

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen, Stromdefinitionen	1
1.2	Fehlerstatistik	3
1.3	Kurzschlusszeiten	4
	Literatur	5
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	26
3.5	Generatornahe und generatorferne Kurzschlüsse	27
3.6	Grundsätzliche Verfahren zur Ermittlung von stationären Kurzschlussströmen	29
3.6.1	Berechnung mit tatsächlichen Spannungen	29
3.6.2	Knotenadmittanzverfahren	33
3.6.3	Maschenimpedanzverfahren	34
3.6.4	Überlagerungsverfahren	36
3.6.5	Ersatzspannungsquelle, Ersatzstromquelle	39
3.6.6	Verfahren mit Hilfe der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle	40
3.7	Berücksichtigung von Verbrauchern bzw. Querimpedanzen bei ein- und dreipoligen Kurzschlussströmen	43
3.7.1	Dreipoliger Kurzschlussstrom	43

3.7.2	Einpoliger Kurzschlussstrom	48
3.8	Fazit	57
	Literatur	57
4	Berechnungsgrößen von Betriebsmitteln	59
4.1	Netzeinspeisungen	59
4.2	Generatoren	62
4.2.1	Synchrongeneratoren	62
4.2.2	Asynchrongeneratoren	72
4.3	Kraftwerksblock	75
4.3.1	Blocktransformator mit Stufenschalter	75
4.3.2	Blocktransformator ohne Stufenschalter	76
4.4	Selbstgeführte Vollumrichter von Erzeugungseinheiten	77
4.5	Erzeugungsanlagen (Wind- und Photovoltaikanlagen)	78
4.6	Motoren	80
4.6.1	Impedanzen von Asynchronmotoren nach VDE	80
4.6.2	Ersatzschaltbild eines Asynchronmotors	81
4.6.3	Stromrichtergespeiste Motoren	83
4.7	Freileitungen und Kabel	87
4.7.1	Vereinfachtes Ersatzschaltbild im Mit- und Nullsystem von Freileitungen	87
4.7.2	Ausführliche Ableitung der Mit- und Nullimpedanzen von Freileitungen	91
4.7.3	Impedanzen von Kabeln	106
4.8	Transformatoren	118
4.8.1	Transformatorimpedanz nach VDE	118
4.8.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild im Mitsystem	119
4.8.3	Integriertes Ersatzschaltbild im Mitsystem	123
4.8.4	Ersatzschaltbild im Nullsystem	125
4.8.5	Ersatzschaltbild eines Dreiwicklungstransformators	127
4.8.6	Kennwerte von Transformatoren	129
4.9	HGÜ-Anlagen	130
4.10	Spulen	130
4.11	Kondensatoren	131
4.12	Fazit	132
	Literatur	132
5	Berechnung der Kurzschlussströme	135
5.1	Definitionen	135
5.2	Kurzschlussstromverlauf	137
5.3	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	138
5.4	Stoßkurzschlussstrom	138
5.4.1	Allgemeine Berechnung	139

5.4.2	Einheitliches Verhältnis R/X	145
5.4.3	Verhältnis R/X an der Fehlerstelle	145
5.4.4	Verfahren der Ersatzfrequenz f_c	146
5.4.5	Mehrseitig einfache Einspeisung	147
5.4.6	Beispiel	147
5.5	Gleichstromkomponente	152
5.6	Ausschaltwechselstrom I_b	154
5.6.1	Verfahren zur Berechnung des symmetrischen Ausschaltwechselstroms	154
5.6.2	Verfahren zur Berechnung des asymmetrischen Ausschaltwechselstroms	159
5.7	Dauerkurzschlussstrom	160
5.7.1	Inselnetz mit einer Synchronmaschine bzw. mehrfache Einspeisungen in einem nicht vermaschten Netz.	161
5.7.2	Beispiel: Einseitige bzw. mehrseitig einfache Einspeisung.	161
5.7.3	Maschennetz mit Synchronmaschinen.	163
5.7.4	Beitrag von Asynchronmaschinen	167
5.8	Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom.	167
5.8.1	Berechnungsverfahren	168
5.8.2	Beispiel	169
5.9	Unsymmetrische Kurzschlussströme	171
5.10	Fazit	173
	Literatur.	174
6	Doppelerdkurzschluss.	175
6.1	Allgemeines	175
6.2	Einfach gespeiste Leitung	176
6.3	Zwei einfach gespeiste Leitungen	180
6.4	Zweifach gespeiste Leitung	183
6.5	Sonstige Kurzschlussströme	186
6.6	Fazit	186
	Literatur.	187
7	Berechnung des Spannungsfaktors c	189
7.1	Spannungsfaktor c	189
7.2	Ableitung des Spannungsfaktors	191
7.3	Spannungshaltung bei Belastung	196
7.4	Berechnung des Spannungsfaktors für unterschiedliche Anordnungen bzw. Spannungsebenen	198
7.4.1	Grundlagen.	199
7.4.2	110-kV-Spannungsebene	201
7.4.3	380-kV-Spannungsebene	204

