7	Ersatzschaltung für den subtransienten Vorgang.....	121
9.3.6	Anwendung der transienten Maschinen-Ersatzschaltungen.....	123
9.3.6.1	Dreipolige Kurzschlußströme von Turbomaschinen.....	123
9.3.6.2	Zeitlich veränderliche Maschinenreaktanz.....	126
9.3.6.3	Unsymmetrische Kurzschlüsse von Turbomaschinen.....	127
9.3.6.4	Transiente Kurzschlußströme eines Turbogenerators.....	130
9.3.6.5	Transiente Parameter einer Asynchronmaschine.....	133
9.3.6.6	Kurzschlüsse mit Gegenspannung.....	135
9.3.6.7	Unsymmetrische transiente Vorgänge mit Asynchronmaschinen.....	137
9.3.6.8	Transiente Spannungen nach einem stationären unsymmetrischen Zustand	140
9.3.6.9	Einpolige Leiterunterbrechung.....	141
9.3.7	Synchrongeneratoren bei kleinen Laständerungen.....	142
9.3.7.1	Normierte Maschinengleichungen.....	142
9.3.7.2	Stationärer Betrieb.....	145
9.3.7.3	Leerlauf der Maschine.....	145
9.3.7.4	Be- und Entlastung eines Generators..... [^]	147
9.3.7.5	Kapazitive Last.....	152
94	Elektromechanische Ausgleichsvorgänge.....	155
94.1	Anlauf von Asynchronmaschinen.....	155
94.1.1	Asynchronmaschinen als wichtige Abnehmer elektrischer Energie.....	155
94.1.2	Berechnung mit dem vollständigen Gleichungssystem.....	157
94.1.3	Vereinfachung der Berechnung.....	161
94.1.4	Stabilität laufender Asynchronmaschinen.....	163

9.4.1.5 Grundstruktur,, für die Untersuchung von Anlaufvorgängen.....	164,3
9.4.1.6 Abschätzung des maximal zulässigen Spannungsabstieges.....	165
9.4.2 Statische Stabilität von Synchronmaschinen.....	166
9.4.2.1 Beschreibungsebenen der Stabilität.....	166
9.4.2.2 Statische Stabilität der Synchronmaschine am starren Netz.....	166
9.4.2.3 Zwei- und Mehrmaschinenproblem der statischen Stabilität.....	170
9.4.2.4 Maßnahmen zur Erhöhung der statischen Stabilität.....	174
9.4.3 Transiente Stabilität von Synchronmaschinen.....	175
9.4.3.1 Luftspaltleistungen der Synchronmaschine.....	175
9.4.3.2 Vollständiges Zustandsgleichungssystem der Synchronmaschine.....	176
9.4.3.3 Transiente Stabilität der Synchronmaschine am starren Netz.....	176
9.4.3.4 Vereinfachung des Modells.....	179
9.4.3.5 Flächensatz.....	183
9.4.3.6 Transiente Stabilität des Mehrmaschinenproblems.....	186
9.4.3.7 Maßnahmen zur Verbesserung der transienten Stabilität.....	189
9.4.4 Pendelschwingungen von Drehstrommaschinen.....	190
9.4.4.1 Linearisierung der mechanischen Zustandsgleichungen einer Synchronmaschine	190
9.4.4.2 Pendelschwingungen von Asynchronmaschinen.....	191
9.4.4.3 Linearisierte Zustandsgleichung des Zweimaschinenproblems.....	192
9.4.4.4 Erzwungene Pendelschwingungen.....	193
9.4.4.5 Pendelschwingungen im Parallelbetrieb.....	195
9.4.4.6 Dynamische Stabilität von Synchronmaschinen.....	198
10 Sternpunktbehandlung in Drehstromsystemen.....	199
10.1 Stationäre Erd(kurz)schlußvorgänge..:	200
10.1.1 Sternpunktverlagerung in einem Drehstromsystem.....	200
10.1.1.1 Bestimmung der Nullspannung.....	200
10.1.1.2 Sternpunktverlagerung bei Erdschluß im Leiter R	202
10.1.1.3 Sternpunktverlagerung in einem unsymmetrischen Drehstromsystem.....	203
