

## Berechnung von Kurzschlussströmen - Teil 6

### Beziehungen zwischen den Impedanzen der einzelnen Spannungsebenen einer Anlage

#### Impedanzen in Abhängigkeit von der Spannung

Die Kurzschlussleistung  $S_{cc}$  an einer bestimmten Stelle des Netzes ist gegeben durch:

$$S_{cc} = U \cdot I \sqrt{3} = \frac{U^2}{Z_{cc}}$$

Dieser Ausdruck der Kurzschlussleistung bedeutet definitionsgemäß, dass  $S_{cc}$  an einer bestimmten Stelle des Netzes unabhängig von der Spannung unveränderlich ist. Ferner bedeutet der Ausdruck

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

dass alle Impedanzen berechnet werden müssen, indem sie mit der Spannung der Fehlerstelle in Beziehung gebracht werden, was eine gewisse Komplikation ist, die in Berechnungen für Netze mit zwei oder mehreren Spannungsebenen zu Fehlern führen kann. Somit muss die Impedanz einer Hochspannungsleitung für die Berechnung eines Kurzschlusses auf der NS-Seite des Transformators mit dem umgekehrten Quadrat des Übersetzungsverhältnisses multipliziert werden:

$$(13) \quad Z_{BT} = Z_{HT} \left( \frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2$$

Eine einfache Methode bietet die Möglichkeit, diese Schwierigkeiten zu umgehen: die von H. Rich vorgeschlagene sogenannte Methode der relativen Impedanzen.

#### Berechnung der relativen Impedanzen

Dabei handelt es sich um eine Berechnungsmethode, mit der eine Beziehung zwischen den Impedanzen der einzelnen Spannungsebenen einer elektrischen Anlage hergestellt werden kann. Diese Methode beruht auf der folgenden Übereinkunft: Die Impedanzen (in Ohm) werden durch das Quadrat der verketteten Spannung (in Volt) dividiert, die das Netz an der Stelle hat, wo diese in Betrieb stehen. Dadurch werden sie zu relativen Impedanzen.

- Für Freileitungen und Kabel betragen die relativen Impedanzen

$$R_R = \frac{R}{U^2} \text{ und } X_R = \frac{X}{U^2}$$

- Für Transformatoren wird die Impedanz aufgrund ihrer Kurzschlussspannungen  $u_{cc}$  und ihrer Nennleistungen  $S_n$  ausgedrückt:

$$Z = \frac{U^2}{S_n} \cdot \frac{u}{100}$$

- Für elektrische Maschinen ist die Formel identisch, wobei  $e$  die in % ausgedrückte Impedanz bedeutet.
- Für das Ganze wird die Kurzschlussleistung, nachdem alle relativen Impedanzen zusammengestellt worden sind, mit der folgenden Formel bestimmt:

$$S_{cc} = \frac{1}{\sum Z_R}$$

woraus der Kurzschlussstrom  $I_{cc}$  an der Stelle mit der Spannung  $U$  wie folgt abgeleitet werden kann:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \sum Z_R}$$

### Berechnungsbeispiel

*(mit den Impedanzen der Quellen, des vorgeschalteten Netzes, des Speisetransformators und der Leitungen)*

**Aufgabenstellung:** Gegeben ist ein 20-kV-Netz, das über eine 2 km lange Freileitung eine HS/ NS-Transformatorstation speist, sowie ein 1-MVA-Generator, der parallel dazu die Sammelschienen dieser Transformatorstation speist. Zwei parallel 1000- kVA-Transformatoren beliefern die NSSammelschienen, an die 20 Abgänge wie jener für den Motor M angeschlossen sind (siehe Abb. 20). Diese 20 Motoren von je 50 kW sind alle mit gleichen Kabeln verbunden und stehen im Kurzschlussmoment alle in Betrieb. Es muss der Kurzschlussstrom  $I_{cc}$  an den angegebenen Stellen im Schema des Netzes berechnet werden, d.h.:

- Bei A an den HS-SS mit vernachlässigbarer Impedanz
- Bei B an den NS-SS in 10 m Abstand von den Transformatoren
- Bei C an den SS eines Unterverteilers
- Bei D an den Klemmen eines Motors M

Dann wird der Rückstrom der Motoren in C und B und hierauf in D und A berechnet. In diesem Beispiel werden die Reaktanzen  $X$  und Widerstände  $R$  unter ihrer Anlagenspannung berechnet. Die Methode der relativen Impedanzen wird nicht angewendet.

