

Metody obliczania prądów zwarciovych maksymalnych niezbędnych do doboru aparatury łączeniowej w oddziałowych sieciach kopalnianych według norm europejskiej i amerykańskiej

Artykuł obejmuje porównanie dwóch różnych metod obliczania prądów zwarciovych maksymalnych, opartych na zaleceniach norm IEC i IEEE/ANSI dotyczących obliczeń prądów zwarciovych niezbędnych do doboru aparatury łączeniowej w oddziałowych sieciach kopalnianych nn. W opracowaniu podano wzory wyznaczania impedancji zastępczych poszczególnych elementów obwodu zwarciovego oraz zasady obliczania charakterystycznych prądów zwarciovych, a także przedstawiono wyniki obliczeń sprawdzających dla przykładowej kopalnianej sieci oddziałowej.

1. WPROWADZENIE

Obserwowany w ostatnich latach wzrost mocy silników zainstalowanych w oddziałowych sieciach niskonapięciowych prowadzi do istotnych zmian w strukturze układów zasilania tych silników (zwykle związane to jest z obniżeniem wartości zastępczej impedancji układu zasilającego) oraz zwiększenia udziałowych prądów zwarciovych maksymalnych. Sytuacja taka powoduje wzrost wymagań stawianych aparaturze łączeniowej i innym elementom sieci elektroenergetycznej. Opis elektromagnetycznych i elektromechanicznych stanów nieustalonych (w tym zwarć) jest złożony i trudny do bezpośredniego wykorzystania w praktyce projektowej. Istotne jest więc stosowanie uproszczonych metod obliczeniowych, które umożliwiają szybkie wykonanie obliczeń zwarciovych przy jednoczesnym zapewnieniu wystarczającej dokładności. Stąd też od kilkudziesięciu lat tworzone są w wielu krajach normy. W Polsce obecnie stosowana jest norma IEC 60909. Jest ona dostępna w językach oryginalnych (angielskim i francuskim). Alternatywna me-

todo obliczania prądów zwarciovych maksymalnych niezbędnych do doboru aparatury łączeniowej zawarta jest w stosownych normach IEEE/ANSI. Normy te stosowane są w USA.

Jedna z podstawowych różnic między normami IEC a IEEE/ANSI dotyczy opisywanego przez te normy zakresu prowadzonych obliczeń zwarciovych. Norma europejska obejmuje obliczenia zarówno maksymalnych, jak i minimalnych wartości prądów zwarciovych, natomiast procedury obliczeniowe zawarte w normie amerykańskiej obejmują w zasadzie wyłącznie wartości maksymalnych prądów zwarciovych niezbędnych do doboru aparatury łączeniowej, gdyż są jedynie częścią szerszej normy opisującej parametry i wymagania stawiane aparaturze łączeniowej. Należy tu jednak zwrócić uwagę na fakt, że prądy zwarciove minimalne w dołowych sieciach kopalnianych oblicza się według normy PN-G-42042:1998.

Zakres niniejszego artykułu obejmuje omówienie podstawowych założeń obydwu norm oraz przykład obliczeniowy oparty na zbliżonej do występującej w polskich warunkach kopalnianej sieci nn.

2. ZASADY OBLICZANIA IMPEDANCJI ZASTĘPCZYCH WYBRANYCH ELEMENTÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

2.1. Wyznaczanie impedancji zastępczych elementów sieci według normy IEC

Impedancję zastępczą (zespoloną) sieci zasilającej można zapisać w postaci:

$$\underline{Z}_Q = R_Q + jX_Q \quad (1)$$

Przy znajomości mocy zwarciowej w miejscu zasilania S_k'' [MVA] wartość impedancji zastępczej sieci zasilającej wyznacza się według wzoru:

$$\underline{Z}_Q = \frac{cU_{nQ}^2 \cdot (R_Q/X_Q + j1)}{S_k'' \sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (2)$$

gdzie:

- c – współczynnik napięciowy,
- U_{nQ} – napięcie nominalne sieci w miejscu przyłączenia Q [kV],
- R_Q/X_Q – stosunek rezystancji do reaktancji zastępczej sieci.

W przypadku, gdy sieć zasilająca jest przyłączona przez transformator, należy dokonać przeliczenia impedancji tej sieci na napięcie sieci, w której przyjęto obliczeniowe miejsce zwarcia.

Impedancję zastępczą zespoloną transformatora dwuuzwojeniowego do obliczeń zwarciowych przedstawia wzór:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T \quad (3)$$

gdzie:

- R_T – rezystancja zastępcza transformatora [Ω],
- X_T – reaktancja zastępcza transformatora [Ω].

