

Krystyna BARAN¹

OBLICZANIE PRĄDÓW ZWARCIOWYCH W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

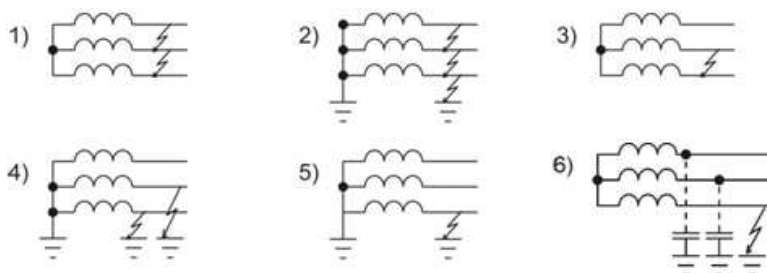
W artykule przedstawiono rodzaje zwarć. W obliczeniach wielkości zwarciovych posługujemy się normami, które zostały wymienione w artykule. Opisane są wielkości charakterystyczne prądu zwarciovego: prąd zwarciov początkowy I_k'' , prąd zwarciov udarowy i_p , prąd wyłączeniowy symetryczny I_b , prąd zwarciov ustalony I_k , zastępczy cieplny prąd zwarciov I_{th} . Źródłem prądu zwarciovego oprócz generatorów są silniki synchroniczne, asynchroniczne i kompensatory synchroniczne. W przykładzie obliczeniowym pokazano, kiedy należy uwzględnić wpływ silników przyłączonych do sieci. Obliczając prądy zwarciove należy przeliczać impedancje z jednego poziomu na inny, najczęściej na poziom napięcia w miejscu zwarcia. W artykule przedstawiono cel obliczeń zwarciovych. Zwarciu zwykle towarzyszy przepływ prądu o wartości znacznie większej niż w warunkach znamionowych. Prądy zwarciove mogą wywierać działania cieplne i dynamiczne. Ciepłne działanie prądów zwarciovych objawia się zniszczeniem lub stopieniem przewodów, izolacji, urządzeń elektrycznych. Duża wartość prądów zwarciovych przyczynia się do powstania sił dynamicznych, które są groźne dla konstrukcji urządzeń elektrycznych oraz izolatorów. W sieciach z punktem neutralnym izolowanym prądy zwarcia doziemnego nie osiągają dużych wartości, ale ich działanie stwarza niebezpieczeństwo przepięć oraz możliwość porażenia w miejscu zwarcia. W obliczeniach zwarciovych pomija się wszystkie nieliniowości w obwodach zastępczych, parametry poprzeczne elementów obwodu, prądy obciążeniowe, a napięcie w punkcie sieci elektroenergetycznej jest równe napięciu znamionowemu, pomija się regulację przekładni transformatorów. W tworzeniu modeli matematycznych systemu elektroenergetycznego uproszczenia powinny dawać wartości prądów zwarciovych większe od tych, które można zarejestrować i zmierzyć. W celu ograniczenia skutków zwarć należy dobierać urządzenia do wartości prądów zwarciovych, stosować szybkie i skuteczne zabezpieczenia, stosować dławiki oraz zmianę konfiguracji sieci

Słowa kluczowe: obliczenia zwarciove, prąd zwarciov, zwarcia z udziałem silników asynchronicznych, charakterystyczne parametry zwarciove.

¹ Krystyna Baran, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Wydział Politechniczny, Katedra Elektrotechniki, e-mail: krysia2@o2.pl

1. Wiadomości ogólne

Obliczenia wielkości charakterystycznych prądów zwarciovych przeprowadza się przy projektowaniu nowego urządzenia lub analizowaniu jego przydatności w eksploatacji. Oprócz pracy w warunkach normalnych należy sprawdzić zachowanie urządzenia w stanach zakłóceń, do których najczęściej zalicza się zwarcia. Zwarcie nazywamy połączenie, przez pomijalnie małą impedancję, dwóch lub więcej punktów systemu elektroenergetycznego, które w normalnych warunkach posiadają różne potencjały.



Rys.1. Rodzaje zwarć: 1) fazowe; 2) 3-fazowe z ziemią; 3) dwufazowe; 4) dwufazowe z ziemią; 5) 1-fazowe z punktem neutralnym uziemionym; 6) 1-fazowe w sieciach z punktem neutralnym izolowanym

Fig.1. Types of fault: 1) phase 2) 3-phase to ground; 3) double phase; 4) double phase to ground; 5) single phase with grounded neutral; 6) single phase in isolated neutral network

W sieciach trójfazowych prądu przemiennego, niskiego oraz wysokiego napięcia do 230 kV, pracujących przy częstotliwości 50 lub 60 Hz wyróżnia się:

- 1) zwarcie w pobliżu generatora, podczas którego prąd zwarciovych zawiera składową przemienną o malejącej amplitudzie.
- 2) zwarcie odległe od generatora, przy którym prąd zwarciovych zawiera składową przemienną o stałej amplitudzie.