10.1.2 Einpoliger Erd(kurz)schluß im symmetrischen Drehstromsystem.....	205
10.1.2.1 Ersatzschaltung.....	205
10.1.2.2 Symmetrische Komponenten der Ströme und Spannungen.....	206
10.1.2.3 Leiter-Erde-Spannungen an der Fehlerstelle.....	207
10.1.2.4 Erdfehlerfaktor.....	208
10.1.2.5 Fehlerströme und Erdfehlerfaktoren bei Grenzwerten der Nullimpedanz ...	208

10.1.3 Zweipoliger Erdkurzschluß im symmetrischen Drehstromsystem.....	210
10.1.3.1 Fehlerbedingungen und Fehlergleichung.....	210
10.1.3.2 Symmetrische Spannungen und Ströme.....	211
10.1.3.3 Fehlerströme und -Spannungen.....	211
10.1.3.4 Grenzwerte der Fehler Spannungen und -ströme.....	212
10.1.4 Doppelerd(kurz)schluß im symmetrischen Drehstromsystem.....	213
10.1.4.1 Fehlerbedingungen.....	213
10.1.4.2 Fehlerströme.....	214
10.2 Arten der Sternpunktterdung.....	216
10.2.1 Prinzipieller Netzaufbau.....	216
10.2.1.1 Übersichtsschaltung.....	216
10.2.1.2 Ersatzschaltung im Nullsystem.....	216
10.2.1.3 Wahl des Ortes einer Sternpunktterdung.....	217
10.2.2 Isolierter Sternpunkt.....	218
10.2.3 Erdschlußkompensation.....	219
10.2.3.1 Ersatzschaltung des Nullsystems.....	219
10.2.3.2 Ideale Abstimmung im Nullsystem.....	219
10.2.3.3 Sternpunktverlagerung im unsymmetrischen Drehstromnetz.....	220
10.2.3.4 Induktive Polerdung.....	221
10.2.3.5 Verstimmung der Erdkompensation.....	221
10.2.3.6 Zulässige Werte der Nullspannung und des Erdschlußreststromes.....	223
10.2.3.7 Anwendungsbereich isoliert und kompensiert betriebener Netze.....	224
10.2.4 Unmittelbar geerdeter Sternpunkt.....	225
10.2.4.1 Anwendungsbereich.....	225
10.2.4.2 Ersatzschaltung.....	226
10.2.5 Mittelbar geerdeter Sternpunkt.....	227
10.2.5.1 Anwendungsbereich.....	227
10.2.5.2 Ersatzschaltung und Berechnung.....	228
10.3 Transiente Erd(kurz)schlußvorgänge.....	231
10.3.1 Entstehung von Erd(kurz)schlüssen.....	231
10.3.2 Erdschlußzündschwingung.....	234
10.3.2.1 Ersatzschaltungen zur Berechnung der Erdschlußzündschwingung.....	234
10.3.2.2 Zustandsgleichungen des Erdschlußvorganges.....	236
10.3.2.3 Allgemeine Lösung der Zustandsgleichungen.....	237
10.3.2.4 Überspannung bei der Erdschlußzündung.....	239

10.3.2.5	Angenäherte Bestimmung der Überspannungen..... r	241
10.3.2.6	Erdschlußzündung im kompensierten Netz..... $'$	244
10.3.3	Unterbrechung stationärer Erdschlüsse.....	246
10.3.3.1	Isoliertes Netz.....	246
10.3.3.2	Kompensiertes Netz.....	248
10.3.3.3	Überspannungen nach der Erdschlußlöschung.....	251
10.3.4	Aussetzender Erdschluß.....	254
10.3.4.1	Periodische Folge von Erdschlußzündungen und -löschungen.....	254
10.3.4.2	Grenzwerte der Spannungen beim aussetzenden Erdschluß.....	256
10.3.4.3	Einfluß der Dämpfung auf die maximale Nullspannung.....	257
10.3.4.4	Intermittierende Erdschlüsse in kompensierten Netzen.....	259
10.3.5	Mittelbare Sternpunktterdung.....	260
10.3.5.1	Mittelbar resistiv geerdetes Netz.....	260
10.3.5.2	Mittelbar induktiv geerdetes Netz..... $:$	263
10.3.5.3	Unmittelbar geerdetes Netz..... $;$	265
