

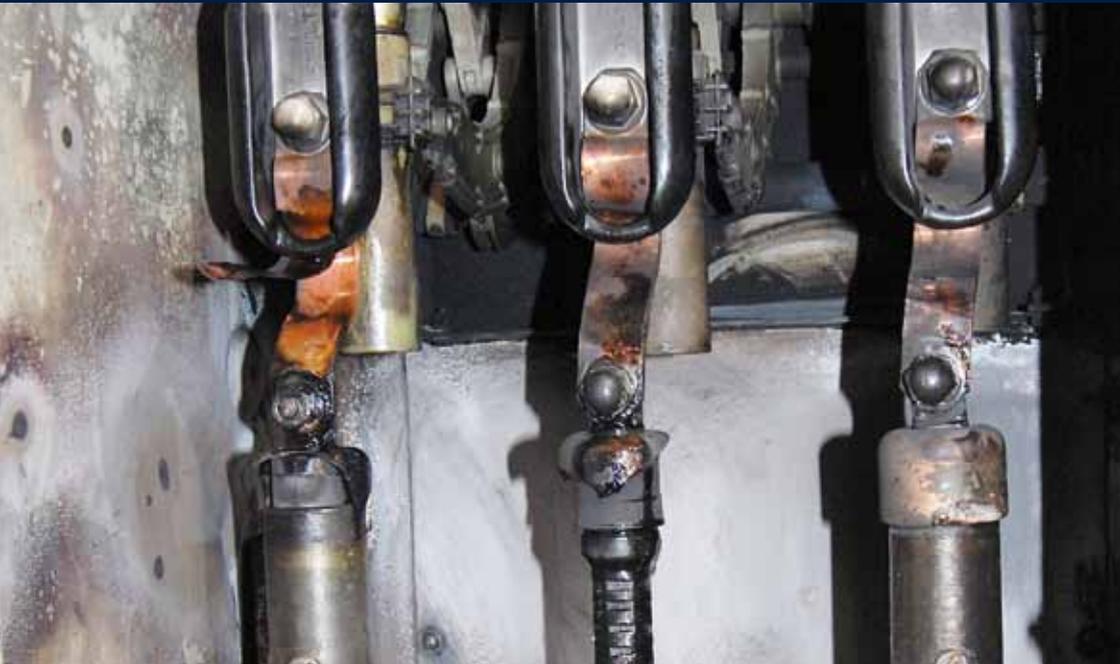
Karl-Heinz Kny

Schutz bei Kurzschluss in elektrischen Anlagen

Planen, Errichten, Prüfen

3., überarbeitete Auflage

huss



Inhalt

	Zur Arbeit mit dem Buch	12
1	Für wen dieses Fachbuch geeignet ist	13
2	Wie wichtig ist der Schutz bei Kurzschluss für Planer, Errichter und Prüfer?	14
3	Der Kurzschluss in elektrischen Anlagen und Netzen	16
3.1	Kurzschlussvorgang und Kurzschlussgrößen	16
3.1.1	Was ist unter dem Begriff „Kurzschluss“ zu verstehen?	16
3.1.2	Quellen für Kurzschlussströme	17
3.1.3	Kurzschlussarten	18
3.1.4	Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstromes	19
3.1.5	Generatornaher und generatorferner Kurzschluss	21
3.2	Kurzschlussströme im Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz	22
3.2.1	Ermittlung der Kurzschlussströme: Notwendigkeit und Möglichkeiten	22
3.2.2	Angabe der Kurzschlussströme durch das EVU	22
3.2.3	Kurzschlussberechnungen nach DIN VDE 0102 – Methodik und Verfahren der Kurzschlussberechnung	23
3.2.4	Charakteristische Kurzschlussgrößen	28
3.2.5	Berechnung größter und kleinster Kurzschlussströme	37
3.2.6	Merksätze zur Kurzschlussberechnung	38
3.3	Berechnung der Kurzschlussströme	39
3.3.1	Genauigkeit der Berechnungsergebnisse	39
3.3.2	Ermittlung der Kurzschlussimpedanz	39
3.3.2.1	Ermittlung der Kurzschlussimpedanz bis zur Fehlerstelle	40
3.3.2.2	Ermittlung der Kurzschlussimpedanz bei Netzeinspeisung	42
3.3.2.3	Kurzschlussimpedanz von Synchrongeneratoren	45
3.3.2.4	Kurzschlussimpedanz von Windkraftanlagen	49
3.3.2.5	Kurzschlussimpedanz von Transformatoren	49
3.3.2.6	Kurzschlussimpedanz von Leitungen und Kabeln	54
3.3.2.7	Kurzschlussimpedanz von Freileitungen	62