## I - Kurzschluss bei A (HS-SS) (Betroffene Teile: 1, 2, 3)

### Vorgeschaltetes Netz

$U_1 = 20 \text{ kV}$

$P_{cc} = 500 \text{ MVA}$

### Freileitung

3 Kupferseile  $50 \text{ mm}^2$

Länge = 2 km

### Generator

1 MVA

$Z_{\text{subtr.}} = 15\%$

### 2 Transformatoren

1000 kVA

Sekundärspannung 237/410 V

$e = 5\%$

### NS-HV

Sammelschienen

3 Schienen  $400 \text{ mm}^2/\text{Phase}$ , Kupfer

Länge = 10 m

### Verbindung 1

3 Einleiterkabel  $400 \text{ mm}^2$ ,

Aluminium

Länge = 80 m

### NS-Unterverteiler

### Verbindung 2

3 Drehstromkabel  $35 \text{ mm}^2$ , Kupfer

Länge = 30 m

### Motor

50 kW

$e = 25\%$

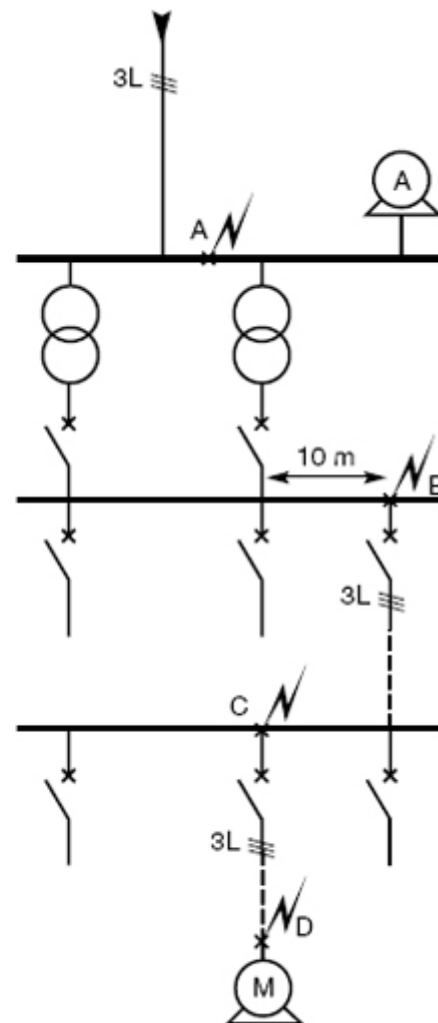


Abb. 20: Aufgabe: Berechnung von  $I_{cc}$  an den Punkten A, B, C und D.

Die Impedanz "Netz + Leitung" liegt parallel zu jener des Generators. Letztere ist jedoch wesentlich größer und kann vernachlässigt werden:

$$X_A = 0,78 + 0,8 \approx 1,58 \, \Omega$$

$$R_A = 0,15 + 0,72 \approx 0,87 \, \Omega$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \approx 1,80 \, \Omega \text{ woraus}$$

$$I_A = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 1,80} \approx 6415 \text{ A}$$

$I_A$  ist der "stationäre  $I_{cc}$ ", und zum Berechnen des  $I_{cc}$  (unsymmetrisches Maximum):

$$\frac{R_A}{X_A} = 0,55$$

was aus der Kurve der Abbildung 9  $k = 1,2$  ergibt, so dass  $I_{cc}$ :

$$1,2 \times \sqrt{2} \times 6415 = 10887 \text{ A.}$$

## II - Kurzschluss bei B (NS-HV-SS) [Betroffene Teile: (1, 2, 3) + (4, 5, 6)]

Die auf der Hochspannungsseite berechneten Reaktanzen X und die Widerstände R müssen durch Multiplikation mit dem Quadrat des Spannungsverhältnisses **(17)** in das NS-Netz "übergeführt" werden, d.h.:

$$(410 / 20\,000)^2 = 0,42 \text{ woraus}$$

$$X_B = [(X_A \cdot 0,42) + 4,2] + 0,15 + 1,5] \cdot 10^{-3}$$

$$X_B = 6,51 \text{ m}\Omega \text{ und}$$

$$R_B = [(R_A \cdot 0,42) + 0,84] \cdot 10^{-3}$$

$$R_B = 1,2 \text{ m}\Omega$$

Diese Berechnung zeigt einerseits die reduzierte Bedeutung der vorgeschalteten HS-Reaktanz im Verhältnis zu jener der beiden parallelgeschalteten Transformatoren, und andererseits, dass die Impedanz der 10 Meter NS-SS nicht vernachlässigbar ist.

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \approx 6,62 \text{ m}\Omega$$

$$I_B = \frac{410}{\sqrt{3} \times 6,62 \times 10^{-3}} \approx 35\,758 \text{ A}$$

$$\frac{R_B}{X_B} = 0,18 \text{ was aus der Kurve der Abbil-}$$

dung 9 k = 1,58 ergibt, so dass  $I_{cc}$ :

$$1,58 \times \sqrt{2} \times 35\,758 \approx \mathbf{79\,900 \text{ A.}}$$

Wenn zudem der Kurzschlusslichtbogen berücksichtigt wird (siehe Kurzschlusslichtbogen **(16)**), wird  $I_B$  höchstens 28 606 A und mindestens 17 880 A.