Jej wartość obliczana jest na podstawie parametrów znamionowych transformatora, np. według poniższej zależności:

$$\underline{Z}_T = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \left(1 + j \sqrt{\left(\frac{u_{kr}}{u_{Rr}} \right)^2 - 1} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- u_{Rr} – procentowa strata napięcia na rezystancji transformatora [%],
- u_{kr} – procentowe napięcie zwarcia [%],
- U_{rT} – napięcie znamionowe transformatora po stronie górnego lub dolnego napięcia [kV],
- S_{rT} – moc znamionowa pozorna transformatora [MVA].

W przypadku, gdy znana jest wartość całkowitych strat w uzwojeniach transformatora P_{krT} [MW] (przy prądzie znamionowym I_{rT}), wzór (4) można zapisać w następującej postaci:

$$\underline{Z}_T = P_{krT} \cdot \left(\frac{U_{rT}}{S_{rT}} \right)^2 \cdot \left(1 + j \sqrt{\left(\frac{u_{kr} \cdot S_{rT}}{100 \cdot P_{krT}} \right)^2 - 1} \right) \quad (5)$$

W normie IEC dla transformatorów dwuuzwojeniowych wprowadza się współczynnik korygujący impedancję transformatora. Wartość tego współczynnika oblicza się według równania:

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

gdzie:

- c_{\max} – współczynnik napięciowy,
- x_T – reaktancja względna transformatora
 $x_T = X_T(U_{rT}^2/S_{rT})$,
- X_T – reaktancja transformatora.

Wówczas skorygowana impedancja zastępcza (zespolona) transformatora dwuuzwojeniowego do obliczeń prądów zwarciowych wyraża się wzorem:

$$\underline{Z}_{TK} = K_T \cdot (R_T + jX_T) \quad (7)$$

Impedancję zastępczą (zespoloną) silnika indukcyjnego przedstawia równanie:

$$\underline{Z}_M = R_M + jX_M \quad (8)$$

Jeśli chodzi o wartość stosunku rezystancji do reaktancji zastępczej silnika indukcyjnego R_M/X_M niskonapięciowego, to norma [7] zaleca w każdym przypadku (bez względu na wartość mocy maszyny indukcyjnej na parę biegunów) przyjmować 0,42. Stąd dla silników indukcyjnych niskonapięciowych impedancję zastępczą obliczyć można bezpośrednio z równania:

$$\underline{Z}_M \cong \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2 \cdot \cos \varphi_{rM} \cdot \eta_{rM}}{1,0846 \cdot P_{rM}} \cdot (0,42 + j1) \quad (9)$$

gdzie:

- P_{rM} – moc czynna znamionowa silnika [MW],
- U_{rM} – napięcie znamionowe silnika [kV],
- I_{LR}/I_{rM} – stosunek znamionowego prądu rozruchowego (przy zatrzymanym wirniku) do prądu znamionowego silnika,
- $\cos \varphi_{rM}$ – znamionowy współczynnik mocy,
- η_{rM} – sprawność znamionowa silnika.

Ważnym zagadnieniem jest kwestia wpływu silników indukcyjnych na prądy zwarciove. Zgodnie z normą IEC silniki indukcyjne wpływają na prąd zwarciovy początkowy I_k'' , prąd zwarciovy udarowy i_p , prąd zwarciovy wyłączeniowy symetryczny oraz prąd zwarciovy ustalony I_k . W normie [7] podano warunki, których spełnienie dopuszcza pominięcie wpływu silników indukcyjnych na prąd zwarciovy. Warunek przedstawiony w sposób opisowy w p. 3.8.1 normy IEC pozwala na pominięcie wpływu silników indukcyjnych na prąd zwarciovy I_k'' w sieciach nn, jeżeli wpływ ten nie przekracza 5% prądu zwarciovego początkowego wyznaczonego bez udziału silników I_{kM}'' [2, 3, 7]. Poniżej tak sformułowanego warunku, w tej samej normie [7], podaje się warunek w postaci wzoru:

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_{kM}'' \quad (10)$$

gdzie:

- $\sum I_{rM}$ – suma prądów znamionowych silników przyłączonych bezpośrednio (bez udziału transformatorów) do sieci, w której przyjęto obliczeniowe miejsce zwarcia [kA],
- I_{kM}'' – prąd zwarciovy początkowy bez wpływu silników [kA].

