

## Algorytm obliczania charakterystycznych wielkości prądu przy zwarciu trójfazowym (wg PN-EN 60909-0:2002)

W 10 krokach wyznaczone są: prąd początkowy zwarciaowy  $I''_k$ , prąd udarowy (szczytowy)  $i_p$ , prąd wyłączeniowy symetryczny  $I_b$  i prąd zastępczy cieplny zwarciaowy  $I_{th}$ .

1. Obliczenie impedancji zastępczej sieci  $Z_Q$ , reaktancji  $X_Q$  oraz rezystancji  $R_Q$  sprowadzonych na odpowiedni poziom napięcia.

$$X_Q \approx Z_Q = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot S''_k \cdot \vartheta^2} \quad (1)$$

$$R_Q \approx 0,1 \cdot X_Q$$

Oznaczenia:

$c$  - współczynnik napięciowy:

Napięcie znamionowe $U_n$	Dla prądu zwarcia	
	maksymalnego $C_m$	minimalnego $C_m$
nN (230/400 V)	1,00	0,95
nN (>400 V)	1,05	1,00
SN (1 ÷ 35 kV)	1,10	1,00
WN (>35 kV)	1,10	1,00

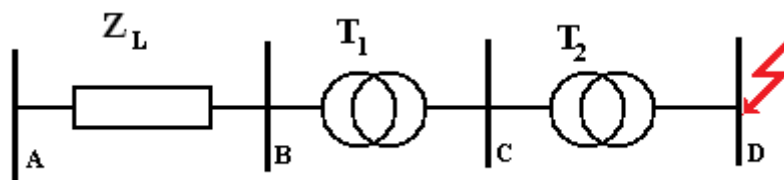
$\vartheta = \frac{U_{rHV}}{U_{rLV}}$  - przekładnia transformatora (HV-napięcie górne,  
LV-napięcie dolne),

$U_r$  - napięcie znamionowe transformatora,

$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_k$  - moc zwarciaowa,

$U_n$  - napięcie znamionowe sieci.

Sposób sprowadzania impedancji  $Z_L$  na poziom napięcia zwarcia D przykładowo ilustruje rysunek 1 i odpowiadająca mu zależność na  $Z'_L$ .



Rysunek 1. Przeliczenie impedancji na odpowiedni poziom napięcia

$$Z'_L = Z_L \cdot \frac{1}{g_{T1}^2} \cdot \frac{1}{g_{T1}^2} = Z_L \cdot \left( \frac{U_{rT1C}}{U_{rT1B}} \right)^2 \cdot \left( \frac{U_{rT2D}}{U_{rT2C}} \right)^2$$

2. Obliczenie impedancji transformatora  $Z_T$ , reaktancji  $X_T$  oraz rezystancji  $R_T$  na poziomie dolnego napięcia transformatora.

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu\%}}{100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} \quad (2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

Dla transformatorów o mocy większej od 2,5 MVA lub o napięciu zwarcia większym od 10% można przyjąć  $X_T \approx Z_T$

3. Wyznaczenie współczynnika korekcyjnego transformatora  $K_T$  (przypadek 3 pokazany na rysunku 2). Dla prostych układów zasilania z systemu za pośrednictwem transformatora norma pozwala określić zwarcie jako odległe, gdy skorygowana reaktancja transformatora jest większa od podwojonej wartości reaktancji systemu zasilającego  $X_{TK} > 2 X_Q$ .

$$K_T = \frac{0,95 \cdot c_{max}}{1 + 0,6 x_T}$$

$$\text{albo } K_T = \frac{U_n \cdot c_M}{U_m^o \cdot \left( \frac{I_{mT}^o}{I_{rT}} \right) \cdot \sin \varphi_T^o} \quad (3)$$

Przy czym reaktancja transformatora  $x_T$  jest wyrażona w jednostkach względnych  $x_T \approx \frac{u_k\%}{100}$ .

$U_m^o, I_{mT}^o, \varphi_T^o$  - oznaczają odpowiednio najwyższe napięcie w sieci, największą wartość prądu obciążenia transformatora i kąt obciążenia transformatora; wszystko w stanie przedzwarciovym ( $^o$ ).

Gdy miejsce zwarcia jest zasilane bezpośrednio przez generator lub blok generator-transformator, wyznacza się współczynniki korekcyjne dla impedancji generatora  $K_G$  lub bloku generator-transformator  $K_B$ .

Współczynnik korekcyjny dla generatora:

$$K_G = \frac{U_n \cdot c_M}{U_{rG} \cdot (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG})} \quad (4)$$

przy czym:

$x_d'' = \frac{x_d''}{100}$  - wartość względna reaktancji podprzejściowej generatora,

$U_{rG}$  - napięcie znamionowe generatora,

$\varphi_{rG}$  - kąt przesunięcia fazowego między prądem a napięciem znamionowym generatora.