2. Obliczanie zwarć wg norm

Określenia charakterystycznych parametrów zwarciovych oraz metody obliczeniowe zwarć są podane w polskich normach:

- PN-EN 60909 – 0:2002(U). Prądy zwarciovych w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Obliczanie prądów.
- PN-EN 60909 – 3:2002(U). Prądy zwarciovych w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarć doziemnych i częściowe prądy zwarciovych płynące w ziemi.
- PN-EN 60865 – 1:2002(U). Obliczanie skutków prądów zwarciovych.

Wielkości charakterystyczne prądu zwarciovego:

A. Prąd zwarciovowy początkowy I_k'' należy wyznaczyć ze wzoru [1]

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} |Z_k|} \quad (1)$$

gdzie: $c \cdot U_N / \sqrt{3}$ - napięcie fazowe źródła zastępczego, Z_k - zastępcza impedancja jednej fazy elementów obwodu zwarciovego dla składowej symetrycznej zgodnej ($Z_k = Z_1$), R_k - zastępcza rezystancja ($R_k = R_1$) i X_k - zastępcza reaktancja elementów obwodu dla składowej symetrycznej zgodnej ($X_k = X_1$), c - współczynnik napięciowy.

Tabela 1. Wartość współczynnika napięciowego c

Table 1. The value of the voltage factor c

Napięcie znamionowe	Współczynnik napięciowy c	
	c_{\max}	c_{\min}
Do 1000 V		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) inne	1,05	1,00
1 kV ÷ 35 kV	1,10	1,00
35 kV ÷ 230 kV	1,10	1,00

Gdy zwarcie jest zasilane z bloku transformator-generator, impedancję zwarciovą skorygowaną generatora dla składowej zgodnej oblicza się z zależności:

$$\underline{Z}_{GK} = k_G \underline{Z}_G \quad (2)$$

gdzie: $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$ jest impedancją generatora, k_G - współczynnik korekcyjny obliczany ze wzoru:

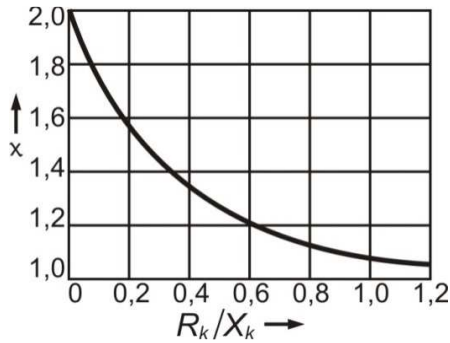
$$k_G = \frac{U_N \cdot c_{\max}}{U_{NG} (1 + X_d'' \cdot \sin \varphi_{NG})} \quad (3)$$

W którym: U_N - napięcie znamionowe sieci, U_{NG} - napięcie znamionowe generatora, X_d'' - wartość reaktancji podprzejściowej.

B. Prąd zwarciaowy udarowy i_p wyznacza się ze wzoru:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (4)$$

gdzie: κ – współczynnik udaru [1] określony z wykresu przedstawionego na rys. 2



Rys. 2 Zależność współczynnika χ od stosunku R_k/X_k

Fig. 2 Dependence of a factor χ on a ratio R_k/X_k

Współczynnik ten może być obliczony z zależności:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R_k/X_k} \quad (5)$$

C. Prąd wyłączeniowy symetryczny I_b

Dla zwarć odległych od generatora wartość prądu wyłączeniowego symetrycznego przyjmuje się

$$I_b = I_k'' \quad (6)$$

natomiast dla zwarć w pobliżu generatora, wartość prądu I_b jest równa

$$I_b = \mu I_k'' \quad (7)$$

gdzie: μ - określa stopień zanikania składowej okresowej prądu zwarciaowego i zależy od czasu własnego minimalnego t_{\min} (czas między chwilą wystąpienia zwarcia, a momentem rozdzielenia styków pierwszego bieguna łącznika) oraz od stosunku prądu początkowego i znamionowego generatora I_k''/I_{NG} .