Warunek przedstawiony w sposób opisowy w p. 3.8.1 normy IEC nie jest zgodny z warunkiem podanym w postaci wzoru (10). Z warunku (10) bowiem wynika, że wpływ silników indukcyjnych w prądzie zwarciowym można pominać, jeżeli suma prądów znamionowych silników przyłączonych bezpośrednio do sieci, w której przyjęto obliczeniowe miejsce zwarcia, nie przekracza 1% prądu zwarciovego początkowego obliczonego bez udziału tych silników. Należy zauważyć, iż w normie IEC w definicji (1.3.18) podano m.in., że zwarcie, dla którego wpływ silników indukcyjnych przekracza 5% początkowego prądu zwarciovego obliczonego bez udziału tych silników, należy traktować jako zwarcie w pobliżu generatora. Definicja ta przystaje do warunku pominięcia wpływu silników indukcyjnych w sieciach niskonapięciowych sformułowanego w sposób opisowy (tekstowy) w p. 3.8.1 normy [7]. W pracy [2] podano wzór, który jest zgodny z tym warunkiem, a którego spełnienie zwalnia z uwzględnienia silników indukcyjnych w obliczeniach zwarciowych w sieciach nn. Postać tego warunku jest następująca:

$$I_{kM}'' \leq 0,05 \cdot I_{kM}'' \quad (11)$$

Impedancję zastępczą linii kablowej do obliczania prądów zwarciowych maksymalnych obliczyć można z zależności:

$$\underline{Z}_L = R_L + jX_L = l \cdot (R'_L + jX'_L) \quad (12)$$

gdzie:

- $R'_L; X'_L$ – jednostkowa rezystancja i reaktancja linii kablowej [Ω/km],
- l – długość linii kablowej [km].

2.2. Wyznaczanie impedancji zastępczych według IEEE/ANSI

W normach IEEE/ANSI nie przewiduje się stosowania współczynników korygujących impedancje transformatorów i maszyn synchronicznych (w rozumieniu normy IEC). Natomiast należy stosować odpowiednie (odrębne dla prądu pierwszego okresu i prądu przerwania) mnożniki impedancyjne dla maszyn indukcyjnych (tab. 1). Impedancja sieci zasilającej wyznaczana jest dla wartości $c = 1$.

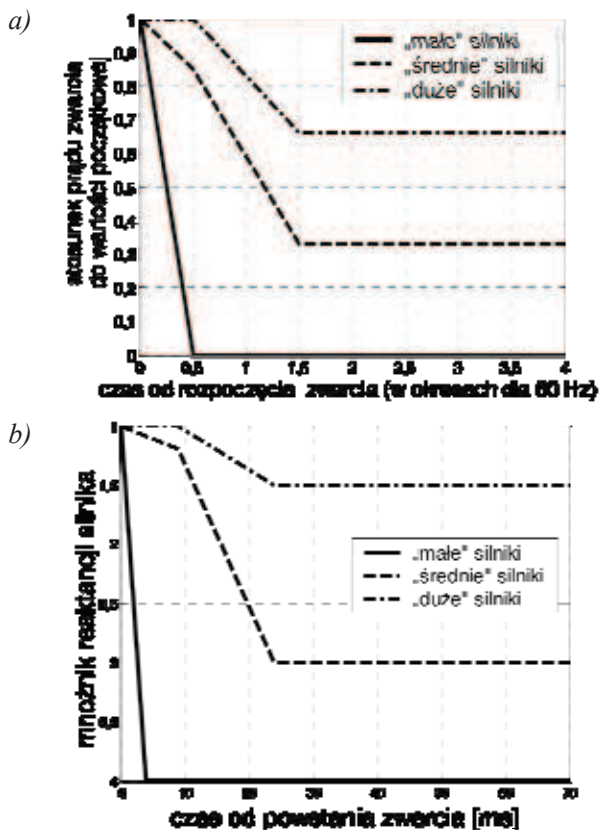
Tabela 1.

Wartości mnożników impedancji do obliczania prądu pierwszego okresu oraz prądu przerwania zgodnie z normami [4, 5, 6]

Kryterium	Mnożniki do obliczania prądu pierwszego okresu	Mnożniki do obliczania prądu przerwania
Maszyny indukcyjne		
> 735,5 kW i ≤ 1500 obr/min	1,0	1,5
> 183,9 kW i 3000 obr/min	1,0	1,5
≥ 36,8 kW	1,2	3
< 36,8 kW	∞	∞

W normie [4, 5] odpowiednikiem prądu zwarciovego wyłączeniowego symetrycznego I_b jest tzw. prąd przerwania (*interrupting current*) I_{sc} wyznaczany analogicznie jak prąd pierwszego okresu, ale z innymi wartościami mnożników impedancji (tab. 1).

Według normy IEEE/ANSI wyznaczenie wartości charakterystycznych prądów zwarciowych wymaga przeliczenia wartości reaktancji maszyn wirujących w celu odwzorowania zjawiska stopniowego zanikania sił elektromotorycznych w maszynach indukcyjnych (rys. 1) przez zastosowanie odpowiednich mnożników impedancji. Wartości tych mnożników dla maszyn występujących w kopalnianej sieci nn przedstawiono w tabeli 1. (wartości mocy zostały przedstawione w systemie SI, a wartości prędkości odniesione do częstotliwości 50 Hz).



