

6 ZASADY OBLICZANIA CHARAKTERYSTYCZNYCH PARAMETRÓW ZWARCIOWYCH

6.1. Zasady obliczania charakterystycznych parametrów zwarciovych według normy PN-74/E-05002

6.1.1. Postanowienia ogólne

Do charakterystycznych parametrów zwarciovych zalicza się:

- a) parametry prądu zwarciovego:
 - wartość początkowa prądu zwarciovego okresowego (prąd początkowy I_p),
 - prąd zwarciovymy udarowy i_u ,
 - prąd wyłączeniowy symetryczny I_{WS} i niesymetryczny I_{WNS} ,
 - czas trwania zwarcia t_z ,
 - prąd zastępczy t_z – sekundowy I_{tz} ,
- b) parametry napięcia powrotnego:
 - stromość napięcia powrotnego k ,
 - współczynnik biegunowy k_b ,

Obliczenia parametrów zwarciovych należy wykonywać zakładając najniekorzystniejsze ze względu na dobierane urządzenie warunki zwarciovie tzn. założenia upraszczając, konfigurację i stan obciążenia systemu elektroenergetycznego, miejsce i rodzaj zwarcia.

6.1.2. Założenia upraszczające

W schematach elementów systemu elektroenergetycznego dopuszcza się pominięcie:

- a) pojemności i upływności w schematach linii,
- b) impedancji magnesowania w schematach transformatorów,
- c) rezystancji w schematach wszystkich elementów przy obliczaniu prądu początkowego, jeżeli pominięcie rezystancji nie powoduje nadmiernego wzrostu prądu, a w wyniku doboru aparatu o większych wartościach znamionowych.

W obliczeniach zwarciovych pomijamy rezystancje gałęzi, gdy dla tej gałęzi mamy $\frac{R}{X} < 0.3$, co daje błąd wynoszący:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = X \sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1} = X \sqrt{0.3^2 + 1} = 1.04 X$$

Z powyższego rachunku wynika, że błąd ten jest mniejszy od 5%. Gdy wykonujemy obliczenia zwarciovie orientacyjne pomijamy rezystancje, gdy $\frac{R}{X} < 0.5$.

W obliczeniach prądów zwarciovych stosuje się zasadę Thevenina tzn. cały system elektroenergetyczny z punktu widzenia miejsca zwarcia traktuje się jako dwójnik aktywny a więc można go zastąpić napięciowym źródłem energii. SEM tego źródła równa się napięciu w miejscu zwarcia przed zwarcim. Oporność wewnętrzna tego źródła równa jest oporności tego dwójnika przy zwarcim wszystkich SEM. Całe przybliżenie, jakie tu się dokonuje polega na tym, że zasadę Thevenina można stosować tylko do obwodów liniowych, gdy rzeczywisty system elektroenergetyczny jest w przybliżeniu liniowy. W obliczeniach zwarciovych zakłada się, że elementy układu elektroenergetycznego są elementami symetrycznymi.

Części systemu, przez które nie przepływa prąd zwarciový pomija się w obliczeniach a silników asynchronicznych i innych odbiorników nie odwzorowuje się w schematach zwarciových. Wpływ silników asynchronicznych uwzględnia się odrębnymi obliczeniami.

Impedancje elementów w schematach zwarciových powinny być obliczone na poziomie napięcia znamionowego sieci, w której wystąpiło zwarcie. Współczynnik sprowadzenia oblicza się przyjmując za podstawę napięcia znamionowe obu sieci (tzw. metoda przybliżona) lub przy obliczeniach dokładniejszych – przekładnie transformatora.

Do wyznaczenia schematów systemu należy przyjmować parametry podane przez wytwórcę. W razie ich braku, zaleca się wyznaczać je metodami pomiarowymi lub obliczeniowymi zapewniającymi dokładność, co najmniej 5%.