D. Prąd zwarciovuy ustalony I_k

Dla zwarć odległych od generatora prąd zwarciovuy ustalony przyjmuje się

$$I_k = I_k'' \quad (8)$$

Dla zwarć w pobliżu generatora oblicza się dwie wartości prądu ustalonego:

- *maksymalną*, odpowiadającą maksymalnemu wzbudzeniu generatora

$$I_{k \max} = \lambda_{\max} I_{NG} \quad (9)$$

- *minimalną*, odpowiadającą stałemu wzbudzeniu maszyny synchronicznej w stanie biegu jałowego

$$I_{k \min} = \lambda_{\min} I_{NG} \quad (10)$$

E. Zastępczy cieplny prąd zwarciovuy I_{th}

Wyznacza się z zależności

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (11)$$

gdzie: m – uwzględnia wpływ cieplny składowej nieokresowej prądu zwarciovowego; n – uwzględnia wpływ cieplny składowej okresowej prądu zwarciovowego.

Wartości współczynników m , n odczytuje się z wykresów podanych w [6]. Dla sieci rozdzielczej przyjmuje się zwykle $n = 1$. Gdy występuje samoczynne ponowne załączenie automatyki SPZ o krótkich przerwach bezprądowych, prąd I_{th} należy obliczać ze wzoru:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 T_{ki}} \quad (12)$$

gdzie: T_k - całkowity czas trwania zwarcia, $T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki}$; T_{ki} - czas trwania zwarcia w kolejnych i - tych cyklach SPZ; I_{thi} - zastępczy cieplny prąd zwarciovuy wyznaczony dla i - tego cyklu zwarciovowego.

c) Zwarcie trójfazowe zasilane z kilku źródeł niezależnych

W przypadku takiego rodzaju zwarcia, wartości prądów charakteryzujących zwarcie w miejscu jego wystąpienia (I_k'' , i_p , I_b i I_k) oblicza się przez sumowanie prądów zwarciovych dopływających z poszczególnych gałęzi równoległych. Prądy zwarciove w każdej gałęzi oblicza się w taki sam sposób, jak dla zwarcia trójfazowego zasilanego z jednego źródła. Rozróżnia się tutaj dwa przypadki:

- zwarcie odległe od generatora, przy którym I_k'' , I_b oraz i_p są sumą prądów poszczególnych gałęzi, oraz zakłada się, że $I_k = I_b = I_k''$.
- zwarcie w pobliżu generatora, wymagające podczas obliczania wartości I_k'' , i_p , I_b i I_k wyznaczenia prądów pochodzących od źródeł znajdujących się zarówno blisko zwarcia, jak też od źródeł odległych.

d) Zwarcie niesymetryczne

Impedancja obwodu zwarciovego \underline{Z}_k zależy od rodzaju zwarcia, dla których przyjmuje się:

- dla zwarcia trójfazowego $\underline{Z}_k = \underline{Z}_1$,
- dla zwarcia dwufazowego $\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$,
- dla zwarcia jednofazowego $\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0$. (13)

Wielkości \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 oznaczają odpowiednio impedancję zgodną, przeciwną i zerową zastępczego obwodu zwarciovego. Prąd zwarciovych początkowy dla zwarć niesymetrycznych wyrażają następujące zależności:

- dla zwarcia dwufazowego:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_N}{|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|} \quad (14)$$

- dla zwarcia jednofazowego:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0|} \quad (15)$$

e) Uwzględnianie wpływu silników w obliczeniach zwarciovych

Źródłem prądu zwarciovego, oprócz generatorów, są kompensatory synchroniczne oraz silniki synchroniczne i asynchroniczne. Należy zatem uwzględnić ich wpływ podczas obliczania I_k'' , i_p , I_b i I_{th} oraz I_k .

W obliczeniach prądów zwarciovych można pominąć silniki, które nie pracują jednocześnie. Nie uwzględnia się również silników przyłączonych do

sieci energetyki zawodowej niskiego napięcia. Można pominąć także wpływ silników wysokiego i niskiego napięcia przyłączonych do sieci, w której wystąpiło zwarcie za pośrednictwem transformatorów dwuuzwojeniowych, jeśli jest spełniona nierówność:

$$\sum_{i=1}^N P_{nMi} \leq \frac{0,8 \sum_{i=1}^M S_{nTi}}{c \cdot 100 \frac{\sum_{i=1}^M S_{nTi}}{S_{kQ}} - 0,3} \quad (16)$$

w której: ΣP_{nMi} - suma znamionowych mocy czynnych wszystkich silników w kW, ΣS_{nTi} - suma mocy znamionowej transformatorów bezpośrednio zasilających silniki, w kVA, n - liczba silników pracujących równocześnie, M - liczba transformatorów pracujących równocześnie, S_{kQ} - moc zwarciova w miejscu zwarcia wyznaczona bez udziału silników.