Rys. 1. Uproszczony przebieg zaniku prądu generowanego przez silniki indukcyjne według [4, 5] (a) oraz odpowiadające mu mnożniki impedancji silników (b)

3. ZASADY OBLICZANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH MAKSYMALNYCH NIEZBĘDNYCH DO DOBORU APARATURY ŁĄCZENIOWEJ

3.1. Obliczanie prądu zwarciovego początkowego według IEC i prądu pierwszego okresu według IEEE/ANSI

Prąd zwarciovym początkowy I_k'' jest określany jako wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego w chwili $t = 0$. Przy zastępczym źródle napięcia $E = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3}}$ wartość tego prądu wyznaczana jest z równania:

$$I_k'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_k)^2 + (X_k)^2}} \quad (13)$$

gdzie:

c_{\max} – współczynnik napięciowy,

U_n – napięcie nominalne sieci, w której przyjęto obliczeniowe miejsce zwarcia [kV],

R_k – rezystancja zastępcza obwodu zwartego [Ω],

X_k – reaktancja zastępcza obwodu zwartego [Ω].

Wartość współczynnika napięciowego c_{\max} występującego we wzorze (13) zgodnie z wymaganiami normy [7] zaleca się przyjmować równą 1,1 dla sieci

niskonapięciowych o napięciach znamionowych spoza zakresu 380-400 V.

W przypadku prowadzonych obliczeń zwarciovych w sieci otwartej zasilanej z kilku źródeł prąd zwarciovym początkowy w miejscu zwarcia należy wyznaczyć jako sumę geometryczną udziałowych prądów zwarciovych:

$$\underline{I}_k'' = \sum_i \underline{I}_{ki}'' \quad (14)$$

Obliczenia należy prowadzić – stosując przekształcanie schematu sieci, zawierającej impedancje zastępcze – dla składowej zgodnej w poszczególnych elementach tej sieci.

W normie IEEE/ANSI prądem zwarciovym odpowiadającym prądowi początkowemu I_k'' jest prąd pierwszego okresu (*first cycle duty*) oznaczany jako I_{sym} . Prąd ten definiowany jest jako maksymalna wartość obliczeniowego prądu zwarciovego symetrycznego w pierwszym okresie po zaistnieniu zwarcia i oblicza się go ze wzoru:

$$I_{sym} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (15)$$

gdzie:

E – znamionowa wartość napięcia fazowego

$$E = U_n / \sqrt{3} \text{ [kV]},$$

X – wartość zastępczej reaktancji obwodu zwarciovego w chwili zwarcia [Ω],

R – wartość zastępczej rezystancji obwodu zwarciovego w chwili zwarcia [Ω].

Należy tu jednak zwrócić uwagę na fakt, że według normy [5] możliwe jest osobne wyznaczenie zastępczej reaktancji sieci X przy pominięciu wszystkich rezystancji zastępczych poszczególnych elementów sieci oraz wyznaczenie zastępczej rezystancji sieci R przy pominięciu wszystkich reaktancji.

3.2. Wyznaczanie prądu zwarciovego udarowego według IEC i prądu szczytowego według IEEE/ANSI

Według normy [7] prąd zwarciovym udarowy i_p , stanowiący największą wartość chwilową prądu zwarciovego, oblicza się z równania:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k'' \quad (16)$$

Występujący we wzorze (16) współczynnik udaru κ wyznaczany może być ze wzoru lub odczytywany z wykresów zależności $\kappa = f(R/X)$ względnie $\kappa = f(X/R)$, które zawarto w normie [7]. Podany w niej wzór na wartość współczynnika κ ma postać:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3R}{X}} \quad (17)$$

W przypadku obliczania prądu zwarcowego początkowego oraz wyłączeniowego symetrycznego można ograniczyć sieć do jednej impedancji zwarcowej widzianej z miejsca zwarcia. W przypadku prądu zwarcowego udarowego i_p konieczne jest rozróżnienie przypadków sieci zasilanych z pojedynczego lub z kilku źródeł. W sieci zasilanej przez niezależne źródła prąd zwarcowy udarowy jest sumą poszczególnych prądów zwarcowych udziałowych:

$$i_p = \sum_i i_{pi} \quad (18)$$

W odniesieniu do sieci zamkniętych w normie [7] podaje się trzy uproszczone metody wyznaczania współczynnika udaru κ .