6.1.3. Wybór konfiguracji systemu elektroenergetycznego

Należy brać pod uwagę taką konfigurację systemu, która prowadzi do największych prądów zwarciových. Nie należy jednak uwzględniać stanów prowadzących do zwiększenia prądów, lecz trwających krótko np. występujących podczas przełączeń eksploatacyjnych.

Za źródła prądu zwarciového należy uważać generatory i kompensatory synchroniczne. Silniki asynchroniczne o napięciu znamionowym większym niż 1 kV, przyłączone bezpośrednio do sieci, w której oblicza się zwarcie należy uważać za źródła prądu zwarciového. Silniki asynchroniczne przyłączone do tej sieci przez transformator należy uważać za źródła prądu zwarciového, jeżeli suma ich mocy znamionowej P_N spełnia nierówność:

$$P_{rM} > \frac{S_{rT}}{120 \frac{S_{rT}}{S_k} - 0.4} \quad (6.1)$$

gdzie:

- S_{rT} - suma mocy znamionowej transformatorów zasilających te silniki,
- S_k - moc zwarciova obliczona bez udziału silników.

Silniki asynchroniczne o napięciu znamionowym do 1kV należy uważać za źródła prądu zwarciového, jeżeli spełniają powyższe warunki w obliczeniach prądu zwarciového udarowego. Silników o napięciu znamionowym do 1kV można nie uwzględniać, jeżeli z siecią, w której wyznacza się prądy zwarciove łączy je więcej niż jeden stopień transformacji.

6.1.4. Wybór miejsca i rodzaju zwarcia

Miejsce zwarcia powinno być tak dobrane, aby w urządzeniu występowały największe możliwe wartości prądów zwarciových, przy czym należy uwzględnić zastrzeżenie dotyczące stanów krótkotrwałych podane w § 6.3. W przypadku zainstalowania dławików zwarciových w polach liniowych rozdzielni, należy przy wyborze urządzeń umieszczonych między dławikiem, a szynami zbiorczymi brać pod uwagę zwarcie za dławikiem.

W sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym należy przyjmować do obliczeń:

- a) działanie cieplne prądu zwarciového – zwarcie trójfazowe lub dwufazowe,
- b) działanie elektrodynamiczne – zwarcie trójfazowe,
- c) zdolność łączeniowa – zwarcie trójfazowe.

W sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym należy przyjmować do obliczeń:

- a) działanie cieplne – zwarcie trójfazowe, dwufazowe, doziemne lub jednofazowe,
- b) działanie elektrodynamiczne – zwarcie trójfazowe lub jednofazowe,
- c) zdolność łączeniowa - zwarcie trójfazowe lub jednofazowe.

6.1.5. Składowa zgodna prądu początkowego w miejscu zwarcia $I_{(1)}$

Składową zgodną prądu początkowego w miejscu zwarcia $I_{(1)}$ można ją obliczyć ze wzoru:

$$I_{(1)} = \frac{k U_n}{\sqrt{3} |Z_{(1)} + \Delta Z|} \quad (6.2)$$

gdzie:

- $Z_{(1)}$ - impedancja obwodu zwarcia dla składowej zgodnej,
- U_n - napięcie znamionowe sieci, w której wystąpiło zwanie,
- k - współczynnik zależny od stanu obciążenia systemu, równy stosunkowi napięcia w miejscu zwarcia przed powstaniem zwarcia do napięcia U_N . W przypadkach typowych zakłada się $k=1,1$: W przypadkach nietypowych, np. zwarcia w pobliżu maszyn synchronicznych z biegunami wydatnymi bez obwodów tłumiących, współczynnik ten może wzrosnąć do 1,2.
- ΔZ - dodatkowa impedancja zależna od rodzaju zwarcia, wynosząca odpowiednio:
 - 0 w przypadku zwarcia trójfazowego,
 - $Z_{(2)}$ w przypadku zwarcia dwufazowego,
 - $Z_{(2)} + Z_{(0)}$ w przypadku zwarcia jednofazowego,
 - $\frac{Z_{(2)} Z_{(0)}}{Z_{(2)} + Z_{(0)}}$ w przypadku zwarcia dwufazowego doziemnego.