Prąd początkowy silnika oblicza się według zależności:

$$I_{kM}'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_M} \quad (17)$$

w której Z_M jest impedancją silnika wyznaczoną ze wzoru:

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{k_r \sqrt{3} I_{NM}} = \frac{U_{NM}^2}{k_r S_{NM}} \quad (18)$$

$$S_{NM} = \frac{P_{NM}}{\eta \cos \varphi_n} \quad (19)$$

gdzie: U_{NM} - napięcie znamionowe silnika, I_{NM} - prąd znamionowy silnika, k_r - współczynnik rozruchu, równy ilorazowi prądu rozruchowego i znamionowego silnika, P_{NM} - znamionowa moc czynna silnika, $\cos \varphi_n$ - znamionowy współczynnik mocy, η - sprawność znamionowa.

W przypadku zwarcia na zaciskach silnika lub w sieci, w miejscu nieodległym od silnika, można prąd początkowy obliczyć ze wzoru:

$$I_{kM}'' = c \cdot k_r \cdot I_{NM} \quad (20)$$

Prąd udarowy pochodzący od silników i_{pM} należy wyznaczyć zgodnie z zależnością, przy czym κ przy braku danych dotyczących R_M/X_M , można przyjmować:

$\kappa_M = 1,75$ – silniki wysokiego napięcia o mocy odniesionej do jednej pary biegunów ≥ 1 MW, co odpowiada $R_M/X_M = 0,1$.

$\kappa_M = 1,65$ – silnik wysokiego napięcia o mocy odniesionej do jednej pary biegunów < 1 MW, co odpowiada $R_M/X_M = 0,15$.

$\kappa_M = 1,3$ – dla silników niskiego napięcia zasilanych liniami kablowymi, co odpowiada $R_M/X_M = 0,42$.

3. Przykład obliczeniowy

Dla sieci o schemacie pokazanym na rys.3 wyznaczyć charakterystyczne wartości prądów podczas zwarcia w punkcie zaznaczonym na rys.3. Do obliczeń przyjąć czas trwania zwarcia $T_k = 0,15$ s i minimalny czas własny wyłącznika

W1, $t_{\min} = 0,1$ s.

Dane elementów sieci:

Sieć zasilająca:

$$U_N = 110 \text{ kV}, S_k'' = 2800 \text{ MVA}, \frac{R_Q}{X_Q} = 0,1$$

Linie kablowe L_1, L_2 :

$$R_0 = 0,1 \text{ } \Omega/\text{km}, X_0 = 0,1 \text{ } \Omega/\text{km}, l = 5 \text{ km}$$

Transformatory T_1, T_2 :

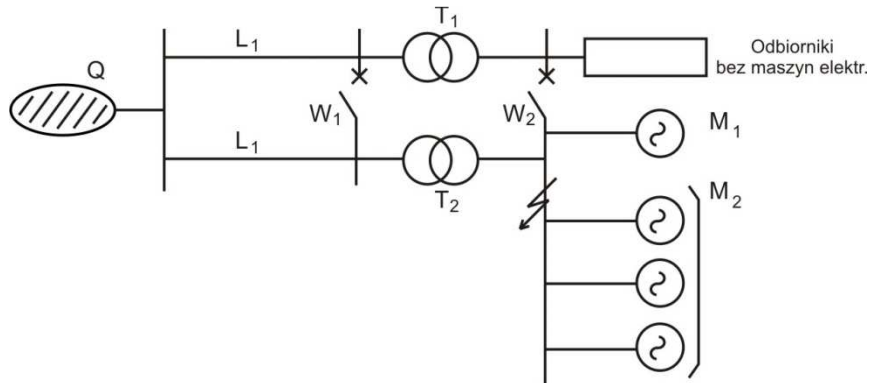
$$S_N = 16 \text{ MVA}, \Delta U_{z\%} = 10,5 \%, v_1 = 115/6,6 \text{ kV}, \Delta P_{cu} = 0,6 \%$$

Silniki indukcyjne:

$$M1 : P_N = 5 \text{ MW}, U_N = 6 \text{ kV}, \cos \varphi = 0,85, \eta = 0,96, k_r = 4,$$

gdzie $k_r = I_{LR} / I_{NM}$ - stosunek prądu przy nieruchomym wirniku do prądu znamionowego silnika, $p = 2$ - liczba par biegunów

M2 (silniki) : $P_N = 1\text{MW}$, $U_N = 6\text{ kV}$, $\cos \varphi = 0,84$, $\eta = 0,95$, $k_r = 5,5$, $p = 1$



Rys.3. Schemat ideowy układu sieci przemysłowej SN. Oznaczenia na rysunku: Q – sieć, L_1, L_2 – linie kablowe, T_1, T_2 – transformatory, M_1, M_2 – silniki.