Podany w normie IEEE/ANSI prąd szczytowy I_{peak} jest odpowiednikiem prądu zwarcowego udarowego i_p . Wyznaczany on jest ze wzoru:

$$I_{peak} = \sqrt{2} \cdot I_{sym} \cdot \left(1 + e^{-\frac{2\pi\tau}{(X/R)}} \right) \quad (19)$$

gdzie:

τ – względny czas od chwili zwarcia do osiągnięcia maksymalnej wartości prądu (względem okresu napięcia sieci).

Wartość czasu τ , niezbędna we wzorze (19), wyznaczana jest z zależności:

$$\tau = 0,49 - 0,1e^{-\frac{(X/R)}{3}} \quad (20)$$

Wyznaczanie wartości prądu szczytowego przebiega dwustopniowo. W pierwszej kolejności należy wyznaczyć wartość czasu τ (zawsze będzie to nieco mniej niż 1/2 okresu), a następnie wyznaczyć wartość prądu I_{peak} . Należy pamiętać, że wzory te zostały podane dla częstotliwości sieciowej 60 Hz. Można tu jednak zauważyć, że występujący w równaniu opisującym proces zanikania składowej nieokresowej czynnik $e^{-\frac{R}{L}}$ nie zależy od częstotliwości, natomiast wyznaczany stosunek X/R musi uwzględnić częstotliwość 50 Hz.

Dla wyznaczenia stosunku X/R norma [5] zaleca osobne wyznaczenie zastępczej reaktancji sieci (przy pominięciu wszystkich rezystancji zastępczych poszczególnych elementów sieci) oraz wyznaczenie zastępczej rezystancji sieci przy pominięciu wszystkich reaktancji.

3.3. Obliczanie prądu zwarcowego wyłączeniowego symetrycznego według IEC i prądu przerwania według IEEE/ANSI

Prąd zwarcowy wyłączeniowy symetryczny to wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarcowego w chwili rozdzielania się styków łącznika

[2]. W przypadku zwarcia w pobliżu silnika (generatora) prąd zwarcowy wyłączeniowy symetryczny ma wartość mniejszą niż prąd zwarcowy początkowy. Prąd zwarcowy wyłączeniowy symetryczny pochodzący od silnika indukcyjnego obliczany jest według zależności:

$$I_{bM} = \mu_M \cdot q \cdot I_{kM}'' \quad (21)$$

Współczynnik μ_M zależy od stosunku prądu zwarcowego początkowego pochodzącego od silnika indukcyjnego odniesionego do prądu znamionowego tego silnika I_{kM}''/I_{rM} oraz minimalnego czasu własnego łącznika (t_{min}). Wartości współczynnika μ_M odczytuje się z wykresu podanego w normie [7]. W normie tej dla wybranych czasów własnych minimalnych podano również wzory do obliczania współczynnika μ_M . W przypadku, gdy czas własny minimalny różni się od podanych na wykresie, dopuszcza się stosowanie interpolacji liniowej między krzywymi wykresu w celu określenia prawidłowej wartości współczynnika μ_M . Wartość współczynnika q zależy od mocy silnika (P_{rM}) na parę biegunów (p) wyrażonej w MW oraz od czasu własnego minimalnego. Wartość współczynnika q może zostać odczytana z wykresu względnie obliczona z wykorzystaniem równań podanych w normie [7].

Zwarcie w sieci kopalnianej SN uznaje się za odległe od generatora, jeśli spełniony jest warunek [2]:

$$X_{TK} \geq 2X'_Q \quad (22)$$

gdzie:

X_{TK} – skorygowana reaktancja zastępcza transformatora [Ω],

X'_Q – reaktancja zastępcza sieci zasilającej, z której zasilany jest transformator [Ω].

Obie reaktancje z warunku (22) powinny być przełiczone na napięcie sieci, w której przyjęto obliczeniowe miejsce zwarcia. Zwarcia w sieciach nn traktuje się zwykle jako odległe od generatora [2]. W przypadku, gdy zwarcie jest odległe od generatora, prąd wyłączeniowy symetryczny przyjmuje się równy prądowi zwarcowemu początkowemu. W sieci otwartej zasilanej z kilku źródeł prąd wyłączeniowy symetryczny w miejscu zwarcia można obliczyć jako sumę prądów udziałowych:

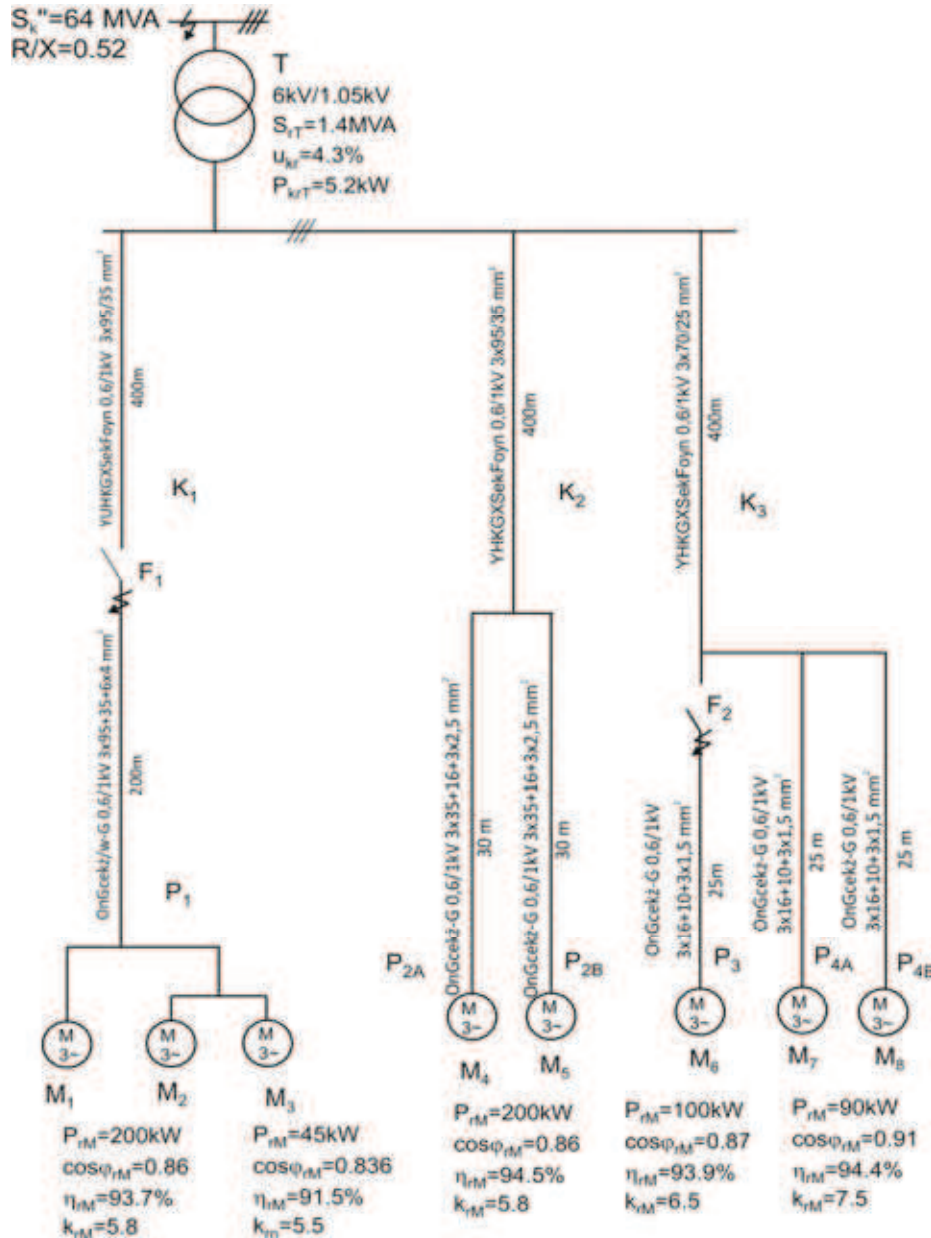
$$I_b = \sum_i I_{bi} \quad (23)$$

Według norm ANSI/IEEE w przypadku generatora synchronicznego zwarcie można traktować jako odległe od generatora, jeśli spełniony jest którykolwiek z dwóch warunków:

- 1) reaktancja między generatorem a miejscem zwarcia jest większa od półorakrotnej wartości reaktancji podprzebieżowej generatora,
- 2) między generatorem a miejscem zwarcia znajduje się więcej niż jeden transformator.

4. PRZYKŁAD OBLICZEŃ ZWARCIOWYCH

Obliczenia przeprowadzono dla przykładowej sieci kopalnianej nn, przedstawionej na rys. 2.

