

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	1
1.2	Definition der Ströme	2
1.3	Vorgehensweise	3
1.4	Fehlerstatistik	4
1.5	Kurzschlusszeiten	5
	Literatur	6
2	Vorschriften zur Kurzschlussstromberechnung	7
2.1	Entwicklung der Normung	7
2.2	Bestehende Vorschriften	10
2.3	Zurückgezogene VDE-Bestimmung	12
2.4	Fazit	12
	Literatur	12
3	Voraussetzungen und Berechnungsverfahren	15
3.1	Allgemeines zur Kurzschlussstromberechnung	15
3.2	Netztopologien	17
3.3	Auswahl der Kurzschlussströme und Kurzschlussfälle	19
3.4	Transienter Kurzschlussstromverlauf	27
3.5	Generatornahe und generatorferne Kurzschlüsse	28
3.6	Grundsätzliche Verfahren zur Ermittlung von stationären Kurzschlussströmen	31
3.6.1	Berechnung mit der realen Verteilung der Quellenspannungen	31
3.6.2	Knotenadmittanz-Verfahren	36
3.6.3	Maschenimpedanz-Verfahren	37
3.6.4	Überlagerungsverfahren	39
3.6.5	Ersatzspannungsquelle, Ersatzstromquelle	43

3.6.6	Verfahren mithilfe der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle	45
3.6.7	Kurzschlussstromberechnung mithilfe der Ersatzspannungsquelle und Stromquellen	49
3.7	Berücksichtigung von Verbrauchern bzw. Querimpedanzen bei ein- und dreipoligen Kurzschlussströmen	52
3.7.1	Dreipoliger Kurzschlussstrom	52
3.7.2	Einpoliger Kurzschlussstrom	58
3.8	Fazit	69
	Literatur	69
4	Berechnungsgrößen von Betriebsmitteln	71
4.1	Netzeinspeisungen	71
4.2	Generatoren	74
4.2.1	Synchrongeneratoren	75
4.2.2	Asynchrongeneratoren	86
4.3	Kraftwerksblock mit Synchrongenerator	89
4.4	Kraftwerksblock mit selbstgeführten Vollumrichtern	91
4.5	Erzeugungsanlagen (Wind- und Photovoltaikanlagen)	93
4.6	Motoren	94
4.6.1	Impedanzen von Asynchronmotoren nach VDE	94
4.6.2	Ersatzschaltbild eines Asynchronmotors	96
4.6.3	Stromrichter gespeiste Motoren	98
4.7	Freileitungen und Kabel	102
4.7.1	Vereinfachtes Ersatzschaltbild im Mit- und Nullsystem von Freileitungen	102
4.7.2	Ausführliche Ableitung der Mit- und Nullimpedanzen von Freileitungen	107
4.7.3	Impedanzen von Kabeln	125
4.8	Transformatoren	137
4.8.1	Transformatorimpedanz nach VDE	138
4.8.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild im Mitsystem	139
4.8.3	Integriertes Ersatzschaltbild im Mitsystem	145
4.8.4	Ersatzschaltbild im Nullsystem	146
4.8.5	Ersatzschaltbild eines Dreiwicklungstransformators	148
4.8.6	Kennwerte von Transformatoren	152
4.9	HGÜ-Anlagen	152
4.10	Spulen	153
4.11	Kondensatoren	153
4.12	Fazit	154
	Literatur	154