Fig. 3. Block diagram representing the SN industrial network system. Picture symbols: Q – supply network, L_1, L_2 – cable lines, T_1, T_2 – transformers, M_1, M_2 – machines.

Obliczenia zostaną przeprowadzone przy założeniu, że wyłącznik W_1 jest otwarty, a wyłącznik W_2 jest zamknięty oraz przy włączonym M_1 i wyłączonych silnikach M_2 .

Rozwiązanie:

Obliczenia przy włączonych silnikach M_1 i M_2

Rezystancje i reaktancje elementów na poziomie napięcia 6 kV wynoszą:

$$X_Q = \frac{cU_N^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{\vartheta_1^2} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{2800} \cdot \left(\frac{6,6}{115}\right)^2 = 0,016 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,0016 \Omega$$

$$X_{L1} = X_{L2} = X_0 l \cdot \frac{1}{\vartheta_t^2} = 5 \cdot 0,1 \left(\frac{6,6}{115}\right)^2 = 0,0016 \Omega$$

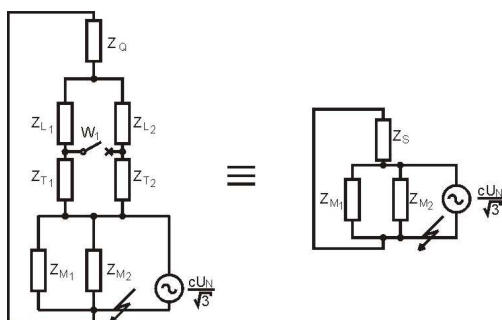
$$R_{L1} = R_{L2} = 0,0016 \Omega$$

Wartość względna reaktancji transformatora jest równa [1]:

$$\Delta U_{X\%} = \sqrt{\Delta U_{Z\%}^2 - \Delta P_{Cu\%}^2} = \sqrt{10,5^2 - 0,6^2} = 10,48\%$$

$$X_{T1} = \frac{\Delta U_{X\%} \cdot U_N^2}{100 S_N} = \frac{10,48 \cdot 6,6^2}{100 \cdot 16} = 0,285 \Omega$$

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_{cu\%} \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N} = \frac{0,6 \cdot 6,6^2}{100 \cdot 16} = 0,016 \Omega$$



Rys.4. Schemat impedancji zastępczych układu z rys.3 i jego uproszczenie. Oznaczenia na rysunku: Z_{M1} , Z_{M2} – impedancje silników, Z_{T1} , Z_{T2} – impedancje transformatorów, Z_Q – impedancja sieci, Z_{L1} , Z_{L2} – impedancja linii kablowych, Z_S – impedancja sieci, transformatorów i linii kablowych.

Fig.4. Diagram representing equivalent impedances of the system shown in Figure 3 and a simple schematic of this system. Picture symbols: Z_{M1} , Z_{M2} – impedances of machines, Z_{T1} , Z_{T2} – impedances of transformers, Z_Q – impedance of supply network, Z_{L1} , Z_{L2} – impedance of cable lines, Z_S – impedance of supply network, transformers, cable lines.

Zwarcie w zaznaczonym punkcie należy traktować jako zwarcie zasilane z trzech niezależnych źródeł (sieć zastępcza, silnik M1, grupa silników M2).

Reaktancja zwarcia gałęzi zasilania z sieci 110 kV wynosi:

$$X_S = X_Q + \frac{1}{2}(X_{L1} + X_{T1}) = 0,016 + \frac{1}{2}(0,0016 + 0,285) = 0,159 \Omega$$

Rezystancja tego samego obwodu wynosi:

$$R_S = R_Q + \frac{1}{2}(R_{L1} + R_{T1}) = 0,0016 + \frac{1}{2}(0,0016 + 0,016) = 0,0104 \Omega$$

Z uwagi na bardzo małą wartość ($R_S \ll X_S$) pomijamy rezystancję elementów i wtedy prąd zwarcia początkowy dopływający od tej sieci do miejsca zwarcia wynosi:

$$I''_{kS} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} X_S} = \frac{1,1 \cdot 6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,159} = 23,96 \text{ kA}$$

Duże silniki indukcyjne są traktowane, jako źródła prądu zwarciovego i dlatego całkowita wartość prądu zwarciovego początkowego jest wyznaczona z zależności

$$I''_k = I''_{kS} + I''_{kM1} + I''_{kM2}$$

Impedancje silników indukcyjnych uwzględnia się, jeżeli suma ich prądów znamionowych jest większa niż jeden procent początkowy prądu zwarciovego obliczonego bez udziału silników [6, 7] czyli $\sum I_{NM} > 0,01 I''_{kS}$.