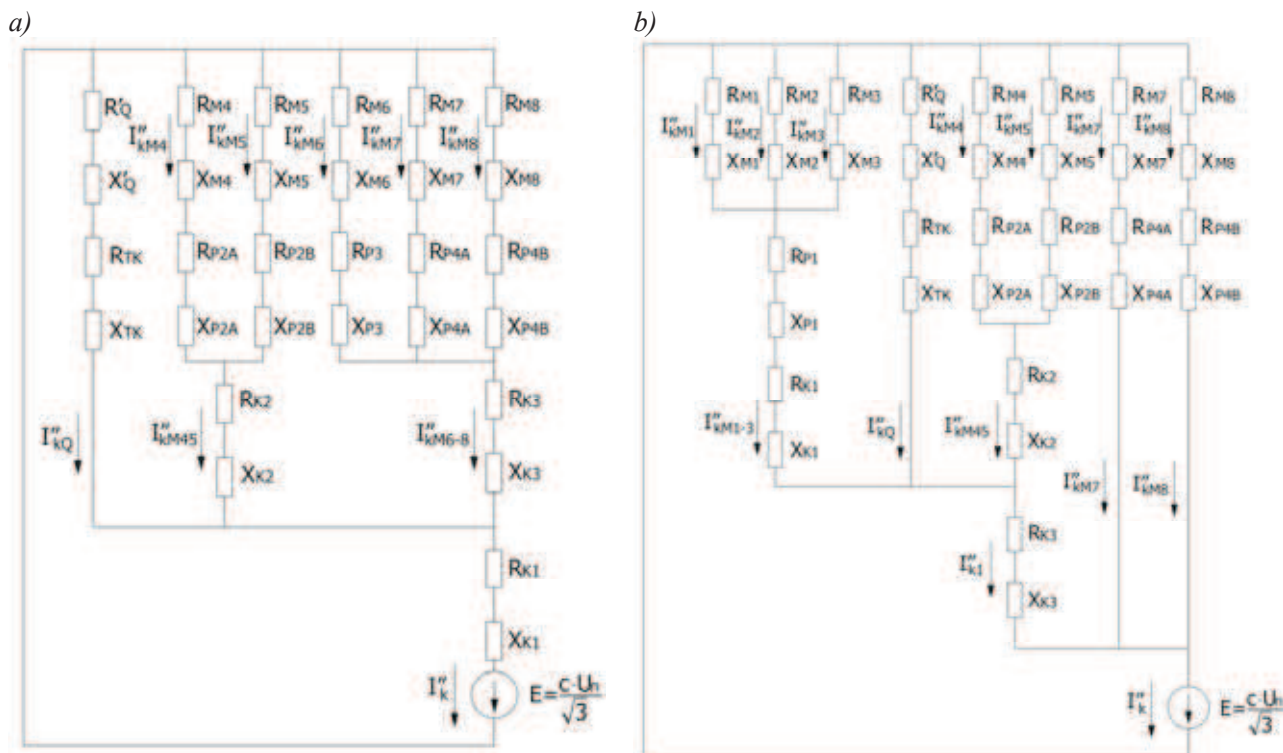


Rys. 2. Schemat sieci kopalnianej wykorzystany w przykładzie obliczeniowym (opracowanie własne)

Schematy zastępcze do obliczeń maksymalnych prądów zwarciovych według normy IEC w miejscach zwarcia F_1 oraz F_2 przedstawia rysunek 3. Schematy zastępcze do obliczeń prądów zwarciovych według IEEE/ANSI są analogiczne, przy czym nie uwzględnia się korekty impedancji transformatora. Zgodnie z zasadami podanymi w p. 3.1 odrębnie buduje się schematy dla obliczenia reaktancji i rezystancji zastępczej widzianych z miejsca zwarcia,

uwzględniając odpowiednie współczynniki dla obliczania prądu pierwszego okresu oraz prądu przerwania [4, 5, 6]. Parametry linii kablowych i przewodów oponowych wyznaczono w oparciu o dane zawarte w [1]. Liczba par biegunów silników indukcyjnych z przykładu obliczeniowego (rys. 2) wynosi 2.

Obliczone wartości impedancji poszczególnych elementów sieci obwodu zwarciovego zostały stabilizowane (tab. 2).



Rys. 3. Schematy zastępcze obwodów zwartych (dla składowej zgodnej) do obliczania prądów zwarciovych według normy IEC, odpowiadające zwarciom w punktach a) F_1 , b) F_2 sieci z rysunku 2. (opracowanie własne)

Tabela 2.

Wartości impedancji poszczególnych elementów układu z rys. 2. wyznaczonych według norm IEC oraz IEEE/ANSI (opracowanie własne)

Element sieci	IEC		IEEE/ANSI			
	R [Ω]	X [Ω]	do obliczania „prądu pierwszego okresu”		do obliczania „prądu przerwania”	
			R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
Sieć zasilająca Q	0,0087	0,0168	0,0079	0,0153	0,0079	0,0153
Transformator T	0,0030	0,0344	0,0029	0,0337	0,0029	0,0337
Silniki M1, M2	0,2690	0,6405	0,1363	0,6815	0,2044	1,0222
Silnik M3	1,1968	2,8495	0,7274	3,6371	1,818	9,0929
Silniki M4, M5	0,2713	0,6459	0,1374	0,6873	0,2062	1,0310
Silnik M6	0,4867	1,1588	0,2958	1,4791	0,7395	3,6977
Silniki M7, M8	0,4928	1,1734	0,2995	1,4979	0,7489	3,7448
Kable K1, K2	0,0772	0,0332	0,0772	0,0332	0,0772	0,0332
Kabel K3	0,1072	0,0332	0,1072	0,0332	0,1072	0,0332
Przewód opon. P1	0,0420	0,0152	0,0420	0,0152	0,0420	0,0152
Przewód opon. P2A, P2B	0,0169	0,0024	0,0169	0,0024	0,0169	0,0024
Przewód opon. P3, P4A, P4B	0,0310	0,0021	0,0310	0,0021	0,0310	0,0021

Tabela 3.