5	Berechnung der Kurzschlussströme	157
5.1	Definitionen	157
5.2	Kurzschlussstromverlauf	159
5.3	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	160
5.4	Stoßkurzschlussstrom	161
5.4.1	Allgemeine Berechnung	161
5.4.2	Einheitliches Verhältnis R/X	168
5.4.3	Verhältnis R/X an der Fehlerstelle	168
5.4.4	Verfahren der Ersatzfrequenz f_c	169
5.4.5	Mehrseitig einfache Einspeisung	170
5.4.6	Beispiel	171
5.5	Gleichstromkomponente	176
5.6	Ausschaltwechselstrom I_b	179
5.6.1	Verfahren zur Berechnung des symmetrischen Ausschaltwechselstroms	179
5.6.2	Verfahren zur Berechnung des asymmetrischen Ausschaltwechselstroms	186
5.7	Dauerkurzschlussstrom	187
5.7.1	Inselnetz mit einer Synchronmaschine bzw. mehrfache Einspeisungen in einem nicht vermaschten Netz	187
5.7.2	Beispiel: Einseitige bzw. mehrseitig einfache Einspeisung	188
5.7.3	Maschennetz mit Synchronmaschinen	191
5.7.4	Beitrag von Asynchronmaschinen	195
5.8	Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom	195
5.8.1	Berechnungsverfahren	196
5.8.2	Beispiel	197
5.9	Unsymmetrische Kurzschlussströme	198
5.10	Einfluss des fiktiven R_f/X -Verhältnisses	201
5.11	Fazit	206
	Literatur	207
6	Doppelerdkurzschluss	209
6.1	Allgemeines	209
6.2	Einfach gespeiste Leitung	210
6.3	Zwei einfach gespeiste Leitungen	215
6.4	Zweifach gespeiste Leitung	218
6.5	Sonstige Kurzschlussströme	222
6.6	Fazit	222
	Literatur	222

7	Berechnung des Spannungsfaktors c	223
7.1	Spannungsfaktor c	223
7.2	Ableitung des Spannungsfaktors	225
7.3	Spannungshaltung bei Belastung	231
7.4	Berechnung des Spannungsfaktors für unterschiedliche Anordnungen bzw. Spannungsebenen	234
7.4.1	Grundlagen	234
7.4.2	110-kV-Spannungsebene	237
7.4.3	380-kV-Spannungsebene	239
7.4.4	500-kV-Spannungsebene	242
7.4.5	Zusammenfassung der Berechnungen	243
7.5	Korrekturfaktor für Leitungen	243
7.6	Fazit	246
	Literatur	246
8	Korrekturfaktoren für Erzeugungseinheiten und Transformatoren	247
8.1	Allgemeines	247
8.2	Synchrongeneratoren	250
8.3	Netztransformatoren	253
8.4	Kraftwerksblock mit Synchrongeneratoren	265
8.5	Fazit	268
	Literatur	268
9	Komponentensysteme	269
9.1	Drehstromsystem (Dreiphasensystem)	269
9.1.1	Strom- und Spannungsbeziehungen	270
9.1.2	Impedanzen des Drehstromsystems	272
9.2	Komponentensysteme für Netzberechnungen	274
9.2.1	Allgemeines	274
9.2.2	Symmetrische Komponenten (Fortescue-Komponenten)	275
9.3	Fehlerbedingungen, Fehlergleichungen, Ersatzschaltbilder	294
9.4	Vergleich: 0, 1, 2-Komponenten mit 0, α , β -Komponenten	298
9.5	Fazit	304
	Literatur	304
10	Ausschaltwechselstrom in vermaschten Netzen	305
10.1	Einleitung	306
10.2	Der Faktor μ	307
10.3	Der Faktor q	310
10.4	Aus mehreren Quellen über eine gemeinsame Impedanz einfach gespeister Kurzschluss	311
10.4.1	Allgemeines	311

10.4.2	Ableitung der allgemeinen Gleichung unter Berücksichtigung von Spannungsquellen	311
10.4.3	Allgemeines Beispiel (Spannungs- und Stromquelle)	314
10.5	Kurzschluss im vermaschten Netz	317
10.6	Beispiele	321
10.6.1	Beispiel 1 (gemeinsame Impedanz):	321
10.6.2	Beispiel 2 (vermaschtes Netz)	326
10.7	Anwendung des Ergebnisses auf die Berechnung des Dauerkurzschlussstroms I_k	328
10.8	Einfluss einer Stromquelle (selbstgeführte Umrichter, IGBT-Technologie) auf den Kurzschlussstromverlauf	328
10.8.1	Berechnungsgrundlagen	328
10.8.2	Einspeisung: Synchrongenerator und Netz	329
10.8.3	Einspeisung: Synchrongenerator, Netz und Umrichter	332
10.8.4	Bewertung des Einflusses des Umrichters auf Netz- und Generatorstrom	335
10.8.5	Bestimmung des Ausschaltwechselstroms in vermaschten Netzen nach Abschn. 10.5	336
10.9	Fazit	338
	Literatur	339
11	Berechnung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms	341
11.1	Einleitung	342
11.2	Allgemeines	342
11.3	Transienter Kurzschlusswechselstrom I'_k	344
11.4	Zeitkonstanten	347
11.5	Bestimmung der Faktoren m und n	348
11.6	Fazit	352
	Literatur	352
12	Beitrag von Asynchronmotoren zum Kurzschlussstrom	355
12.1	Allgemeines	355
12.2	Abschätzung des Kurzschlussstrombeitrags	356
12.3	Beispiel für den Beitrag von Motoren	359
12.4	Beitrag von Asynchronmotoren bei unsymmetrischen Kurzschlüssen	362
12.4.1	Zweipoliger Kurzschluss	362
12.4.2	Einpoleiger Kurzschluss	363
12.5	Fazit	371
	Literatur	371