Impedancje zastępczą silników indukcyjnych wyznaczamy ze wzoru:

- silnik M1:

$$Z_{M1} = \frac{1}{k_r} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{1}{4} \cdot \frac{6^2}{6,13} = 1,47 \Omega$$

gdzie:

$$S_N = \frac{P_N}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{5 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,96} = 6,13 \text{ MVA}$$

- silnik M2 (zespół 3 silników)

$$Z_{M2} = \frac{1}{3 \cdot k_r} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{1}{3 \cdot 5,5} \cdot \frac{6^2}{1,25} = 1,75 \Omega$$

gdzie:

$$S_N = \frac{P_N}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{1 \cdot 10^6}{0,84 \cdot 0,95} = 1,25 \text{ MVA}$$

Prądy znamionowe dla silników M₁ i M₂ wynoszą:

$$I_{N(M1)} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{6,13 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 0,59 \text{ kA}$$

$$I_{N(M2)} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{1,25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 0,12 \text{ kA}$$

Warunek $\sum I_n > 0,01 \cdot I''_{kS}$ jest spełniony ponieważ $0,12 + 0,59 > 0,01 \cdot 23,96 \text{ kA}$

Prądy zwarciove początkowe pochodzące od tych silników przy zwarcu na ich zaciskach wynoszą odpowiednio:

$$I''_{kM1} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,47} = 2,59 \text{ kA}$$

$$I''_{kM2} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,75} = 2,18 \text{ kA}$$

Całkowity zwarciovy prąd początkowy wynosi:

$$I''_k = I''_{kS} + I''_{kM1} + I''_{kM2} = 23,96 + 2,59 + 2,18 = 28,73 \text{ kA}$$

Wpływ silników indukcyjnych jest w tym przypadku znaczący, bowiem powoduje wzrost prądu I''_{kS} o około 16,5 %. Prąd wyłączeniowy I_b charakteryzuje zanikanie składowych okresowych prądu zwarciovego. Dla sieci zasilającej, w której nie ma wyróżnionych żadnych źródeł prądu odległych od miejsca zwarcia można przyjąć, że $I_{bs} = I''_{kS}$, czyli efekt zanikania składowej okresowej jest pomijalnie mały.

Dla silników indukcyjnych przy wyznaczaniu prądów wyłączeniowych symetrycznych korzystamy ze wzoru [1]:

$$I_{bM1} = \mu_{M1} \cdot q_{M1} \cdot I''_{kM1}$$

$$I_{bM2} = \mu_{M2} \cdot q_{M2} \cdot I''_{kM2}$$

gdzie: μ_M - jest współczynnikiem zanikania składowej okresowej prądu zwarciovego zależnym od stosunku I''_k / I_{NM} i od minimalnego czasu rozdzielenia styków t_{\min} wyłącznika wyłączającego zwarcie, q_M - jest współczynnikiem określającym udział silników indukcyjnych w prądzie wyłączeniowym symetrycznym.

Współczynnik μ_M dla $t_{\min} = 0,10$ s określają wzory empiryczne

$$\mu_{M1} = 0,62 + 0,72 \exp(-0,32 I''_{kM1} / I_{NM1}) = 0,8$$

$$\mu_{M2} = 0,62 + 0,72 \exp(-0,32 I''_{kM2} / I_{NM2}) = 0,72$$

Współczynnik q określamy dla $t_{\min} = 0,1$ s

$$q = 0,57 + 0,12 \ln(p)$$

gdzie: p – moc znamionowa czynna przypadająca na jedną parę biegunów silnika

$$\text{Dla } M1 : P_1 = 2,5 \text{ MW} \quad i \quad q_{M1} = 0,57 + 0,12 \cdot \ln 2,5 = 0,68$$

$$\text{Dla } M2 : P_2 = 1,0 \text{ MW} \quad i \quad q_{M2} = 0,57 + 0,12 \cdot \ln 1,0 = 0,57$$