Wyniki obliczeń prądów zwarciovych maksymalnych dla przykładu z rys. 2.
(opracowanie własne)

Źródło	wg norm ANSI/IEEE						wg normy IEC						
	miejsce zwarcia						miejsce zwarcia						
	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	
	I_{sym}		I_{peak}		I_{sc}		I''_{ki}		i_{pi}		I_{bi}		
[kA]						[kA]							
M1	-	-	-	-	-	-	-	0,21	-	7,56	-	0,11	
M2	-	-	-	-	-	-	-	0,21	-		-	0,11	
M3	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-		-	0,02	
Q	-	-	-	-	-	-	4,48	3,65	9,28		4,48	3,65	
M4	-	-	-	-	-	-	0,28	0,23			0,14	0,12	
M5	-	-	-	-	-	-	0,28	0,23			0,14	0,12	
M7	-	-	-	-	-	-	0,15	0,49			0,89	0,06	0,16
M8	-	-	-	-	-	-	0,15	0,49			0,89	0,06	0,16
M6	-	-	-	-	-	-	0,15	-			-	0,06	-
	I_{sym}		I_{peak}		I_{sc}		I''_k			i_p		I_b	
	5,08	6,09	7,51	9,17	4,97	5,01	5,45	5,36		9,28	9,34	4,94	4,45
1,1×Σ													

Wartości charakterystycznych prądów zwarciovych w przypadku zwarcia w punktach F_1 i F_2 , obliczonych według zasad normy IEC i IEEE/ANSI, zamieszczono w tabeli 3.

W przypadku obliczeniowego miejsca zwarcia w punkcie F_1 wszystkie źródła udziałowych prądów zwarciovych wraz z przyłączonymi do nich przewodami włączone są do miejsca zwarcia przez impedancję kabla K_1 , co oznacza, że sumaryczny prąd zwarciovowy płynie żyłami kabla K_1 . Natomiast dla miejsca zwarcia w punkcie F_2 sumaryczny prąd zwarciovowy jest superpozycją udziałowych prądów zwarciovych silnika M_7 , M_8 oraz prądu zwarciovowego płynącego żyłami kabla K_3 będącego sumą pozostałych prądów zwarciovych. Ma to istotne znaczenie w kontekście obliczania prądu udarowego zgodnie z normą [7].

5. PODSUMOWANIE

Obliczenia maksymalnych prądów zwarciovych prowadzone według norm [5] i [7] prowadzą do zbliżonych wyników, choć w przypadku normy [5] uzyskiwane jest to przy znacznie mniejszym nakładzie obliczeniowym. Większość zaobserwowanych różnic związana jest z występowaniem w normie [7] współczynnika napięciowego.

Największe różnice wyników zaobserwowano w przypadku występowania silników indukcyjnych

dużej mocy przyłączonych bezpośrednio (lub przez względnie krótkie odcinki linii kablowych) do miejsca zwarcia. Wiąże się to z zupełnie odmiennym sposobem modelowania zjawisk dynamicznych w maszynach wirujących stosowanych w obydwu normach oraz innymi wartościami stosunku R/X przyjmowanymi przy wyznaczaniu impedancji zastępczej maszyn indukcyjnych.

Literatura

- Boron W.: *Linie kablowe w podziemnych zakładach górniczych*. Rozprawy i monografie 3, Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG, Katowice 2006.
- Gawor P.: *Sieci elektroenergetyczne zakładów górniczych*, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2011.
- Kacejko P., Machowski J.: *Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych. Podstawy obliczeń*, WNT, Warszawa 1993.
- IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book) ANSI/IEEE Std 141-1993.
- IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems (Violet Book) ANSI/IEEE Std 551-2006.
- IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (Brown Book) ANSI/IEEE Std 399-1997.
- PN-EN 60909-0:2002. *Prądy zwarciovowe w sieciach trójfazowych prądu przemiennego – Część 0: Obliczanie prądów* (oryg.).
- PN-G-42042:1998. *Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej – Zabezpieczenia zwarciovowe i przeciążeniowe – Wymagania i zasady doboru*.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.