6.1.6. Prąd początkowy I_P w miejscu zwarcia

Prąd początkowy I_P w miejscu zwarcia obliczamy ze wzoru:

$$I_P = m I_{(1)} \quad (6.3)$$

gdzie:

- m – współczynnik zależny od rodzaju zwarcia i wynosi:
 - 1 - w przypadku zwarcia trójfazowego,
 - $\sqrt{3}$ - w przypadku zwarcia dwufazowego,
 - 3 - w przypadku zwarcia jednofazowego,
 - $\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{(2)} X_{(0)}}{(X_{(2)} + X_{(0)})^2}}$ -w przypadku zwarcia dwufazowego doziemnego.

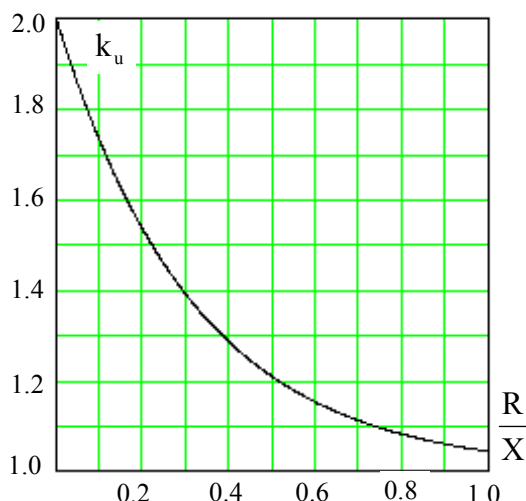
6.1.7. Prąd zwarciovyy udarowy i_u w miejscu zwarcia

Prąd zwarciovyy udarowy to największa z możliwych chwilowa wartość prądu zwarciovyy. Obliczając prąd zwarciovyy udarowy należy, więc przyjąć takie warunki początkowe zwarcia, aby uzyskać największą z możliwych wartość chwilową prądu zwarciovyy. Otrzymano to zakładając, że zwanie występuje podczas stanu jałowego dla zerowego kąta początkowego zwarcia dodatkowo przyjmując, że składowa okresowa prądu zwarciovyy nie zanika. Przy takich warunkach początkowych prąd zwarciovyy udarowy wystąpi po 10 ms – połowie okresu. Prąd zwarciovyy udarowy i_u w miejscu zwarcia obliczamy ze wzoru:

$$i_u = \sqrt{2} k_u m I_{(1)} \quad (6.4)$$

gdzie:

- k_u - współczynnik zależny od stosunku $\frac{R}{X}$ obwodu zwarciovego.



Rys. 6.1 Zależność współczynnika k_u od stosunku R/X

Współczynnik k_u uwzględnia zanikanie składowej nieokresowej od chwili powstania zwarcia do chwili wystąpienia prądu udarowego i wyznacza się go z wykresu na rys. 6.1.

Stosunek $\frac{R}{X}$ wyznacza się następująco:

- a) dla zwarcia trójfazowego

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{(1)}}{X_{(1)}} \quad (6.5)$$

- b) dla zwarcia jednofazowego

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}} \quad (6.6)$$

W przypadku, gdy dokładne wyznaczenie rezystancji jest uciążliwe, np. gdy rozpatruje się złożoną sieć zamkniętą lub gdy nie rozporządza się danymi dotyczącymi rezystancji poszczególnych części systemu, można przyjąć bez obliczeń $k_u=1,8$, a w przypadku zwarców występujących bezpośrednio za dławikami zwarciovymi $k_u=2$.

Dopuszcza się wyznaczanie rezystancji R ze wzoru:

$$R = \frac{1}{I_P} \sum_{i=1}^k I_{Pi}^2 R_i \quad (6.7)$$

gdzie:

- R_i – rezystancja i-tej gałęzi sieci,
- I_{pi} – prąd początkowy w i-tej gałęzi,

W sumowaniu uwzględnia się tylko te gałęzie sieci, przez które przepływa znaczna część prądu zwarciovego.