10.4	Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen.....	268
10.4.1	Schutz gegen gefährliche Körperströme.....	268
10.4.2	Netzformen in der Niederspannungsebene.....	268
10.4.2.1	Schutztrennung.....	268
10.4.2.2	Potentialausgleich.....	269
10.4.2.3	IT-Netze.....	270
10.4.2.4	TT- und TN-Netze.....	272
10.4.2.5	Fehlerstrom- und Fehlerschutzschaltung.....	273
10.4.3	Fehlerschutz durch Ausschaltung.....	273
10.4.3.1	Ausschaltbedingung.....	273
10.4.3.2	Kabelgrenzlänge in TN-Netzen.....	275
10.4.3.3	Grenzlänge eines Kabelabganges.....	277
11	Kurzschlußströme in Drehstromnetzen.....	279
11.1	Einführung.....	279
11.1.1	Bedeutung der Kurzschlußströme.....	279
11.1.2	Grundsätze der Kurzschlußstromberechnung.....	281

11.2 Kurzschlußwechselströme	283
11.2.1 Berechnung der Anfangskurzschlußwechselströme.....	283
11.2.1.1 Spannungsquellen des Kurzschlußstromkreises.....	283
11.2.1.2 Überlagerungsverfahren, Satz vonThevenin.....	284
11.2.1.3 Berechnungsgleichung für den unverzweigten Kurzschlußstromkreis.....	286
11.2.1.4 Spannungsbeiwerte.....	287
11.2.1.5 Richtwerte für Eingangsdaten der Kurzschlußstromberechnung.....	287
11.2.1.6 Impedanzkorrektur.....	289
11.2.2 Maximale und minimale Kurzschlußströme.....	291
11.2.3 Kurzschlußleistung.....	292
11.2.4 Berechnung der Kurzschlußwechselströme mit dem Knotenpunktverfahren....	293
11.2.4.1 Vorgehensweise bei der digitalen Berechnung.....	293
11.2.4.2 Ausgangsgleichungen des Knotenpunktverfahrens.....	294
11.2.4.3 Doppel-und Mehrfachfehler.....	297
11.2.4.4 Unbekannte Knotenspannungen und Quellenströme.....	298
11.2.4.5 Lastfluß von Fehlern.....	299
11.2.4.6 Aufbau der Toradmittanzmatrix.....	300
11.2.4.7 Toradmittanzmatrix des Gegensystems.....	306
11.2.4.8 Toradmittanzmatrix des Nullsystems.....	307
11.2.5 Dauerkurzschlußstrom bei Eisensättigung.....	309
11.2.5.1 Dauerkurzschlußstrom nach Norm.....	309
11.2.5.2 Unverzweigter Kurzschlußstromkreis.....	310
11.2.5.3 Magnetisierungs-Kennlinie.....	313
11.2.5.4 Mehrfach gespeister Dauerkurzschlußstrom.....	314
11.2.5.5 Unsymmetrische Dauerkurzschlußströme.....	315
11.2.6 Beispiel zur Berechnung der Kurzschlußwechselströme.....	316
11.2.6.1 Beispielnetz.....	316
11.2.6.2 Toradmittanzmatrizen.....	316
11.2.6.3 Lastfluß vor dem Fehler.....	317
11.2.6.4 Anfangskurzschlußwechselströme für die Lastflußvarianten.....	319
11.2.6.5 Vereinfachung der Berechnung.....	321
11.2.6.6 Minimale dreipolige Kurzschlußwechselströme.....	323
11.2.6.7 Transiente und stationäre Kurzschlußwechselströme.....	324
11.2.6.8 Erregungs- und sättigungsabhängige dreipolige Dauerkurzschlußströme... ..	325
11.2.6.9 Zweipolige Kurzschlußwechselströme.....	327
11.2.6.10 Erregungs-und sättigungsabhängige zweipolige Dauerkurzschlußströme....	327
11.2.6.11 Einpolige Kurzschlußwechselströme.....	328
11.2.6.12 Erregungs-und sättigungsabhängige Dauerkurzschlußströme.....	329
11.2.6.13 Mittelbare niederohmige Sternpunktterdung.....	330

11.2.6.14 Doppelerdkurzschluß an den Knoten A und B.....	330
11.3 Charakteristische Kurzschlußstromgrößen.....	331