3.3.2.8	Kurzschlussimpedanz von Asynchronmotoren	63
3.3.2.9	Kurzschlussimpedanz von Begrenzungs-Drosselspulen	66
3.3.2.10	Messung der Kurzschlussimpedanz	67
3.3.3	Kurzschlussströme von Erzeugern und Motoren	68
3.3.3.1	Synchrongeneratoren	68
3.3.3.2	Kurzschlussströme über Vollumrichter (Windkraftanlagen, Photovoltaikanlagen)	73
3.3.3.3	Berechnung der Kurzschlussströme durch Asynchronmotoren	74
3.3.3.4	Kurzschlussströme bei mehrseitiger Speisung	79
3.3.3.5	Kurzschlussströme bei Netzersatzbetrieb	80
3.3.3.6	Berechnung der Kurzschlussströme bei zusätzlichen Sicherheits- stromversorgungsanlagen (ZSV) für Krankenhäuser und Praxisräume	86
3.3.4	Kurzschlussströme in Netzen	91
3.3.4.1	Kurzschlussströme im Strahlennetz	91
3.3.4.2	Berechnung der Kurzschlussströme im Ringnetz bzw. bei mehrfacher Speisung	93
3.3.4.3	Berechnung der Kurzschlussströme im Maschennetz	96
4	Einrichtungen zum Schutz bei Kurzschluss	112
4.1	Leitungsschutzsicherungen	112
4.2	Leitungsschutzschalter	122
4.3	Motorschutzschalter	128
4.4	Leistungsschalter mit Kurzschlussauslöser	130
5	Schutz bei Kurzschluss durch Kurzschlussfestigkeit der elektrischen Anlagen	133
5.1	Was bedeutet Kurzschlussfestigkeit?	133
5.2	Maßgebliche Kurzschlussarten und -ströme	133
5.3	Begrenzung der Höhe und Dauer der Kurzschlussströme	134
5.4	Bemessung der Betriebsmittel und Anlagen auf Kurzschluss- festigkeit	135
5.4.1	Bemessungskriterien	135
5.4.2	Bemessung auf mechanische Kurzschlussfestigkeit	136
5.4.3	Bemessung auf thermische Kurzschlussfestigkeit	137
5.4.4	Kurzschlussfestigkeit durch ausreichendes Schaltvermögen	137
5.5	Nachweis der Kurzschlussfestigkeit von elektrischen Anlagen	138
5.5.1	Nachweis der Kurzschlussfestigkeit von Betriebsmitteln	138
5.5.2	Schutz bei Kurzschluss von Kabeln und Leitungen	139
5.5.3	Stromschienensysteme	165

5.5.4	Erdungsleiter, Schutzleiter und Potentialausgleichsleiter	169
5.5.5	Schaltgeräte und -Schaltgerätekombinationen	171
5.5.6	Stromwandler	179
5.5.7	Verteilungstransformatoren	180
5.5.8	Schutz durch kurzschluss- und erdschluss sicheres Verlegen	186
5.5.9	Schutz bei Kurzschluss in Hilfsstromkreisen	187
5.6	Gründe für den Verzicht auf den Schutz bei Kurzschluss	188
6	Schutz bei Kurzschluss durch Selektivität und Back-up-Schutz	189
6.1	Selektivitätskriterien	189
6.2	Selektivität in Mittelspannungsnetzen	190
6.3	Selektivität in Niederspannungsnetzen	191
6.3.1	Anordnung und Auswahl von Schutzeinrichtungen	192
6.3.2	Selektivität bei Kombinationen von Schutzeinrichtungen	193
6.3.3	Kurzschlusschutz durch Back-up-Schutz	204
7	Schutz bei Kurzschluss beim Anschluss an das Niederspannungsnetz (TAB 2007)	207
7.1	Was muss überprüft werden?	207
7.2	Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz (TAB 2007)	207
8	Prüfung des Schutzes bei Kurzschluss	210
9	Komplexes Beispiel zum Schutz bei Kurzschluss	216
9.1	Netzbeispiel	216
9.2	Mittelspannungsringnetz und -schaltanlage	216
9.2.1	Kurzschlussströme für den Nachweis der Kurzschlussfestigkeit	216
9.2.1.1	Berechnung des größten Anfangskurzschlusswechselstromes	219
9.2.1.2	Stoßkurzschlussstrom in der Schaltanlage/Sammelschiene	221
9.2.1.3	Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom	222
9.2.1.4	Sammelschienenkurzschluss	222
9.2.1.5	Ausschaltwechselstrom	224
9.2.2	Nachweis der Kurzschlussfestigkeit	224
9.2.2.1	Kurzschlussfestigkeit der Schaltanlage	224
9.2.2.2	Kurzschlussfestigkeit der Leistungsschalter	224
9.2.2.3	Kurzschlussfestigkeit der Stromwandler	225
9.2.2.4	Kurzschlussfestigkeit des Kabels im Ringnetz	225

9.2.3	Berechnung der Ströme zur Festlegung der Einstellwerte der Überstromrelais	226
9.2.3.1	Kleinster Kurzschlussstrom im Ringnetz	226
9.2.3.2	Größter Betriebsstrom bei einseitiger Speisung	228
9.2.4	Kurzschlussleistungen in der Mittelspannungsschaltanlage der Station E	229
9.3	Niederspannungsschaltanlage, Verteilungen und Strahlennetz	229
9.3.1	Aufgabenstellung	229
9.3.2	Berechnung der Kurzschlussströme	231
9.3.2.1	Ermittlung der Kurzschlussimpedanzen für den Abzweig A	232
9.3.2.2	Berechnung der Kurzschlussströme für die Niederspannungsverteilung und den Abzweig A	235
9.3.3	Kurzschlussanteile durch Eigenerzeuger oder Asynchronmotoren	243
9.3.4	Nachweis der Kurzschlussfestigkeit	243
9.3.5	Überprüfung der Selektivität	249
9.3.6	Kurzschlussberechnungen und Nachweise mit INSTROM	256
Anhang		
	Fachbegriffe und Definitionen	261
	Formelzeichen, Indizes und Nebenzeichen	269
Literatur-, Normen- und Quellenverzeichnis		272
Register		278

Im Allgemeinen ist der dreipolige Kurzschlussstrom am größten. Nur wenn der Kurzschluss in unmittelbarer Nähe des Transformators liegt, kann der einpolige Kurzschlussstrom etwas größer als der dreipolige Kurzschlussstrom sein. Der zweipolige Kurzschlussstrom ist nie höher als der größte dreipolige Kurzschlussstrom.