6.1.8. Moc zwarciova

Moc zwarciova obliczamy ze wzoru:

$$S_k = \sqrt{3} U_N I_p \quad (6.8)$$

Z wzoru wynika, że moc zwarciova nie jest wielkością fizyczną albowiem jest iloczynem napięcia występującego przed zwarcie i prądu zwarcia. Moc zwarciova jest powszechnie używaną wielkością charakteryzującą miejsca zwarcia.

6.1.9. Prąd wyłączeniowy symetryczny I_{ws}

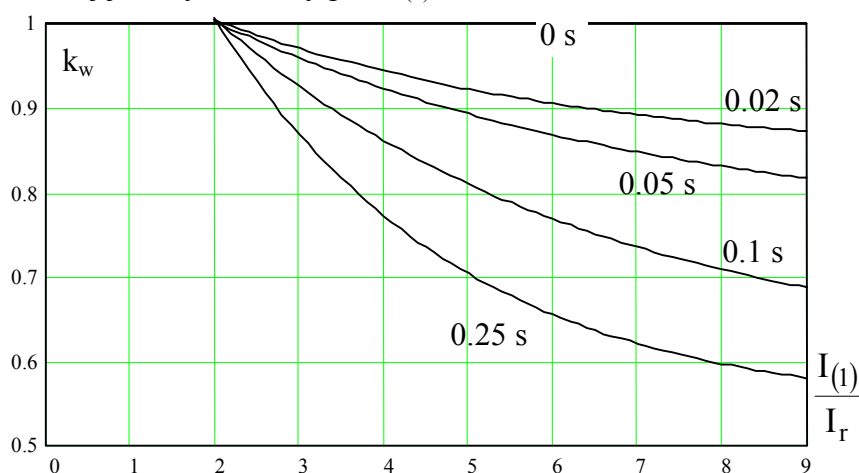
Prąd wyłączeniowy symetryczny to wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego po czasie t_r (czas od chwili wystąpienia zwarcia do chwili utraty styczności styków wyłącznika lub czas przedłukowy bezpiecznika topikowego). Prąd wyłączeniowy symetryczny obliczamy ze wzoru:

$$I_{ws} = m k_w I_{(1)} \quad (6.9)$$

gdzie:

- k_w – współczynnik uwzględniający zanikanie składowej okresowej prądu zwarciovego do chwili rozdzielenia się styków łącznika.

Współczynnik k_w zależy od czasu t_r oraz od stosunku $\frac{I_{(1)}}{I_r}$, czyli miary odległości zwarcia od generatora, przy czym I_r jest sumą prądów znamionowych wszystkich źródeł sprowadzonych do napięcia sieci, w której jest wyznaczony prąd $I_{(1)}$.



Rys. 6.2 Zależność współczynnika k_w od stosunku $\frac{I_{(1)}}{I_r}$ i czasu t_r

Obliczając współczynnik k_w w przedziale 0-0,25s należy stosować interpolację liniową zaś dla $t_r > 0,25s$. przyjmuje się wartości k_w jak przy $t_r = 0,25$ s. Krzywe te stosuje się w przypadku generatorów ze wzbudzeniami maszynowymi lub prostownikowymi jednak w tym ostatnim przypadku tylko wówczas, gdy pułap wzbudzenia nie przekracza 1,6 wartości napięcia wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym. W przypadku wzbudzenia kompaudancyjnego oraz wzbudzenia prostownikowych o wyższym niż 1,6 pułapie wzbudzenia należy przyjmować $k_w = 1$, jeżeli nie dysponuje się dokładniejszymi danymi. Używa się również pojęcia moc wyłączeniowa symetryczna zdefiniowanej jako:

$$S_{ws} = \sqrt{3} U_n I_{ws} \quad (6.10)$$

6.1.10. Prąd wyłączeniowy niesymetryczny I_{wns}

Prąd wyłączeniowy niesymetryczny to wartość skuteczna całkowitego prądu zwarciego po czasie t_r . Prąd wyłączeniowy niesymetryczny należy obliczać tylko w przypadku, gdy $t_r < 0,1s$. Prąd ten obliczamy ze wzoru:

$$I_{wns} = \sqrt{I_{ws}^2 + i_{nok}^2} \quad (6.11)$$

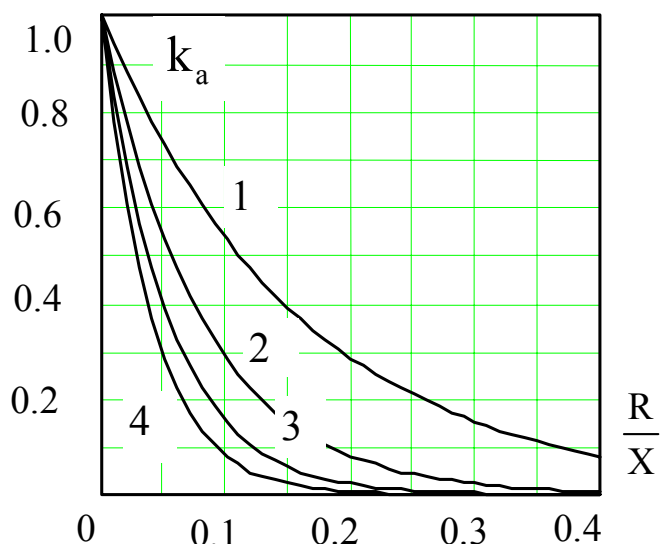
gdzie:

- i_{nok} – wartość składowej nieokresowej prądu zwarciego i liczymy ją ze wzoru:

$$i_{nok} = \sqrt{2} k_a m I_{(1)} \quad (6.12)$$

gdzie:

- k_a – współczynnik uwzględniający zanikanie składowej nieokresowej prądu zwarciego.



Rys. 6.3 Zależność współczynnika k_a od stosunku $\frac{R}{X}$ i czasu t_r . Poszczególne krzywe są dla: 1- $t_r = 0.02$ s; 2- $t_r = 0.04$ s; 3- $t_r = 0.06$ s; 4- $t_r = 0.08$ s.

Współczynnik k_a zależny od stosunku $\frac{R}{X}$ i od czasu t_f odczytujemy z wykresu na rys. 6.3.

W przypadku czasów t_f nie podanych na rysunku należy stosować interpolację liniową. W razie braku danych o stosunku $\frac{R}{X}$ potrzebnych do obliczenia wartości k_a , przyjmuje się $k_a=0,8$ jeżeli zwarcie występuje bezpośrednio za dławikami zwarciovymi, oraz zakłada się $\frac{R}{X}=0,05$ w pozostałych przypadkach.

Prąd wyłączeniowy niesymetryczny jest porównywany z prądem znamionowym wyłączalnym niesymetrycznym wyłącznika I_{Nws} . Często dla wyłączników podaje się:

- prąd znamionowy wyłączalny wyłącznika I_{Nws} ,
- współczynnik niesymetrii β .

Wtedy prąd znamionowy wyłączalny niesymetryczny wyłącznika I_{Nws} wyraża się zależnością:

$$I_{Nws} = \sqrt{(I_{Nws})^2 + (\sqrt{2} I_{Nws} \beta)^2} = I_{Nws} \sqrt{1 + 2\beta^2} \quad (6.13)$$

6.1.11. Prąd zastępczy zwarciov t_z – sekundowy I_{tz}

Prąd zastępczy zwarciov t_z – sekundowy zwany również zastępczym prądem cieplnym, to prąd o stałej amplitudzie wydzielający tę samą ilość ciepła, co prąd zwarciov. Można go obliczać ze wzoru:

$$I_{tz} = m k_c I_{(1)} \quad (6.14)$$

gdzie:

- k_c - współczynnik uwzględniający zmienność prądu zwarciovego w czasie.