11.3.1 Kurzschlußstromverlauf und charakteristische Größen.....	331
11.3.1.1 Oszillogramm eines Leiterstromes bei Kurzschluß.....	331
11.3.1.2 Charakteristische Ströme.....	331
11.3.2 Unverzweigter Kurzschlußstromkreis.....	332
11.3.2.1 Hüllkurve des Kurzschlußstromes.....	332
11.3.2.2 Stoßkurzschlußstrom.....	333
11.3.2.3 Ausschaltstrom.....	334
11.3.2.4 Thermisch gleichwertiger Kurzschlußstrom.....	337
11.3.3 Verzweigter Kurzschlußstromkreis.....	340
11.3.3.1 Problematik.....	340
11.3.3.2 Kurzschlußstromgrößen bei unabhängigen Einspeisungen.....	341
11.3.3.3 Stoßkurzschlußstrom im verzweigten Stromkreis.....	341
11.3.3.4 Ermittlung des Kurzschlußgleichstromes aus der Zustandsgleichung.....	343
11.3.3.5 Kurzschlußgleichstrom bei unsymmetrischen Kurzschlüssen.....	348
11.3.3.6 Kurzschlußwechselstrom im verzweigten Kurzschlußstromkreis.....	348
11.3.3.7 Kurzschlußwechselstrom bei unsymmetrischen Kurzschlüssen.....	353
11.4 Störlichtbogenkurzschlüsse.....	354
11.4.1 Störlichtbogenbeanspruchung.....	354
11.4.2 Störlichtbogenleistung des Netzes.....	356
11.4.2.1 Lichtbogenenergie und -leistung.....	356
11.4.2.2 Stationäre Lichtbogenleistung aus einem linearen Modell.....	358
11.4.2.3 Lichtbogenleistung in Niederspannungsnetzen.....	360
11.4.2.4 Lichtbogenleistung in Mittel- und Hochspannungsnetzen.....	361
11.4.2.5 Ohmsche Lichtbogenwiderstände.....	363
11.4.2.6 Beispiele für Störlichtbogenbeanspruchungen.....	364
11.4.3 Modell des dynamischen Lichtbogens.....	365
11.4.3.1 Leistungsbilanz des Lichtbogens.....	365
11.4.3.2 Stationärer Lichtbogen bei sinusförmigem Strom und konstanter Kühlleistung ..	367
11.4.3.3 Stationärer Lichtbogen bei sinusförmigem Strom und variabler Kühlleistung ..	369
11.4.3.4 Stationärer Lichtbogen im ohmisch-induktiven Stromkreis.....	371
11.5 Kurzschlußströme nach stromabhängigen Schutzeinrichtungen.....	373
11.5.1 Prinzipien des stromabhängigen Schutzes.....	373
11.5.1.1 Schmelzsicherungen.....	373

11.5.1.2 Bimetallauslöser.....	375
11.5.1.3 Elektronische Auslöser.....	376
11.5.2 Strombegrenzung und Durchlaßstrom.....	377
11.5.2.1 Ausschaltvorgang in einer Sicherung.....	377
11.5.2.2 Ermittlung des Durchlaßstromes von Sicherungen.....	378
11.5.3 Thermische Kurzschlußstrombeanspruchung nach stromabhängigen Schutzeinrichtungen.....	380
11.5.3.1 Thermische Kurzschlußstrombeanspruchung nach Bimetallauslösern.....	380
11.5.3.2 Thermische Kurzschlußstrombeanspruchung nach Sicherungen und Schaltgeräten mit elektronischen Auslösern.....	383
11.5.3.3 Störlichtbogenbeanspruchung nach stromabhängigen Schutzeinrichtungen ..	385
11.6 Kurzschlußparameter und Systemgestaltung.....	386
11.6.1 Übertragungskapazität an einem Netzknotenpunkt.....	386
11.6.1.1 Beschreibung der Leistungsverhältnisse an einem Netzknoten.....	386
11.6.1.2 Spannungsqualität und Strombelastbarkeit.....	390
11.6.1.3 Anschluß eines Motors.....	392
11.6.2 Kurzschlußströme und Grenzlängen.....	393
11.6.2.1 Bedeutung von Grenzlängen.....	393
11.6.2.2 Grenzlängen für den Kurzschluß.....	394