Aber auch der kleinste Kurzschlussstrom kann, insbesondere bei der Belastung von Kabeln und Leitungen, eine zu hohe thermische Beanspruchung hervorrufen, denn geringe Kurzschlussströme haben bei thermisch wirkenden Schutzeinrichtungen eine relativ lange Abschaltzeit zur Folge. In Gebäudeinstallationen ist beim einpoligen Kurzschluss der kleinste Fehlerstrom zu erwarten; der dreipolige Kurzschlussstrom ist dort auszuschließen. Ist die Netzimpedanz vor dem einspeisenden Transformator hoch, kann auch der zweipolige Kurzschlussstrom in Transformatornähe den kleinsten Wert annehmen. In diesem Fall ist eine genauere Überprüfung erforderlich. Diese Aussagen treffen auf das TN-System zu. Im IT-System und im Dreileiternetz liefert immer der dreipolige Kurzschluss den größten und der zweipolige Kurzschluss den kleinsten Kurzschlussstrom.

Die Größe des Kurzschlussstromes ist von der Höhe der Betriebsspannung an der Fehlerstelle unmittelbar vor Kurzchlusseintritt und von der gesamten Kurzschlussimpedanz abhängig. Sowohl die Betriebsspannung als auch die Kurzschlussimpedanz sind keine konstanten Größen.

Die Betriebsspannung darf sich in einem bestimmten Bereich ändern. Dieser Einfluss wird mit der Wahl des Spannungsfaktors c (Tafel 3.1) berücksichtigt.

Die Kurzschlussimpedanz unterliegt den Einflussfaktoren

- Netzleistung,
- Schaltzustand des Netzes bzw. der elektrischen Anlage,
- Leitertemperatur sowie
- Berücksichtigung zusätzlicher Kurzschlussstromquellen (z. B. Asynchronmotoren).

Je nach der Art der Berücksichtigung der Einflussgrößen kann der zu erwartende größte und kleinste Kurzschlussstrom berechnet werden. Im Einzelnen sind zu berücksichtigen:

- bei der Berechnung des größten Kurzschlussstromes
 - der Spannungsfaktor c_{\max} ,
 - die kleinste Netz- bzw. Generatorimpedanz (größte Kurzschlussleistung des Netzes bzw. Generatorleistung),
 - Impedanzkorrekturfaktoren (außer für die Impedanz zwischen N und E),
 - der Schaltzustand, der die kleinste Kurzschlussimpedanz ergibt (mögliche Parallelschaltung und Vermaschung),
 - Leitertemperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ sowie
 - Motoren;

- bei der Berechnung des kleinsten Kurzschlussstromes
 - der Spannungsfaktor c_{\min} ,
 - die größte Netz- bzw. Generatorimpedanz (kleinste Kurzschlussleistung des Netzes bzw. Generatorleistung),
 - der Schaltzustand, der die größte Kurzschlussimpedanz ergibt (ohne Parallelschaltung und Vermaschung),
 - die Beiträge von Windkraftwerken und Motoren müssen vernachlässigt werden,
 - höhere Leitertemperatur der vom Kurzschlussstrom beanspruchten Leiter,
 - eventuell Berücksichtigung der (Zusatz-)Impedanzen von Stromschiene, Wandlern, Schaltern, Sicherungen, Verbindungsstellen.

3.2.6 Merksätze zur Kurzschlussberechnung

Für die Berechnung von Kurzschlussströmen nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102-0) [3.1] können folgende Merksätze hinsichtlich der Bearbeitungsfolge anleitend und hilfreich sein:

- Kurzschließen aller Spannungsquellen
- Generatoren, Netzeinspeisequellen, Asynchronmotoren
- Einführung einer Ersatzspannungsquelle an der Fehlerstelle
- Sinnvoll für eventuelle Vereinfachungen: Unterscheidung zwischen generatornahem und generatorfernem Kurzschluss
- Bilden der Kurzschlussimpedanz bis zur Fehlerstelle
Ermitteln der Kurzschlussimpedanzen der Betriebsmittel
 - mit der Bemessungsspannung und
 - unter Berücksichtigung größter und kleinster Kurzschlussströme (z. B. Toleranzangaben, Temperaturabhängigkeit der ohmschen Widerstände von Kabeln und Leitungen).



Beachte: Impedanzen dürfen nur dann zusammengefasst werden, wenn sie auf die gleiche Spannungsebene (Netzennspannung an der Fehlerstelle!) bezogen sind! Die Umrechnung der Impedanzen erfolgt mit der Leerlaufübersetzung des Transformators.

- Berechnung der Kurzschlussströme
 - Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_k'' bzw. I_k (dreipolig, zweipolig, einpolig)
 - Stoßkurzschlussstrom i_p (dreipolig, einpolig)
 - Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom I_{th} (dreipolig, einpolig)
 - Ausschaltwechselstrom I_b (dreipolig, einpolig)
 - mit der Netzennspannung,
 - dem zutreffenden Spannungsfaktor und
 - der Kurzschlussimpedanz an der Fehlerstelle entsprechend der Kurzschlussart.

3.3 Berechnung der Kurzschlussströme

3.3.1 Genauigkeit der Berechnungsergebnisse

Eine genaue Berechnung der Kurzschlussströme ist mit den aus der Mathematik bekannten komplexen Zahlen möglich und in der wissenschaftlichen Literatur üblich. Aber nur wenn die in der Kurzschlussbahn zu berücksichtigenden Impedanzen stark voneinander abweichende ohmsche und induktive Anteile haben, ist diese komplexe Berechnungsmethode erforderlich, insbesondere bei der Ermittlung maximaler Kurzschlussströme. Für eine schnelle Berechnung, wie es in der Planungs- und Prüfungspraxis nötig ist, ist die Berechnung mit den Beträgen der Impedanzen oft ausreichend genau.