Współczynnik korekcyjny bloku generator-transformator:

$$K_B = \frac{U_n^2 \cdot c_M}{U_{rG}^2 \cdot (1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sin \varphi_{rG})} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \quad (5)$$

4. Wyznaczenie skorygowanej impedancji lub reaktancji transformatora.

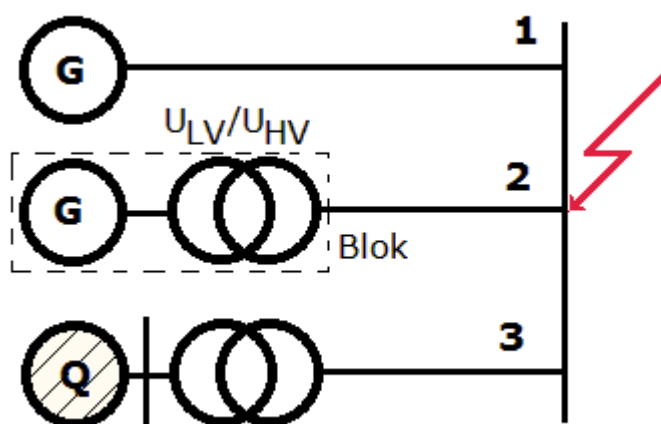
$$Z_{TK} = K_T \cdot Z_T \quad (6)$$

Podobnie można skorygować impedancję generatora i bloku:

$$Z_{KG} = K_G \cdot Z_G \quad (7)$$

$$Z_{KB} = K_B \cdot (X'_G + X_T)$$

przy czym  $X'_G = X_G \cdot g_T^2$  jest reaktancją generatora sprowadzoną do poziomu napięcia zwarcia znajdującego się w tym przypadku po stronie górnego napięcia transformatora, tj.  $U_{rTHV}$  (patrz rysunek p.2).



Rysunek 2. Źródła prądu zwarciovego: 1-generator, 2-blok generator-transformator, 3-transformator zasilany z systemu

5. Obliczenie impedancji zwarciovwej bez uwzględnienia silników asynchronicznych. Impedancja ta jest równa sumie impedancji sieci zastępczej oraz skorygowanej impedancji transformatora (p. 3 z rys. 2).

$$Z_{kQ} = Z'_Q + Z_{TK} \quad (8)$$

6. Wyznaczenie prądu zwarciovego początkowego bez uwzględnienia silników asynchronicznych.

$$I''_{kQ} = \frac{U_n \cdot c}{\sqrt{3} Z_{kQ}} \quad (9)$$

7. Jeśli sumaryczny prąd znamionowy silników nie przekracza 1% prądu zwarciovego, wyznaczonego bez udziału tych silników, to wpływ silników można pominąć. W przeciwnym przypadku, gdy zachodzi zależność 10

$$0,01 I''_{kQ} < \sum I_{rM} \quad (10)$$

trzeba obliczyć prąd zwarciovego początkowy traktując silniki jako dodatkowe źródło prądu zwarciovego.

Inne kryterium uwzględniania silników przedstawia wzór 11

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \sum S_{rT}}{S''_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad (11)$$

gdzie:  $\sum P_{rM}$  - suma mocy znamionowych silników,  $\sum S_{rT}$  - suma mocy znamionowych transformatorów zasilających silniki,  $S''_{kQ}$  - moc zwarciova w miejscu zasilania.

Wartość wypadkowa prądu początkowego jest równa (wzór 12):

$$I''_k = I''_{kQ} + I''_{kM} \quad (12)$$

8. Wyznaczenie współczynnika udarowego  $\kappa$  osobno dla wszystkich źródeł wykorzystując stosunki rezystancji do reaktancji R/X.

$$i_{pQ} = \sqrt{2} \kappa I''_{kQ} \quad (13)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X}$$

Następnie można obliczyć prądy udarowe dla poszczególnych źródeł i prąd zwarciovego udarowy jako sumę prądów udarowych składowych.

$$i_p = i_{pQ} + i_{pM} \quad (14)$$

9. W kolejnym kroku wyznacza się współczynnik  $\mu$ , który uwzględnia zmniejszanie się składowej okresowej prądu zwarciovego. Gdy należy uwzględnić wpływ silników indukcyjnych trzeba określić także

współczynnik  $q$ , przedstawiający większą szybkość zanikania prądu zwarciovego dla tych silników.  
Po tym można wyznaczyć prąd wyłączeniowy symetryczny  $I_b$  równy sumie prądów wyłączeniowych od poszczególnych źródeł (wzór 15).

$$I_b = \mu I''_{kQ} + \mu q I''_{kM} \quad (15)$$

10. Zastępczy ciepły prąd zwarciový oblicza się z zależności 16.

$$I_{th} = I''_k \cdot \sqrt{m+n} \quad (16)$$

Współczynnik  $m = f(\kappa, t_k)$  określa wpływ zmian składowej nieokresowej, a współczynnik  $n = f(I''_k/I_{kr}, t_k)$  – wpływ zmian składowej okresowej.

Tab. 1. Zestawienie oznaczeń wielkości zwarciovych

<b>Wielkość zwarciová</b>	<b>wg PN-74/E-05002</b>	<b>wg IEC 60909</b>
Prąd początkowy	$I_p$	$I''_k$
Współczynnik udaru	$k_u$	$\kappa$
Prąd udarowy	$i_u$	$i_p$
Prąd wyłączeniowy symetryczny	$I_{ws}$	$I_b$
Zastępczy prąd ciepły	$I_{tz}$	$I_{th}$
Składowá nieokresová	$i_{nok}$	$i_{dc}$

#### Literatura:

1. Markiewicz H., Urządzenia elektroenergetyczne, WNT Warszawa 2001
2. Kacejko P., Machowski J., Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, WNT Warszawa 2002
3. Kanicki A.: Obliczenia wielkości zwarciovych z wykorzystaniem nowych norm, Konferencja naukowa "Zabezpieczenia obwodów elektrycznych za pomocą bezpieczników topikowych" Poznań 2005-06-21, <http://www.bezpieczniki.com/strony/wyklady/4/obliczenia.htm>
4. Kończykowski S., Bursztyński J., Zwarcia w układach elektroenergetycznych, WNT Warszawa 1965