3.2.5 Berechnung größter und kleinster Kurzschlussströme

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 Kurzschlusseintritt 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 $\vartheta = 20\,°C$ 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 Stromschienen, 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 (Netznennspannung 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 Netznennspannung,
  - 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:

$$\underline{Z}_{BM} = R_{BM} + jX_{BM}. \tag{3.36}$$

Der Betrag der Impedanz des Betriebsmittels ist dann

$$Z_{BM} = \left|\underline{Z}_{BM}\right| = \sqrt{R_{BM}^2 + X_{BM}^2}. \tag{3.37}$$

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 Netznennspannung!) 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:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \ldots + \underline{Z}_n. \tag{3.38}$$

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

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

» **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:

$$\underline{Z}_{k/400\,V} = \underline{Z}_{1/400\,V} + \underline{Z}_{2/400\,V} + \underline{Z}_{3/400\,V} + \ldots + \underline{Z}_{n/400\,V}. \tag{3.40}$$

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:

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

umgerechnet werden:

$$Z_{k/LV} = Z_{k/HV} \cdot \frac{1}{t_r^2}. \tag{3.42}$$

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 Netznennspannung nicht mit der Bemessungsspannung des Transformators übereinstimmen muss (z. B. $U_n = 400\,V$, $U_{rT} = 420\,V$).
Für die Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstromes wird die bisher betrachtete Mitimpedanz $Z_k = Z_{(1)k}$ 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:

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

Für Berechnungen im Elektroenergieversorgungsnetz kann $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ 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 Sternpunkterdung 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 $Z_{(0)1}$ weggelassen:

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

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:

$$Z_k = \left|\underline{Z}_1\right| + \left|\underline{Z}_2\right| + \left|\underline{Z}_3\right| + \ldots + \left|\underline{Z}_n\right| = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \ldots + Z_n \tag{3.45}$$

bzw.

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

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:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S''_k} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}}. \tag{3.47}$$

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:

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

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 $\underline{Z}_Q = R_Q + jX_Q$ 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:

$$\frac{R_Q}{X_Q} = -\frac{1}{3} \cdot \ln \frac{\kappa - 1{,}02}{0{,}98}. \tag{3.49}$$

Allgemein gilt für die Netzreaktanz X_Q:

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

und damit folgt für die Netzresistanz R_Q:

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

Für Hochspannungsanlagen kann i. d. R. die Netzresistanz 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.

	30 kV		20 kV		10 kV		690 V		420 V	
S_k MVA	Z_{Qmin} Ω	Z_{Qmax} Ω	Z_{Qmin} Ω	Z_{Qmax} Ω	Z_{Qmin} Ω	Z_{Qmax} Ω	Z_{Qmin} mΩ	Z_{Qmax} mΩ	Z_{Qmin} mΩ	Z_{Qmax} mΩ
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 mΩ bezogen auf die Netznennspannung; ermittelt mit den Formeln (3.52) und (3.53) für Überschlagsberechnungen

(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 Netznennspannung $U_n = 20\,\text{kV}$ die Anfangskurzschlussleistungen $S''_{kmax} = 250\,\text{MVA}$ und $S''_{kmin} = 210\,\text{MVA}$ 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.

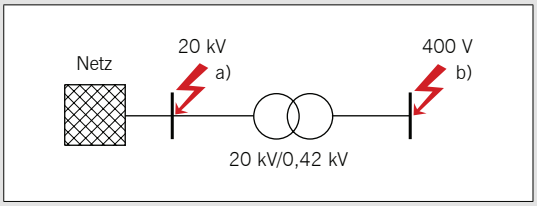

Bild 3.20
Ermittlung der Netzimpedanz (Beispiel 3.1)

Lösung

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

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

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

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

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

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

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).

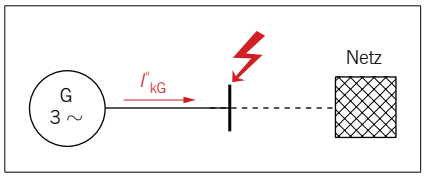

Bild 3.21
Generatoren mit direktem Netzanschluss

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:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G(R_G + jX''_d), \tag{3.54}$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x''_d \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}}, \tag{3.55}$$

$$Z_G \approx X''_d = \frac{x''_d \cdot U_{rG}^2}{100\,\% \cdot S_{rG}}; \tag{3.56}$$

c_{max} Spannungsfaktor (Tafel 3.1),
U_n Netznennspannung,
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 $Z_{rG} = U^2_{rG}/S_{rG}$,
φ_{rG} Phasenwinkel zwischen $\underline{I}_{rG}$ und $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$.

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 $U_{rG} \leq 1\,000\,\text{V}$,
$R_{Gf} = 0{,}07 \cdot X''_d$ Generatoren mit $U_{rG} > 1\,\text{kV}$ und $S_{rG} < 100\,\text{MVA}$,
$R_{Gf} = 0{,}05 \cdot X''_d$ Generatoren mit $U_{rG} > 1\,\text{kV}$ und $S_{rG} > 100\,\text{MVA}$.

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 Resistanzen wird:

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

Der Korrekturfaktor KG 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 $\underline{Z}_{GK}$ bestimmt:

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

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.

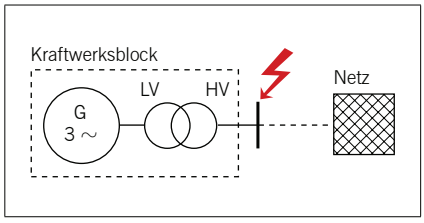

Bild 3.22
Generatoren mit Anschluss über einen Blocktransformator (Kraftwerksblock)

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:

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

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:

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

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),

$\underline{U}_{nQ}$ Netznennspannung am Anschlusspunkt Q des Kraftwerkblockes,

$\underline{U}_{rG}$ 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 $\underline{I}_{rG}$ und $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$,

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 $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$,

$1 \pm p_t$ ist einzuführen, wenn der Blocktransformator Anzapfungen hat und wenn eine dieser Anzapfungen dauernd verwendet wird, sonst ist $1 \pm p_t = 1$ 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: $S_{rT} = 140\,\text{MVA}$; $t_r = 115{,}5\,\text{kV}/10{,}5\,\text{kV}$; $u_{krT} = 13{,}6\,\%$;
$u_{RrT} = 0{,}8\,\%$

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

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

Die Impedanzen für den Generator:

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

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

und für den Transformator:

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

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

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

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

$$\underline{Z}_{SK} = 0{,}97\Big((115{,}5/10{,}5)^2\cdot(0{,}037+\text{j}0{,}146)+(7{,}623+\text{j}12{,}96)\Big)\Omega,$$

$$\underline{Z}_{SK} = (7{,}789+\text{j}14{,}13)\,\Omega$$

mit dem dazugehörigen Betrag:

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