Wird bei einer Reihenschaltung (Strahlennetz) nur mit den Beträgen der Impedanzen gerechnet, fällt der errechnete Wert für die Kurzschlussimpedanz zu hoch aus. Man erhält also mit dem ohmschen Gesetz einen zu geringen Strom, und die berechneten Werte für die maximalen Kurzschlussströme sind dann zu klein. Die Werte für die minimalen Kurzschlussströme sind jedoch ausreichend genau, insbesondere wenn der Kurzschluss am Ende einer längeren Leitung mit kleinem Querschnitt untersucht wird.

Bei der Überprüfung der Kurzschlussfestigkeit ist der berechnete Kurzschlusswert in den meisten Fällen wesentlich kleiner als der vom Hersteller angegebene Festigkeitswert.



Beachte: Nur wenn sich die beiden Werte geringfügig unterscheiden, sollte auf die Berechnung mit komplexen Zahlen zurückgegriffen werden.

3.3.2 Ermittlung der Kurzschlussimpedanz

Um die Kurzschlussströme berechnen zu können, muss zuerst die Größe der Kurzschlussimpedanz ermittelt werden.

Herangehensweise und Aufwand bei der Ermittlung der Kurzschlussimpedanz hängen davon ab, wie genau der berechnete Wert der Kurzschlussströme sein muss. Oft reichen schon überschlägige Berechnungsergebnisse aus, um zu erkennen, ob bestimmte Forderungen eingehalten werden. Hält aber der berechnete Kurzschlussstrom den zulässigen Grenzwert nur knapp ein, ist die Berücksichtigung von weiteren Impedanzen der Betriebsmittel und Einflussfaktoren notwendig. Zusätzliche Impedanzen neben dem speisenden Netz, den Transformatoren und Leitungen können zum Beispiel die Impedanzen von Stromschienen, Verbindungsstellen, Sicherungen, Schaltern sein. Die Leitertemperatur kann als Einflussfaktor zur Widerstandserhöhung dann nicht vernachlässigt werden. Dies hängt auch davon ab, ob der größte oder der kleinste Kurzschlussstrom berechnet werden soll.

Die Impedanz eines Betriebsmittels BM besteht im Allgemeinen aus einem ohmschen (Resistanz) und einem induktiven Widerstand (Reaktanz). Als komplexe Größe wird dies folgendermaßen ausgedrückt:

$$\underline{Z}_{\text{BM}} = R_{\text{BM}} + jX_{\text{BM}}. \quad (3.36)$$

Der Betrag der Impedanz des Betriebsmittels ist dann

$$Z_{\text{BM}} = |\underline{Z}_{\text{BM}}| = \sqrt{R_{\text{BM}}^2 + X_{\text{BM}}^2}. \quad (3.37)$$

3.3.2.1 Ermittlung der Kurzschlussimpedanz bis zur Fehlerstelle

Um die Kurzschlussimpedanz an der Kurzschlussstelle bilden zu können, sind die Kurzschlussimpedanzen der Betriebsmittel bis zur Fehlerstelle erforderlich. Dazu zählen: Generatoren, das speisende Netz, Asynchronmotoren, Transformatoren, Kabel und Leitungen sowie weitere sogenannte Zusatzimpedanzen.

Die Kurzschlussimpedanz Z_{BM} oder die Kurzschlussresistanz R_{BM} und -reaktanz X_{BM} eines elektrischen Betriebsmittels sind aus den Bemessungswerten des Betriebsmittels zu berechnen oder direkt den Angaben der Hersteller zu entnehmen.

Sind die tatsächlichen Bemessungswerte nicht bekannt, können Nennwerte, Mittelwerte und Richtwerte herangezogen werden.

Bei der Berechnung der Impedanz für Generatoren, Transformatoren und Asynchronmotoren ist die Bemessungsspannung des Betriebsmittels (nicht die Netzennspannung!) einzusetzen!

Die Kurzschlussimpedanz an der Kurzschlussstelle ist eine Ersatzimpedanz für alle Impedanzen, über die der Kurzschlussstrom fließt. Der Kurzschlussstromkreis wird so vereinfacht, dass die kurzgeschlossenen Spannungsquellen nur durch ihre Innenimpedanzen berücksichtigt werden und an der Fehlerstelle eine Ersatzspannungsquelle eingeführt wird, die den Kurzschlussstrom über die Kurzschlussimpedanz treibt (Bild 3.11).

Allgemein gilt im Strahlennetz für die Bildung der Gesamtimpedanz die Gesetzmäßigkeit einer Reihenschaltung. Demnach ist die Kurzschlussimpedanz Z_k die Summe aller Kurzschlussimpedanzen der Betriebsmittel von der Spannungsquelle bis zur Fehlerstelle:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \dots + \underline{Z}_n. \quad (3.38)$$

Der Betrag wird berechnet, indem die Wirkwiderstände R und die Blindwiderstände X der Betriebsmittel getrennt zusammengefasst und dann geometrisch addiert werden:

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n)^2 + (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)^2}. \quad (3.39)$$



Beachte: Impedanzen dürfen nur addiert werden, wenn sie auf die gleiche Spannung bezogen sind.