11.6.2.3 Grenzlängen für die Kurzschlußstromfestigkeit.....	397
11.6.3 Kurzschlußstromfestigkeit und Auslastung.....	398
11.6.3.1 Thermische Kurzschlußstromfestigkeit.....	398
11.6.3.2 Natürliche Kurzschlußstromfestigkeit.....	399
11.6.4 Maßnahmen zur Beherrschung von Kurzschlußströmen.....	400
11.6.4.1 Überblick.....	400
11.6.4.2 Erhöhung der Kurzschlußstromfestigkeit.....	401
11.6.4.3 Erhöhung der Impedanz des Kurzschlußstromkreises.....	403
11.6.4.4 Herabsetzung der Kurzschlußdauer.....	404
11.6.4.5 Kurzschlußstrombegrenzung und -ableitung.....	405
11.6.5 Wirkprinzipien der Kurzschlußstrombegrenzung.....	405
11.6.5.1 Ziele der Kurzschlußstrombegrenzung.....	405
11.6.5.2 Kurzschlußstrombegrenzung mit hohen Lichtbogenspannungen.....	406
11.6.5.3 Resonanzkupplungen.....	407
11.6.5.4 Supraleitende Strombegrenzungseinrichtungen.....	408
11.6.5.5 Kurzschlußstrombegrenzungseinrichtungen auf Stromrichterbasis.....	409

11.7 Besonderheiten bei Erdkurzschlüssen	417
11.7.1 Nullimpedanz einer Leitung bei unvollkommener Erdung.....	418
11.7.1.1 Beidseitig geerdeter Leitungsabschnitt.....	r.418
11.7.1.2 Kurzschluß zwischen Leiter und Schirm.....	421
11.7.1.3 Minimale Nullimpedanz.....	425
11.7.1.4 Kurzschluß zwischen Leiter und Erde.....	426
11.7.1.5 Reduktionsfaktoren bei unvollkommener Erdung.....	429
11.7.1.6 Charakteristische Nullsystemparameter der Beispielleitungen.....	430
11.7.1.7 Fehlerort zwischen zwei Erdungspunkten bei einseitiger Speisung.....	431
11.7.2 Nullimpedanz bei Einzelschirmung der Leiter.....	432
11.7.2.1 Besonderheiten der Einzelschirmung.....	432
11.7.2.2 Bestimmung der Nullimpedanzen aus der Matrix der Längsimpedanze.....	433
11.7.2.3 Drehstromleitung mit einzeln geschirmten Leitern.....	435
11.7.2.4 Fehlerort zwischen zwei Erdungspunkten bei einseitiger Speisung.....	438
11.7.2.5 Fehlerort zwischen zwei Erdungspunkten bei beidseitiger Speisung.....	441
11.7.3 Leitungen als Kettenleiter im Nullsystem.....	442
11.7.3.1 Mehrfache Erdung des Schirms von Leitungen.....	442
11.7.3.2 Nullimpedanz einer Freileitung unter dem Einfluß der Masterdung.....	443
11.7.3.3 Nullimpedanz bei Abschnittweiser Erdung.....	448
11.7.4 Vereinfachte Berechnung der einpoligen Kurzschlußströme.....	451
11.7.4.1 Praktisches Vorgehen.....	451
11.7.4.2 Beispiele.....	453
11.7.5 Berechnung von Erdkurzschlußströmen aus einem Mehrleiter-Nullsystemnetzwerk.....	456
11.7.5.1 Toradmittanzmatrix eines Zweileiter-Nullsystemnetzwerkes.....	456
11.7.5.2 Knoten-Nullimpedanzen.....	457
11.7.5.3 Knoten-Nullspannungen und Nullzweigströme.....	458
11.7.5.4 Toradmittanzmatrix eines Dreileiter-Nullsystemnetzwerkes.....	459
11.7.5.5 Zentraler Erdungspunkt.....	460
11.7.5.6 Erdfehlerarten in einem Dreileiter-Nullsystemnetzwerk.....	460
11.7.5.7 TN-S-Industriernetz.....	463
11.7.5.8 Toradmittanzmatrix des TN-S-Netzes im Nullsystem.....	465
11.7.5.9 Kurzschlußströme im TN-S-Industriernetz.....	466
11.7.5.10 Fehlerstromaufteilung auf die Transformatoren.....	~!.....467
Anhang	471
Literaturverzeichnis	481
Sachwortverzeichnis	491