7.4.4	500-kV-Spannungsebene.	206
7.4.5	Zusammenfassung der Berechnungen	207
7.5	Korrekturfaktor für Leitungen	208
7.6	Fazit	210
	Literatur.	211
8	Korrekturfaktoren für Impedanzen	213
8.1	Allgemeines	213
8.2	Synchrongeneratoren	215
8.3	Netztransformatoren	218
8.4	Kraftwerksblock mit und ohne Stufenschalter	229
8.5	Fazit	232
	Literatur.	232
9	Komponentensystem.	233
9.1	Drehstromsystem (Dreiphasensystem)	233
9.1.1	Strom- und Spannungsbeziehungen	233
9.1.2	Impedanzen des Drehstromsystems	235
9.2	Komponentensysteme	237
9.2.1	Allgemeines	237
9.2.2	Symmetrische Komponenten	238
9.3	Fehlerbedingungen, Gleichungen	253
9.4	Vergleich: 0, 1, 2-Komponenten mit 0, α , β -Komponenten	254
9.5	Fazit	261
	Literatur.	261
10	Ausschaltwechselstrom in vermaschten Netzen	263
10.1	Einleitung	263
10.2	Der Faktor μ	265
10.3	Der Faktor q	267
10.4	Aus mehreren Spannungsquellen über eine gemeinsame Impedanz einfach gespeister Kurzschluss	268
10.5	Kurzschluss im vermaschten Netz	273
10.6	Beispiele.	277
10.6.1	Beispiel 1 (gemeinsame Impedanz)	277
10.6.2	Beispiel 2 (vermaschtes Netz)	281
10.7	Anwendung des Ergebnisses auf die Berechnung des Dauerkurzschlussstroms I_k	283
10.8	Fazit	284
	Literatur.	284

11	Berechnung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms	285
11.1	Einleitung	286
11.2	Allgemeines	286
11.3	Transienter Kurzschlusswechselstrom I_k'	288
11.4	Zeitkonstanten	289
11.5	Bestimmung der Faktoren m und n	290
11.6	Fazit	294
	Literatur	295
12	Beitrag von Asynchronmotoren zum Kurzschlussstrom	297
12.1	Allgemeines	297
12.2	Abschätzung des Kurzschlussstrombeitrags	298
12.3	Beispiel für den Beitrag von Motoren	300
12.4	Beitrag von Asynchronmotoren bei unsymmetrischen Kurzschlüssen	303
12.4.1	Zweipoliger Kurzschluss	303
12.4.2	Einpoliger Kurzschluss	304
12.5	Fazit	311
	Literatur	311
13	Kurzschlussstromberechnung mit Umrichteranlagen	313
13.1	Netzkonfiguration	313
13.2	VSC-Technologie (Vollumrichter)	314
13.2.1	Gleichungen zur Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms nach VDE 0102: 2016 [3]	315
13.2.2	Berechnung des dreipoligen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms	317
13.2.3	Ableitung des Kurzschlussstroms bei einem zweipoligen Fehler	324
13.2.4	Ableitung des Kurzschlussstroms bei einem einpoligen Fehler	327
13.2.5	Beispiel	328
13.3	LCC-Technologie	338
13.4	Netzanschlussregeln	350
13.5	Fazit	358
	Literatur	358
14	Einfluss von Kondensatoren bzw. kapazitiven Kompensationseinheiten	361
14.1	Einleitung	361
14.2	Kurzschlussstromberechnung nach VDE 0102	362
14.3	Auslegung einer Querkompensation (Beispiel)	362
14.4	Einfluss auf den dreipoligen Kurzschlussstrom	364
14.4.1	Veränderung der betriebsfrequenten Kurzschlussbedingungen	364
14.4.2	Kurzschlussstrombeitrag einer Kompensation bei einem Netzfehler (Beispiel)	368
14.4.3	Abschätzung des Beitrags einer Kompensation	372
14.5	Bewertung des Beitrags einer Kompensation	376

14.6	Beitrag eines Kondensators	376
14.7	Fazit	378
	Literatur	378
15	Berechnung mit parallelen Transformatoren	379
15.1	Einleitung	379
15.2	Transformatorersatzschaltbild	380
15.2.1	Allgemeines Ersatzschaltbild	380
15.2.2	Eingangsimpedanz	383
15.3	Bestimmung des dreipoligen Kurzschlussstroms	389
15.3.1	Netzschaltung und Berechnungsverfahren	389
15.3.2	Verfahren A	392
15.3.3	Verfahren B	394
15.3.4	Verfahren C	395
15.3.5	Verfahren D	397
15.3.6	Zusammenfassung	398
15.4	Beispiele	399
15.4.1	Verteilungsnetz	400
15.4.2	Übertragungsnetz	401
15.5	Fazit	402
	Literatur	404
16	Spannungsübertritt zwischen Drehstromsystemen	405
16.1	Berechnung der stationären Spannungs- und Stromverteilung	405
16.2	Digitale Simulation	416
16.3	Fazit	421
	Literatur	422
	Stichwortverzeichnis	423