Es muss deshalb bei einem Kurzschluss im 400-V-Netz konkreter lauten:

$$\underline{Z}_{k/400V} = \underline{Z}_{1/400V} + \underline{Z}_{2/400V} + \underline{Z}_{3/400V} + \dots + \underline{Z}_{n/400V}. \quad (3.40)$$

Für diesen Fall müssen alle Impedanzen von der Hochspannungs- bzw. Mittelspannungsseite (HV – High Voltage) auf die Niederspannungsseite (LV – Low Voltage) mit dem Quadrat der Bemessungsübersetzung des Transformators:

$$t_r^2 = \left(\frac{U_{rHV}}{U_{rLV}} \right)^2 \quad (3.41)$$

umgerechnet werden:

$$\underline{Z}_{k/LV} = \underline{Z}_{k/HV} \cdot \frac{1}{t_r^2}. \quad (3.42)$$

Da sich die Impedanz bezogen auf eine kleinere Spannung entsprechend verringert, muss mit dem reziproken Wert multipliziert werden. Außerdem ist hierbei zu beachten, dass die Netzennspannung nicht mit der Bemessungsspannung des Transformators übereinstimmen muss (z. B. $U_n = 400V$, $U_{rT} = 420V$).

Für die Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstromes wird die bisher betrachtete Mitimpedanz $\underline{Z}_k = \underline{Z}_{(1)k}$ benötigt.

Die bei unsymmetrischen Fehlern zusätzlich wirksamen Impedanzen im Gegen- und Nullsystem werden bei einem einfach gespeisten Kurzschluss genauso addiert.

Die Gegenimpedanz an der Kurzschlussstelle summiert sich aus:

$$\underline{Z}_{(2)k} = \underline{Z}_{(2)1} + \underline{Z}_{(2)2} + \underline{Z}_{(2)3} + \dots + \underline{Z}_{(2)n}. \quad (3.43)$$

Für Berechnungen im Elektroenergieversorgungsnetz kann $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ angenommen werden.

Die Nullimpedanz für die Kurzschlussstelle ist nur dann zu berücksichtigen, wenn sich das Nullsystem ausbilden kann. Bei Ortsnetztransformatoren mit der Schaltgruppe Dy5 und starrer Sternpunktterdung kann sich das Nullsystem bei einem einpoligen Fehler im Niederspannungsnetz nicht über den Transformator ins übergeordnete Netz ausbreiten. Deshalb wird beispielsweise bei der Bildung der Summe der Nullimpedanzen der erste Summand $\underline{Z}_{(0)1}$ weggelassen:

$$\underline{Z}_{(0)k} = \underline{Z}_{(0)2} + \underline{Z}_{(0)3} + \dots + \underline{Z}_{(0)n}. \quad (3.44)$$

Fließt der Kurzschlussstrom über parallele Zweige (z. B. Transformatoren oder Leitungen), im Ring- oder im Maschennetz, wird die Kurzschlussimpedanz durch Zusammenfassung bzw. durch Netzreduktion ermittelt:

$$\underline{Z}_k = \left| \underline{Z}_1 \right| + \left| \underline{Z}_2 \right| + \left| \underline{Z}_3 \right| + \dots + \left| \underline{Z}_n \right| = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \dots + \underline{Z}_n \quad (3.45)$$

bzw.

$$\underline{Z}_{(0)k} = \left| \underline{Z}_{(0)2} \right| + \left| \underline{Z}_{(0)3} \right| + \dots + \left| \underline{Z}_{(0)n} \right| = \underline{Z}_{(0)2} + \underline{Z}_{(0)3} + \dots + \underline{Z}_{(0)n}. \quad (3.46)$$

3.3.2.2 Ermittlung der Kurzschlussimpedanz bei Netzeinspeisung

Mit der Kenntnis der Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung oder des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes I''_k am Anschlusspunkt Q wird die Netzimpedanz Z_Q bezogen auf die zum Anschlusspunkt Q gehörende Spannungsebene U_{nQ} mit folgender Formel berechnet:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_k''} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (3.47)$$

Die Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung S''_k oder der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I''_k wird vom zuständigen EVU angegeben.

Die auf die Niederspannungsseite bezogene Kurzschlussimpedanz des Netzes erhält man mit Leerlaufübersetzung des Transformators t_r :

$$Z_{Q/US} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \cdot \left(\frac{U_{LV}}{U_{HV}} \right)^2 \quad (3.48)$$

Bei fehlenden Kurzschlussangaben für das vorgelagerte Netz können für die Berechnung maximaler Kurzschlussströme die Kurzschlussleistungen bezogen auf die jeweilige Spannungsebene als Richtwerte nach **Tafel 3.3** herangezogen werden:

Höchste Spannung für Betriebsmittel kV	Kurzschlussleistung des Netzes MVA
12,12	500
36	1 000

Tafel 3.3 Richtwerte für größte Kurzschlussleistungen [3.4]

Zur Ermittlung der komplexen Netzimpedanz $Z_Q = R_Q + jX_Q$ sollte man das R_Q/X_Q -Verhältnis oder den Stoßfaktor κ kennen. Wenn nicht, darf $R_Q/X_Q = 0,1$ angenommen werden.

Bei bekannt sein des Stoßfaktors κ erhält man mit der umgestellten Formel (3.24) das Verhältnis:

$$\frac{R_Q}{X_Q} = -\frac{1}{3} \cdot \ln \frac{\kappa - 1,02}{0,98} \quad (3.49)$$

Allgemein gilt für die Netzreaktanz X_Q :

$$X_Q = \frac{c \cdot U^2}{S_k \cdot \sqrt{\left(\frac{R_Q}{X_Q} \right)^2 + 1}} \quad (3.50)$$

und damit folgt für die Netzresistenz R_Q :

$$R_Q = \left(\frac{R_Q}{X_Q} \right) \cdot X_Q. \tag{3.51}$$

Für Hochspannungsanlagen kann i. d. R. die Netzresistenz R_Q vernachlässigt werden; insbesondere bei der Zusammenfassung mehrerer in Reihe liegender Betriebsmittel zur Kurzschlussimpedanz an der Fehlerstelle.

Nicht aber bei der Berechnung des Stoßkurzschlussstromes i_p wegen der durch den ohmschen Widerstand bedingten Dämpfung.