## III - Kurzschluss bei C (SS des NS-Unterverteilers) [Betroffene Teile: (1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8)]

Die Reaktanzen und Widerstände des Leistungsschalters und der Kabel müssen zu  $X_B$  und  $R_B$  hinzugefügt werden.

$$X_C = (X_B + 0,15 + 12) \cdot 10^{-3} = 18,67 \text{ m}\Omega$$

und

$$R_C = (R_B + 2,4) \cdot 10^{-3} = 3,6 \text{ m}\Omega$$

Anhand dieser Werte kann man die Bedeutung der Begrenzung der  $I_{cc}$  infolge der Kabel verstehen.

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \approx 19 \text{ m}\Omega$$

$$I_C = \frac{410}{\sqrt{3} \times 19 \times 10^{-3}} \approx 12\,459 \text{ A}$$

$$\frac{R_C}{X_C} = 0,19, \text{ was aus der Kurve der}$$

Abbildung 9 k = 1,55 ergibt, so dass  $I_{CC}$ :

$$1,55 \times \sqrt{2} \times 12\,459 \approx \mathbf{27\,310 \text{ A.}}$$

#### IV - Kurzschluss bei D (NS-Motor) [Betroffene Teile: (1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8) + (9, 10)]

Die Reaktanzen und Widerstände des Leistungsschalters und der Kabel müssen zu  $X_C$  und  $R_C$  hinzugefügt werden.

$$X_D = (X_C + 0,15 + 2,7) \cdot 10^{-3} = 21,52 \text{ m}\Omega$$

und

$$R_D = (R_C + 19,2) \cdot 10^{-3} = 22,9 \text{ m}\Omega$$

$$Z_D = \sqrt{R_D^2 + X_D^2} \approx 31,42 \text{ m}\Omega$$

$$I_D = \frac{410}{\sqrt{3} \times 31,42 \times 10^{-3}} \approx 7\,534 \text{ A}$$

$$\frac{R_D}{X_D} = 1,06, \text{ was aus der Kurve der}$$

Abbildung 9 k  $\approx$  1,05 ergibt, so dass  $I_{CC}$ :

$$1,05 \times \sqrt{2} \times 7\,534 \approx \mathbf{11\,187 \text{ A.}}$$

Auf jeder Berechnungsebene ist ersichtlich, dass der Einfluss der Leistungsschalter in Verhältnis zu den übrigen Teilen des Netzes vernachlässigbar ist.

## Lösung

Abschnitt	Berechnungen	Resultate
(Die Nummern ⊗ verweisen auf die Erklärungen im vorhergehenden Text)		
20 kV ➡		X (Ω)    R (Ω)
1. Vorgeschaltetes Netz	$Z_a = (20 \times 10^3)^2 / 500 \times 10^6$ (1)	
	$X_a = 0,98 Z_a$ (2)	0,78
	$R_a = 0,2 X_a$	0,15
2. Freileitung (50 mm <sup>2</sup> )	$X_{ca} = 0,4 \times 2$ (7)	0,8
	$R_{ca} = 0,018 \times \frac{2000}{50}$ (6)	0,72
3. Generator	$X_A = \frac{15}{100} \times \frac{(20 \times 10^3)^2}{10^6}$ (10)	60
	$R_A = 0,1 X_A$ (11)	6
20 kV ➡		X (mΩ)    R (mΩ)
<b>Kurzschluss bei A</b>		
4. Transformatoren	$Z_T = \frac{1}{2} \times \frac{5}{100} \times \frac{410^2}{10^6}$ (3) (5)	
	$X_T = Z_T$	4,2
	$R_T = 0,2 X_T$ (4)	0,84
410 V ➡		
5. Leistungsschalter	$X_d = 0,15$ (15)	0,15
6. Sammelschienen (3 x 400 mm <sup>2</sup> )	$X_B = 0,15 \times 10^{-3} \times 10$ (9)	1,5
	$R_B = 0,0225 \times \frac{10}{3 \times 400}$ (6)	= 0
<b>Kurzschluss bei B</b>		
7. Leistungsschalter	$X_d = 0,15$	0,15
8. Verbindung 1 durch Kabel (3 x 400 mm <sup>2</sup> )	$X_{c1} = 0,15 \times 10^{-3} \times 80$	12
	$R_{c1} = 0,036 \times \frac{80}{3 \times 400}$ (6)	2,4
<b>Kurzschluss bei C</b>		
9. Leistungsschalter	$X_d = 0,15$	0,15
10. Verbindung 2 durch Kabel (35 mm <sup>2</sup> )	$X_{c1} = 0,09 \times 10^{-3} \times 30$ (8)	2,7
	$R_{c2} = 0,0225 \times \frac{30}{35}$	19,2
<b>Kurzschluss bei D</b>		
11. Motor 50 kW	$X_m = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{50 \times 10^3}$ (12)	840
	$R_m = 0,2 X_m$	168