

Berechnung von Kurzschlussströmen - Teil 3

Berechnung der I_{cc} mit der Impedanzenmethode

I_{cc} in Abhängigkeit von der Kurzschlussart

Dreipoliger Kurzschluss

Dieser Fehler entspricht der Zusammenschaltung der drei Phasen. Der Kurzschlussstrom I_{cc3} beträgt:

$$I_{cc3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

wobei U (verkettete Spannung) der Leerlaufspannung des Transformators entspricht, die um 3 bis 5% höher liegt als die Klemmenspannung unter Last. In einem 390-V-Netz zum Beispiel beträgt die angenommene Spannung $U = 410$ V mit einer Phasenspannung von $U/\sqrt{3} = 237$ V.

Die Berechnung des Kurzschlussstroms reduziert sich somit auf die Berechnung der Impedanz Z_{cc} , der Ersatzimpedanz aller von I_{cc} durchflossenen Impedanzen (der Quelle und der Leitungen) vom Generator bis zur Fehlerstelle (siehe Abb. 12). Dies ist effektiv die "direkte" Impedanz pro Phase:

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}$$

$\sum R$ = Summe der in Serie geschalteten Widerstände

$\sum X$ = Summe der in Serie geschalteten Reaktanzen

Der dreipolige Fehler gilt als jener, der die höchsten Fehlerströme erzeugt. Effektiv wird der Fehlerstrom im Ersatzschema eines Mehrphasensystems nur durch die Impedanz einer Phase unter der Phasenspannung des Netzes begrenzt. Somit ist die Berechnung von I_{cc3} unerlässlich, um die Betriebsmittel (in Bezug auf die auszuhaltenden Stromstärken und elektrodynamischen Beanspruchungen) auswählen zu können.

Isolierter zweipoliger Kurzschluss

Dieser entspricht einem von der verketteten Spannung U gespeisten Fehler zwischen zwei Phasen. Der dabei auftretende Strom I_{cc2} ist kleiner als bei einem dreipoligen Fehler:

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3} \approx 0,86 I_{cc3}$$

Isolierter einpoliger Kurzschluss

Dieser entspricht einem von der Phasenspannung $V = U/\sqrt{3}$ gespeisten Fehler zwischen einer Phase und dem Neutralleiter. Der dabei auftretende Strom I_{cc1} beträgt:

$$I_{cc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

In bestimmten Fällen eines einpoligen Fehlers ist die Nullimpedanz der Quelle niedriger als Z_{cc} (zum Beispiel an den Klemmen eines Transformators in Stern-Zickzack-Schaltung oder eines Generators im subtransienten Zustand. Der Strom kann dann bei einem einpoligen Fehler höher sein als bei einem dreipoligen Fehler.

(Einpoliger oder zweipoliger) Erdschluss

Bei einem solchen Fehler kommt die Nullimpedanz Z_0 zur Wirkung. Außer beim Vorhandensein von elektrischen Maschinen, bei denen die Nullimpedanz reduziert ist, ist der

auftretende Strom I_{cc} niedriger als beim dreipoligen Kurzschluss. Seine Berechnung kann je nach der Sternpunktbehandlung (dem Erdungsschema) für die Wahl der Einstellwerte der gleichpoligen (HS) oder differentiellen (NS) Schutzeinrichtungen erforderlich sein.

Zusammenfassende Tabelle der verschiedenen Kurzschlussströme
(siehe Abb. 12).