Von den EVUs werden mögliche minimale und maximale Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistungen S''_{kQmax} und S''_{kQmin} am Anschlusspunkt Q oder vorzugsweise nach VDE 0102-0 (3.1) die Anfangs-Kurzschlusswechselströme I''_{kQmax} und I''_{kQmin} angegeben, die dann jeweils in die Formeln (3.52) und (3.53) einzusetzen sind:

$$Z_{Qmin} = \frac{c_{max} \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQmax}} = \frac{c_{max} \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQmax}}, \tag{3.52}$$

$$Z_{Qmax} = \frac{c_{min} \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQmin}} = \frac{c_{min} \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQmin}}. \tag{3.53}$$

Der zutreffende Spannungsfaktor c ist der Tafel 3.1 zu entnehmen.

S_k MVA	30kV		20kV		10kV		690V		420V	
	Z_{Qmin} Ω	Z_{Qmax} Ω	Z_{Qmin} Ω	Z_{Qmax} Ω	Z_{Qmin} Ω	Z_{Qmax} Ω	Z_{Qmin} m Ω	Z_{Qmax} m Ω	Z_{Qmin} m Ω	Z_{Qmax} m Ω
20	49,50	45,00	22,0	20,00	5,50	5,00	26,19	23,80	9,70	8,82
50	19,80	18,00	8,80	8,00	2,20	2,00	10,47	9,52	3,88	3,53
100	9,90	9,00	4,40	4,00	1,10	1,00	5,24	4,76	1,94	1,76
150	6,60	6,00	2,93	2,66	0,73	0,66	3,49	3,17	1,29	1,18
200	4,95	4,50	2,20	2,00	0,55	0,50	2,62	2,38	0,97	0,88
250	3,96	3,60	1,76	1,60	0,44	0,40	2,09	1,90	0,78	0,71
300	3,30	3,00	1,47	1,33	0,36	0,33	1,75	1,59	0,65	0,59
350	2,83	2,57	1,26	1,14	0,31	0,28	1,50	1,36	0,55	0,50
400	2,48	2,25	1,10	1,00	0,27	0,25	1,31	1,19	0,49	0,44
450	2,20	2,00	0,98	0,88	0,24	0,22	1,16	1,06	0,43	0,39
500	1,98	1,80	0,88	0,80	0,22	0,20	1,05	0,95	0,39	0,35
750	1,32	1,20	0,59	0,53	0,14	0,13	0,7	0,63	0,26	0,23
1 000	0,99	0,90	0,44	0,40	0,11	0,10	0,53	0,47	0,20	0,17

Tafel 3.4 Maximale und minimale Netzimpedanz am Anschlusspunkt Q (Z_{Qmax} , Z_{Qmin}) in Ω oder m Ω bezogen auf die Netznominalspannung; ermittelt mit den Formeln (3.52) und (3.53) für Überslagsberechnungen
(Angabe von S_k für die Mittelspannungsseite, $c_{max} = 1,1$ und $c_{min} = 1,0$)

Beispiel 3.1 – Berechnung der Netzimpedanz (Bild 3.20)

Das zuständige EVU gibt für den Anschlusspunkt Q mit einer Netznominalspannung $U_n = 20 \text{ kV}$ die Anfangskurzschlussleistungen $S''_{\text{kmax}} = 250 \text{ MVA}$ und $S''_{\text{kmin}} = 210 \text{ MVA}$ an. Das R_Q/X_Q -Verhältnis soll jeweils 0,15 betragen.

Für einen Kurzschluss

- an der 20-kV-Sammelschiene und
- hinter dem Transformator mit einer Bemessungsübersetzung $t_r = 20 \text{ kV}/0,42 \text{ kV}$ soll jeweils die minimale und die maximale Impedanz des Netzes bezogen auf die Netzspannung des Kurzschlussortes bestimmt werden.

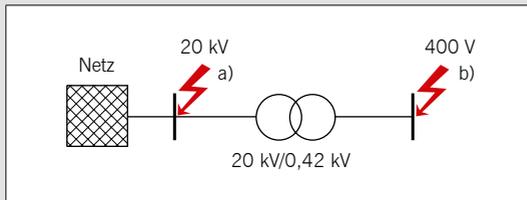


Bild 3.20
Ermittlung der
Netzimpedanz
(Beispiel 3.1)

Lösung

Die Werte, eingesetzt in die Formeln (3.52) und (3.53), ergeben folgende Impedanzen:

$$Z_{\text{Qmin}} = \frac{1,1 \cdot (20 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 1,76 \ \Omega,$$

$$Z_{\text{Qmax}} = \frac{1,0 \cdot (20 \text{ kV})^2}{210 \text{ MVA}} = 1,905 \ \Omega.$$

Unter Berücksichtigung der Übersetzung des Transformators und Formel (3.48) gilt:

$$Z_{\text{Qmin}} = \frac{1,1 \cdot (20 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} \cdot \left(\frac{0,42 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = \frac{1,1 \cdot (0,42 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 0,000776 \ \Omega = 0,776 \text{ m}\Omega,$$

$$Z_{\text{Qmax}} = \frac{1,0 \cdot (20 \text{ kV})^2}{210 \text{ MVA}} \cdot \left(\frac{0,42 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = \frac{1,0 \cdot (0,42 \text{ kV})^2}{210 \text{ MVA}} = 0,00084 \ \Omega = 0,84 \text{ m}\Omega.$$

Beachte: Die Vereinfachung, dass die Niederspannung von 0,42 kV in die Formel eingesetzt werden kann, ist nur dann korrekt, wenn die Netzmittelspannung und die Transformatorbemessungsspannung auf der Primärseite übereinstimmen.