Zgodnie ze wzorem prądy wyłączeniowe są równe:

$$I_{bM1} = 0,8 \cdot 0,68 \cdot I_{kM1}'' = 1,41 \text{ kA}$$

$$I_{bM2} = 0,72 \cdot 0,57 \cdot I_{kM2}'' = 0,89 \text{ kA}$$

Prąd wyłączeniowy w miejscu zwarcia określamy następująco:

$$I_b = I_{bs} + I_{bM1} + I_{bM2} = 23,96 + 1,41 + 0,89 = 26,26 \text{ kA}$$

Prąd zwarciovowy ustalony I_k dla zwarć odległych od generatora jest określony, jako

$$I_k = I_{ks}'' = 23,96 \text{ kA}$$

Przy obliczaniu udarowego prądu zwarciovowego sumujemy prądy udarowe pochodzące od poszczególnych źródeł zasilających zwarcie

$$i_p = i_{ps} + i_{pM1} + i_{pM2}$$

Prąd udarowy wyznacza się ze wzoru

$$i_p = \sqrt{2} \kappa \cdot I_k''$$

Współczynnik udaru κ określa się wg wykresów podanych w normie [7] w zależności od stosunku R_k/X_k (lub X_k/R_k) jak również na podstawie zależności przybliżonej dla:

$$1) \text{ układów sieciowych: } \kappa_s = 1,02 + 0,98 \exp(-3R_k / X_k)$$

2) silników wysokiego napięcia:

- $\kappa_M = 1,65$ dla $R_M / X_M = 0,15$ przy mocy $P < 1$ MW
- $\kappa_M = 1,75$ dla $R_M / X_M = 0,10$ przy mocy $P \geq 1$ MW

3) grupy silników nN z liniami kablowymi

$$\kappa_M = 1,3, \text{ dla } R_M / X_M = 0,42$$

Dla zewnętrznej sieci zasilającej stosunek

$$\frac{R_S}{X_S} = \frac{0,0104}{0,159} = 0,065$$

a zatem

$$\kappa_S = 1,02 + 0,98 \exp(-3 \cdot 0,065) = 1,83$$

$$i_{ps} \sqrt{2} \cdot \kappa_S I_{ks}'' = \sqrt{2} \cdot 1,83 \cdot 23,96 = 62,0 \text{ kA}$$

Dla silników indukcyjnych wysokiego napięcia o mocy odniesionej do jednej pary biegunów, $p \geq 1$ MW współczynnik $\kappa_M = 1,75$, stąd

$$i_{pM1} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{M1} \cdot I_{kM1}'' = \sqrt{2} \cdot 1,75 \cdot 2,59 = 6,41 \text{ kA}$$

$$i_{pM2} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{M2} \cdot I_{kM2}'' = 5,40 \text{ kA}$$

Całkowity prąd udarowy wynosi:

$$i_p = i_{ps} + i_{pM1} + i_{pM2} = 62,0 + 6,41 + 5,40 = 73,81 \text{ kA}$$

Prąd cieplny zastępczy zwarciovowy wyznacza się z zależności

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n}$$

W celu obliczania I_{th} wyznacza się stosunki

$$\kappa = \frac{i_p}{\sqrt{2} I_k''} = \frac{73,81}{\sqrt{2} \cdot 28,73} = 1,82$$

$$\mu = \frac{I_k''}{I_k} = \frac{28,73}{23,96} = 1,20$$

Dla $T_k = 0,15$ s oraz wyliczonych współczynników κ i μ odczytujemy z wykresów wartości m i n podanych w [6].

$$m = 0,4, \quad n = 0,95$$

$$I_{th} = 28,73\sqrt{0,4+0,95} = 33,4 \text{ kA}$$

Obliczenia przy włączonym silniku M1:

Wykorzystując wyniki obliczeń z pierwszej części przykładu wyznaczamy całkowity prąd zwarciovyy początkowy:

$$I_K'' = I_{KS}'' + I_{KM}''$$

$$I_{KS}'' = 23,96 \text{ kA}$$

$$I_{N(M1)} = 0,61 \text{ kA}$$

$$0,61 \text{ kA} > 0,01 \cdot 23,96 \text{ kA}$$

$$I_{K M1}'' = 2,59 \text{ kA}$$

$$I_K'' = 23,96 + 2,59 = 26,55 \text{ kA}$$

Wpływ silników indukcyjnych M1 powoduje wzrost prądu $I_{K''s}$ o około 10 %.

Prąd wyłączeniowy określamy następująco

$$I_b = I_{bs} + I_{bM1} = 23,96 + 1,41 = 25,37 \text{ kA}$$

Prąd zwarciovyy ustalony $I_K = I_{KS}''$

Obliczając udarowy prąd zwarciovyy uwzględniamy prądy od sieci i silnika M1

$$i_p = i_{pS} + i_{pM1} = 62 + 6,41 = 68,41 \text{ kA}$$

Prąd cieplny zastępczy zwarciovyy

$$\kappa = \frac{i_p}{\sqrt{2}I_K''} = \frac{68,41}{\sqrt{2} \cdot 26,55} = 1,82 \text{ kA}$$

Dla $T_k = 0,15\text{s}; \quad m = 0,4; \quad n = 0,95$

$$I_{th} = 26,55\sqrt{0,4+0,95} = 30,8 \text{ kA}$$

4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano główne zasady stosowania normy PN- EN 60909. Pokazano w skróconej prezentacji właściwości wzorów stosowanych, algorytm obliczania wielkości zwarciovych oraz przykład zastosowania normy. Obliczając reaktancję obwodu zwarciovego możemy stosować metodę jednostek mianowanych lub metodę jednostek względnych. Metoda jednostek względnych prowadzi do lekko zawyżonych wartości prądu zwarciovego.