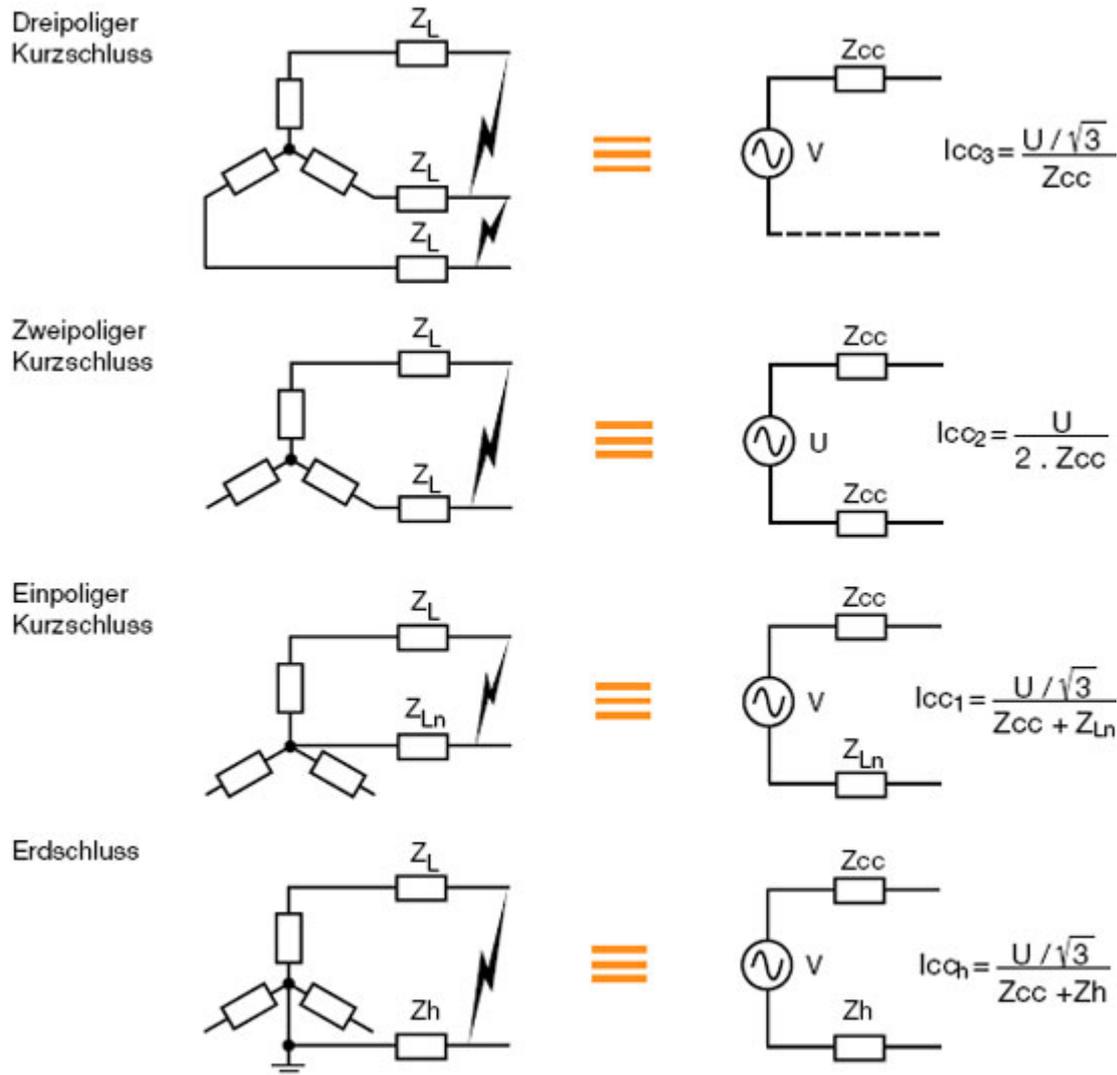


Abb. 12: Die verschiedenen Kurzschlussströme.

Bestimmung der verschiedenen Kurzschlussimpedanzen

Das Prinzip dieser Methode besteht darin, die Kurzschlussströme aufgrund der Impedanz des vom Kurzschlussstrom durchflossenen "Stromkreises" zu bestimmen. Diese Impedanz wird berechnet, nachdem man separat die einzelnen Widerstände und Reaktanzen der Fehlerschleife von einschließlich der Stromversorgungsquelle bis zur betrachteten Stelle addiert hat. (Die Nummern (X) dienen dazu, im Beispiel am Schluss dieses Kapitels die im Text enthaltenen Erklärungen leicht zu finden.)

Impedanzen des Netzes

Impedanz des vorgeschalteten Netzes

In den meisten Berechnungen geht man speisungsseitig nicht weiter als bis zur Übergabestelle der Energie. Die Kenntnis des vorgeschalteten Netzes beschränkt sich somit in der Regel auf die vom Versorgungsunternehmen gelieferten Angaben, d.h. lediglich die Kurzschlussleistung S_{cc} (in MVA). Die Ersatzimpedanz des vorgeschalteten Netzes beträgt:

$$(1) \quad Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

U ist die verkettete Spannung des unbelasteten Netzes.

Der vorgeschaltete Widerstand und die vorgeschaltete Reaktanz können aufgrund von R_a/Z_a in der HS ermittelt werden:

$R_a / Z_a \cdot 0,3$ in 6 kV,

$R_a / Z_a \cdot 0,2$ in 20 kV,

$R_a / Z_a \cdot 0,1$ in 150 kV.

$$(2) \quad X_a = 0,980 Z_a \text{ in 20 kV,}$$

Innere Impedanz des Transformators

Die Impedanz Z_T berechnet sich aus der Kurzschlussspannung u_{cc} ausgedrückt in %:

$$(3) \quad Z_T = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n}$$

U = Verkettete Leerlaufspannung des Transformators

S_n = Scheinleistung des Transformators

$U \cdot u_{cc}$ = Spannung, die auf der Primärseite des Transformators angelegt werden muss, damit die Sekundärseite bei kurzgeschlossenen sekundärseitigen NS-Klemmen vom Nennstrom I_n durchflossen wird.