In **Tafel 3.4** stehen nach (3.52) und (3.53) berechnete Netzimpedanzen zur Verfügung.

Eine komplexe Netzimpedanz wird im Abschnitt 9.2.1 ermittelt!

3.3.2.3 Kurzschlussimpedanz von Synchrongeneratoren

Bei der Ermittlung der Kurzschlussimpedanz von Synchrongeneratoren wird unterschieden zwischen solchen mit direktem Netzanschluss (**Bild 3.21**) und Anschluss über einen Blocktransformator (Bild 3.22).

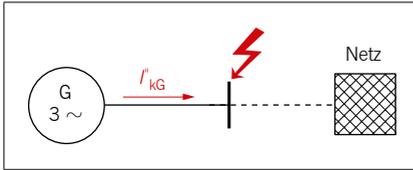


Bild 3.21

Generatoren mit direktem Netzanschluss

Generatoren mit direktem Netzanschluss

Die zur Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes erforderliche Impedanz Z_{GK} von Synchrongeneratoren mit direktem Netzanschluss wird unter Einbeziehung des Korrekturfaktors K_G mit nachstehenden Formeln ermittelt:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d''), \quad (3.54)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + X_d'' \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}}, \quad (3.55)$$

$$Z_G \approx X_d'' = \frac{X_d'' \cdot U_{rG}^2}{100\% \cdot S_{rG}}; \quad (3.56)$$

c_{\max} Spannungsfaktor (Tafel 3.1),

U_n Netznominalspannung,

U_{rG} Bemessungsspannung des Generators,

Z_G subtransiente Impedanz des Generators im Mitsystem $Z_G = R_G + jX_d''$,

R_G Resistanz des Generators,

X_d'' subtransiente Reaktanz des Generators,

Z_{GK} korrigierte subtransiente Impedanz des Generators,

x_d'' bezogene subtransiente Reaktanz des Generators, bezogen auf die Bemessungsimpedanz mit $x_d'' = X_d''/Z_G$ mit $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$,

φ_{rG} Phasenwinkel zwischen I_{rG} und $U_{rG}/\sqrt{3}$.

Der im Vergleich zum induktiven Widerstand X_d'' geringe ohmsche Widerstand R_G wird von den Herstellern angegeben. Ist der Wert nicht bekannt, können die in VDE 0102-0 [3.1] für die Berechnung des Stoßkurzschlussstromes vorgesehenen R_{Gf}/X_d'' -Verhältnisse mit ausreichender Genauigkeit verwendet werden:

$R_{Gf} = 0,15 \cdot X_d''$ Generatoren mit $U_{rG} \leq 1000$ V,

$R_{Gf} = 0,07 \cdot X_d''$ Generatoren mit $U_{rG} > 1$ kV und $S_{rG} < 100$ MVA,

$R_{Gf} = 0,05 \cdot X_d''$ Generatoren mit $U_{rG} > 1$ kV und $S_{rG} > 100$ MVA.

Beispiel 3.2 – Bestimmung der Kurzschlussimpedanz eines Turbogenerators

Für einen Turbogenerator mit der Bemessungsspannung $U_{rG} = 420\text{V}$ und einer Bemessungsscheinleistung von $S_{rG} = 200\text{kVA}$ mit einem angegebenen Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0,9$ ist der korrigierte Wert der Impedanz des Generators Z_{GK} zu berechnen.

Bekannt ist die bezogene subtransiente Reaktanz $x''_d = 0,14$ bzw. 14 %.

Da der ohmsche Widerstand des Generators im Vergleich zum induktiven Widerstand sehr klein ist, wird er nicht berücksichtigt. Für eine vereinfachte Berechnung gilt dann für die Generatorimpedanz mit Formel (3.56):

$$Z_G \approx X_d'' = \frac{14\% \cdot (420\text{ V})^2}{100\% \cdot 200\text{ kVA}} = 0,123\ \Omega.$$

Mit den o. g. Richtwerten zur Größe der Resistenzen wird:

$$R_G = 0,15 \cdot 0,123\ \Omega = 0,018\ \Omega.$$

Der Korrekturfaktor K_G wird mit der Formel (3.55):

$$K_G = \frac{400\text{ V}}{420\text{ V}} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,14 \cdot \sqrt{1 - 0,9^2}} = 0,99.$$

Unter Anwendung der Formel (3.54) und mit dem Korrekturfaktor K_G wird die korrigierte Impedanz des Generators Z_{GK} bestimmt:

$$\underline{Z}_{GK} = 0,99 \cdot (0,018 + j0,123)\ \Omega = (0,0178 + j0,122)\ \Omega$$

und der Betrag ist dann:

$$Z_{GK} = \sqrt{0,0178^2 + 0,122^2}\ \Omega = 0,123\ \Omega.$$

Ohne Berücksichtigung des ohmschen Widerstandes des Generators erhält man das gleiche Ergebnis!

Synchrongeneratoren unmittelbar über Transformatoren (Kraftwerksblöcke)

Erfolgt unmittelbar hinter dem Synchrongenerator die Transformation der elektrischen Spannung bilden der Synchrongenerator und der Transformator nach **Bild 3.22** zur Berechnung der Impedanz und der Kurzschlussströme eine Kraftwerkseinheit bzw. einen Kraftwerksblock.

Bei der Ermittlung der Kurzschlussimpedanzen eines Kraftwerksblockes wird in VDE 0102-0 [3.1] hinsichtlich des Vorhandenseins eines Stufenschalters unterschieden.

Nachfolgend sind die Berechnungsformeln für die Impedanzen von Kraftwerksblöcken mit und ohne Stufenschalter Z_{SK} und Z_{SOK} angegeben.