W przedstawionym przykładzie obliczeniowym zastosowano metodę jednostek mianowanych. Reaktancje zostały przeliczone na poziom napięcia w miejscu zwarcia. Do przeliczania wykorzystano kwadraty rzeczywistych przekładni transformatorów. Przy wyznaczaniu prądu zwarciovego założono współczynnik napięciowy dla maksymalnego prądu zwarciovego. W obliczeniach obwodu zwarciovego została pominięta rezystancja z uwagi na jej bardzo małą wartość. Silniki asynchroniczne średniego napięcia są źródłem prądu zwarciovego i dla nich wyznaczono prąd zwarciovych początkowy, prąd zwarciovych udarowy, prąd zwarciovych wyłączeniowy symetryczny.

Porównując wyniki obliczeń należy zauważyć, że wartości prądów zwarciovych zmniejszyły się o około 8% w stosunku do wartości prądów przy włączonych wszystkich silnikach.

Wyznaczając wartości prądów zwarciovych w sieci przemysłowej należy uwzględnić silniki indukcyjne, ponieważ ich udział powoduje znaczny wzrost prądu zwarciovego.

Literatura

- [1] Kacejko P., Machowski J. : *Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych*, WNT Warszawa 2006
- [2] Kahl T.: *Sieci elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1984
- [3] Kotlarski W.: *Sieci elektroenergetyczne*, WSiP, Warszawa 1997
- [4] Kremens Z., Sobierajski M.: *Analiza systemów elektroenergetycznych* , WNT Warszawa 1996
- [5] Schlabbach J.: *Short-circuit Currents* ,The Institution of Engineering and Technology, London 2008
- [6] Baran K., Kutzner J.: *Zbiór zadań z podstaw elektroenergetyki*, Wydawnictwo PWSZ w Kaliszu, Kalisz 2006.
- [7] PN-EN 60909 – 0:2002(U). Prądy zwarciovych w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Obliczanie prądów.
- [8] PN-EN 60909 – 3:2002(U). Prądy zwarciovych w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarc doziemnych i częściowe prądy zwarciovych płynące w ziemi.
- [9] PN-EN 60865 – 1:2002(U). Obliczanie skutków prądów zwarciovych.

CALCULATING SHORT CIRCUIT CURRENTS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Summary

The article treats of types of short circuits. The norms used in the calculation of short circuits values are all mentioned in this article. The paper also describes parameters characteristic of short circuit current: I_k'' - initial symmetrical short-circuit current, i_p - maximum current, I_b - short-circuit breaking current, I_k - steady-state short-circuit current, I_{th} - thermal short-circuit current. The source of short circuit current lies not only in generators but also in synchronous and asynchronous machines, and synchronous compensators. The sample calculation given in the article shows when the influence of machines connected to the network should be taken into account. When calculating short circuit current the impedance from one level to another must be counted. Most frequently, it is the level of the current at the short circuit point that should be allowed for. The present article discusses the aim of the short circuit calculations. The short circuit itself is usually accompanied by current flows the value of which is much bigger than in the nominal conditions. Short circuit currents may exert thermal and dynamic effects. Thermal effects lead to damaging or melting of wires, and insulation of electric devices. The high value of short circuit currents contributes to the occurrence of dynamic forces which pose a threat to the construction of electric devices and insulators. In the networks with the insulated neutral point the ground short circuit currents do not reach very high values, but their occurrence constitute a danger of over-voltage and electric shock. In the short circuit calculations all the non-linear elements in the replacement circuits, as well as the cross parameters of the circuit and load currents, are neglected. The current at the point of electrical power grid equals the nominal current. The actual position of the transformer regulator does not have to be taken into account. In creating mathematical models of the electrical power system the calculated values of the short circuit current should be higher than those which can be measured. In order to reduce the adverse effects of short circuits all the electric devices should be chosen according to the value of the short circuit current. What is more, choke coils, network configuration, and effective protection ought to be applied.

Keywords: short circuit calculations, short circuit current, short circuits with the use of asynchronous machines, short circuit characteristic parameters.

DOI: 10.7862/re.2015.36

Tekst złożono w redakcji: październik 2015

Przyjęto do druku: grudzień 2015