Für HS/NS-Speisetransformatoren der öffentlichen Stromversorgung sind die Werte von u_{cc} von der EDF (HN52 S20) und in einem europäischen Normenentwurf (PR-HD 428.1S1) festgelegt (siehe Abb. 13). In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass die Genauigkeit dieser Werte einen unmittelbaren Einfluss auf die Berechnung der I_{cc} hat, weil ein Fehler von $x\%$ für u_{cc} einen Fehler von der gleichen Größenordnung ($x\%$) für Z_T bewirkt.

Leistung des HS/NS-Speisetransformators ≤ (in kVA)	630	800	1000	1250	1600	2000
Kurzschlussspannung u_{cc} (in %)	4	4,5	5	5,5	6	7

Abb. 13: Normierte Kurzschlussspannung u_{cc} für HS/NS-Speisetransformatoren der öffentlichen Stromversorgung.

(4) Normalerweise $R_T \ll X_T$, in der Größenordnung von $0,2 X_T$, wobei die innere Impedanz der Transformatoren mit der Reaktanz X_T gleichgesetzt werden kann. Für kleine Leistungen ist hingegen die Berechnung von Z_T notwendig, da das Verhältnis R_T/X_T größer ist. Dieser Widerstand wird somit wie folgt aus den ohmschen Verlusten (W) in den Wicklungen berechnet:

$$W = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{W}{3 \cdot I_n^2}$$

Anmerkungen:

(5) Wenn n Transformatoren von gleicher Leistung parallel geschaltet sind, müssen ihre Werte für die innere Impedanz sowie den Widerstand oder die Reaktanz durch n dividiert werden.

Besondere Beachtung muss den Spezialtransformatoren geschenkt werden. Zum Beispiel die Transformatoren der Gleichrichtergruppen haben Werte von u_{cc} , die 10 bis 12%

erreichen, um den Kurzschlussstrom zu begrenzen. Unter Berücksichtigung der Impedanz auf der Speisungsseite des Transformators und der inneren Impedanz des Transformators kann der Kurzschlussstrom wie folgt ausgedrückt werden:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} (Z_a + Z_T)}$$

In erster Näherung können Z_a und Z_T mit ihren Reaktanzen gleichgesetzt werden. Die Kurzschlussimpedanz Z_{cc} ist dann gleich ihrer algebraischen Summe.

Die Impedanz des vorgeschalteten Netzes kann in diesem Fall vernachlässigt werden, wobei der neue Wert des Kurzschlussstroms beträgt:

$$I'_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_T}$$

Der relative Fehler beträgt:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{I'_{cc} - I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{Z_a}{Z_T} = \frac{U^2 / S_{cc}}{u_{cc} \cdot U^2 / S_n}$$

und somit:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{100}{u_{cc}} \times \frac{S_n}{S_{cc}}$$

Die Abbildung 14 zeigt den zusätzlichen Fehler bei der Berechnung von I_{cc} , wenn die vorgeschaltete Impedanz vernachlässigt wird. Diese Abbildung zeigt sehr gut, dass die vorgeschaltete Impedanz bei Netzen vernachlässigt werden kann, deren Kurzschlussleistung S_{cc} im Verhältnis zur Leistung S_n des Transformators hoch ist. So beträgt für $S_{cc}/S_n = 300$ der Fehler etwa 5%.

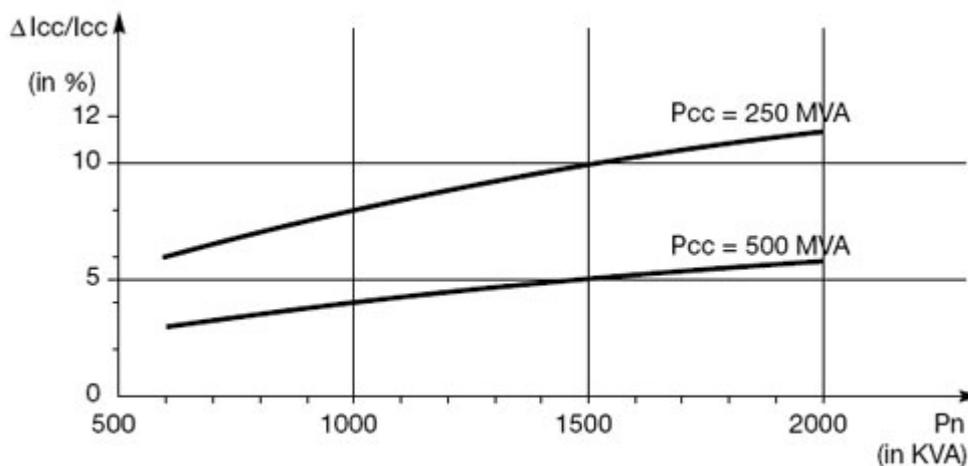


Abb. 14: In die Berechnung des Kurzschlussstroms eingebrachter Fehler, wenn die Impedanz Z_a des vorgeschalteten Netzes vernachlässigt wird.