Die Berechnung der Kurzschlussströme an der Sammelschiene bzw. generatornaher Kurzschlüsse erfolgt wie im Beispiel 3.3 gezeigt.

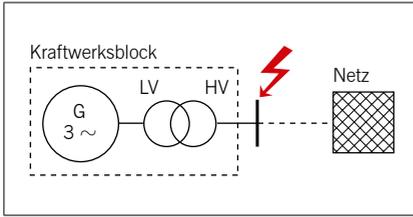


Bild 3.22
Generatoren mit Anschluss über einen Blocktransformator (Kraftwerksblock)

a) Kraftwerksblöcke mit Stufenschaltern

$$\underline{Z}_{SK} = K_S (t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \tag{3.57}$$

mit dem Korrekturfaktor:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2 \cdot U_{rTLV}^2}{U_{rG}^2 \cdot U_{rTHV}^2} \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} \tag{3.58}$$

b) Kraftwerksblöcke ohne Stufenschalter

$$\underline{Z}_{SOK} = K_{SO} (t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \tag{3.59}$$

mit dem Korrekturfaktor:

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} (1 + \rho_G)} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} (1 \pm \rho_T) \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} \tag{3.60}$$

In den Formeln (3.57 bis 3.60) bedeuten:

- \underline{Z}_s Korrigierte Impedanz des Kraftwerkblockes mit Stufenschalter bezogen auf die OS-Seite,
- \underline{Z}_{SO} Korrigierte Impedanz des Kraftwerkblockes ohne Stufenschalter, d.h. bei konstantem Übersetzungsverhältnis t bezogen auf die Oberspannungsseite,
- \underline{Z}_G Subtransiente Impedanz des Generator $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$ (ohne Korrekturfaktor K_G),
- \underline{Z}_{THV} Impedanz des Blocktransformators, bezogen auf die OS-Seite (ohne Korrekturfaktor K_T),
- U_{nQ} Netznominalspannung am Anschlusspunkt Q des Kraftwerkblockes,
- U_{rG} Bemessungsspannung des Generators,
- X_d'' Bezogene subtransiente Reaktanz des Generators, bezogen auf die Bemessungsimpedanz mit $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ mit $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$,
- φ_{rG} Phasenwinkel zwischen I_{rG} und $U_{rG}/\sqrt{3}$,
- x_T Bezogene Reaktanz des Blocktransformators bei Hauptanzapfung des Stufenschalters $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$,
- t_r Bemessungswert des Übersetzungsverhältnisses des Blocktransformators $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$,
- $1 \pm \rho_t$ ist einzuführen, wenn der Blocktransformator Anzapfungen hat und wenn eine dieser Anzapfungen dauernd verwendet wird, sonst ist $1 \pm \rho_t = 1$ zu setzen.

Beispiel 3.3 – Ermittlung der Impedanz eines Kraftwerksblockes

Für einen Kraftwerksblock mit Stufenschalter soll die korrigierte Impedanz Z_{SK} ermittelt werden.

Gegeben sind:

Für den Generator: $U_{rG} = 10,5 \text{ kV}$; $S_{rG} = 137,5 \text{ MVA}$; $\cos\varphi_{rG} = 0,8$
 $R_G/X_d'' = 0,05$; $x_d'' = 0,183$

Für den Transformator: $S_{rT} = 140 \text{ MVA}$; $t_r = 115,5 \text{ kV}/10,5 \text{ kV}$; $u_{kT} = 13,6\%$;
 $u_{RrT} = 0,8\%$

Es gilt Formel (3.57) mit dem Korrekturfaktor K_S nach Formel (3.58):

$$K_S = \frac{(110 \text{ kV})^2 (10,5 \text{ kV})^2}{(10,5 \text{ kV})^2 (115,5 \text{ kV})^2} \frac{1,1}{1 + |0,182 - 0,136| \cdot \sqrt{1 - 0,8^2}} = 0,97.$$

Die Impedanzen für den Generator:

$$X_d'' = x_d'' \cdot \frac{U_{rG}^2}{100\% \cdot S_{rG}} = 0,182 \cdot \frac{(10,5 \text{ kV})^2}{137,5 \text{ MVA}} = 0,146 \text{ } \Omega,$$

$$R_G = X_d''(R_G/X_d'') = 0,146 \text{ } \Omega \cdot 0,05 = 0,073 \text{ } \Omega.$$

und für den Transformator:

$$Z_T = \frac{u_{kT} \cdot U_{rTHV}^2}{100\% \cdot S_{rG}} = 0,182 \cdot \frac{13,6\% \cdot (115,5 \text{ kV})^2}{100\% \cdot 140 \text{ MVA}} = 12,96 \text{ } \Omega,$$

$$R_T = \frac{u_{RrT} \cdot U_{rTHV}^2}{100\% \cdot S_{rG}} = \frac{0,8\% \cdot (115,5 \text{ kV})^2}{100\% \cdot 140 \text{ MVA}} = 7,623 \text{ } \Omega,$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{12,96^2 - 7,623^2} \text{ } \Omega = 10,481 \text{ } \Omega$$

wird die komplexe korrigierte Impedanz des Kraftwerksblockes mit Formel (3.57):

$$\underline{Z}_{SK} = 0,97 \left((115,5/10,5)^2 \cdot (0,037 + j0,146) + (7,623 + j12,96) \right) \Omega,$$

$$\underline{Z}_{SK} = (7,789 + j14,13) \Omega$$

mit dem dazugehörigen Betrag:

$$|\underline{Z}_{SK}| = Z_{SK} = \sqrt{7,789^2 + 14,13^2} \text{ } \Omega = 16,13 \text{ } \Omega.$$