13	Kurzschlussstromberechnung mit Umrichter-Anlagen	373
13.1	Netzkonfiguration	373
13.2	VSC-Technologie (Vollumrichter)	375
13.2.1	Gleichungen zur Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms	375
13.2.2	Berechnung des dreipoligen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms	378
13.2.3	Ableitung des Kurzschlussstroms bei einem zweipoligen Kurzschluss	384
13.2.4	Ableitung des Kurzschlussstroms bei einem einpoligen Fehler	387
13.2.5	Beispiele für die Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms	389
13.3	LCC-Technologie	407
13.3.1	Stromverlauf bei einem dreipoligen Kurzschluss	407
13.3.2	Simulation von Kurzschlüssen bei geänderten Randbedingungen	414
13.3.3	Ermittlung des betriebsfrequenten Anteil des Netzes bei einem einpoligen Kurzschluss	419
13.3.4	Nachbildung des Entladevorgangs	422
13.3.5	Transiente Berechnung des resultierenden Beitrags zum Stoßkurzschlussstrom bei einem Kurzschluss im Drehstromnetzen	427
13.4	Spannungsabhängige Kurzschlussstrom-Einspeisung von Umrichter-Anlagen	440
13.5	Fazit	443
	Literatur	444
14	Einfluss von Kondensatoren bzw. kapazitiven Kompensationseinheiten auf den Kurzschlussstrom	445
14.1	Kondensatoren als Querkompensation der induktiven Blindleistung	445
14.1.1	Einleitung	445
14.1.2	Kurzschlussstromberechnung nach VDE 0102	446
14.1.3	Auslegung einer Querkompensation (Beispiel)	446
14.1.4	Einfluss auf den dreipoligen Kurzschlussstrom	449
14.1.5	Bewertung des Beitrags einer Querkompensation	462
14.1.6	Beitrag eines Kondensators zu einem dreipoligen Klemmenkurzschluss	462

14.2	Reihen Kondensatoren	464
14.2.1	Einleitung	465
14.2.2	Reihenkomensation	466
14.2.3	Beispiel	467
14.3	Fazit	478
	Literatur	479
15	Berechnung und Betrieb mit parallelen Transformatoren	481
15.1	Berechnung mit parallelen Transformatoren	481
15.1.1	Transformatorersatzschaltbild	482
15.1.2	Bestimmung des dreipoligen Kurzschlussstroms	490
15.1.3	Beispiele	501
15.2	Beidseitige Sternpunktbehandlung	505
15.2.1	Betrachtete Fehlerfälle	505
15.2.2	Übertragung der Nullspannung	506
15.2.3	Ausgleichströme im unterlagerten Netz	512
15.2.4	Ergebnis	519
15.3	Fazit	520
	Literatur	521
16	Darstellung von Spartransformatoren bei der Kurzschlussstromberechnung	523
16.1	Allgemeines	523
16.2	Ersatzschaltbilder	526
16.3	Berechnung der Ströme bei einem Erdkurzschluss	535
16.3.1	Netzschaltung	535
16.3.2	Geerdeter Sternpunkt des Transformators	536
16.3.3	Isolierter Sternpunkt des Transformators	543
16.4	Fazit	548
	Literatur	548
17	Spannungsübertritt zwischen Drehstromsystemen mit unterschiedlichen Nennspannungen	549
17.1	Berechnung der stationären Spannungs- und Stromverteilung	549
17.2	Fazit	561
	Literatur	561
	Stichwortverzeichnis	563