Zależność współczynnika k_c od stosunku $\frac{I_{(1)}}{I_N}$ i czasu trwania zwarcia t_z przedstawiono na rys. 6.4.

Dla czasów t_z innych niż podano na wykresie, należy stosować interpolację liniową.

W literaturze znany jest też inny parametr charakteryzujący ciepłe działanie prądu zwarciovego zwany wskaźnikiem cieplnym lub skutkiem cieplnym, który odpowiada ilości ciepła wydzielanego przez prąd zwarciov w czasie zwarcia, w czasie zwarcia na rezystancji 1 Ω. Wskaźnik cieplny wynosi:

$$K_t = I_{tz}^2 t_z = \int_0^{t_z} i_z^2 dt \quad (6.15)$$

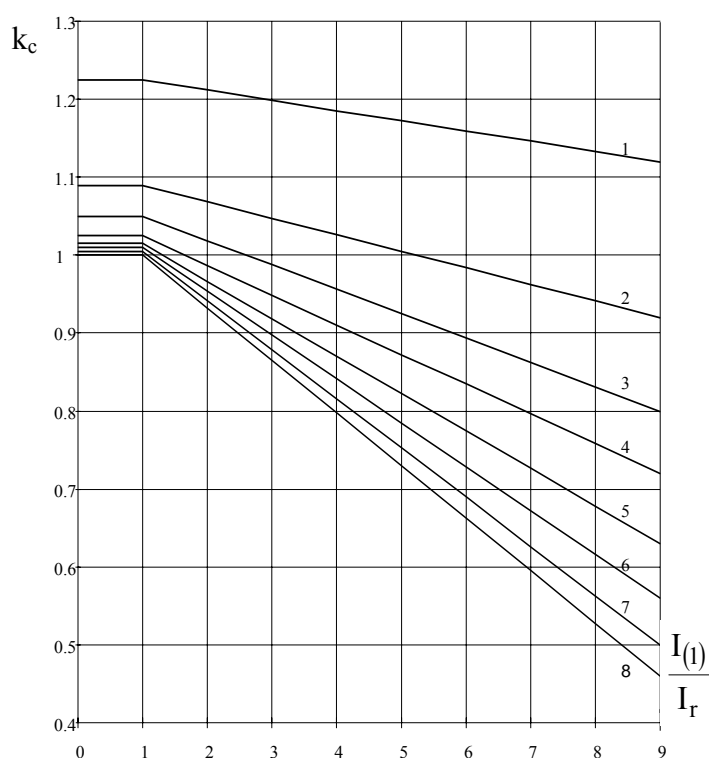
Jeżeli stosuje się samoczynne ponowne załączenie lub, jeżeli kilka wyłączników wyłącza niejednocześnie częściowe prądy zwarciove, to należy uwzględnić zmiany w przebiegu prądu zwarciovego wywołane czynnościami łączeniowymi. Wartość prądu I_{tz} liczymy wtedy:

$$I_{tz} = m \sqrt{\frac{1}{t_z} \sum_{i=1}^k I_{(1)i}^2 k_{ci} t_{zi}} = m \sqrt{\frac{1}{t_z} \sum_{i=1}^k K_{ti}} \quad (6.16)$$

gdzie:

- $I_{(1)i}$ – składowa zgodna prądu zwarciovego na początku i-tego przebiegu zakłóceniovego,
- k_{ci} – współczynnik k_c w i-tym przebiegu zakłóceniovym,
- t_{zi} – czas trwania i-tego przebiegu zakłóceniovego, przy czym:

$$t_z = \sum_{i=1}^k t_{zi} \quad (6.17)$$



Rys. 6.4 Zależność współczynnika k_c od stosunku $\frac{I_{(1)}}{I_r}$ i czasu t_z . Poszczególne krzywe są dla:
1 – 0.1 s; 2 – 0.25 s; 3 – 0.5 s; 4 – 1 s; 5 – 2 s; 6 – 5 s; 7 – 10 s; 8 – ∞ .

6.1.12. Wpływ silników asynchronicznych na charakterystyczne parametry prądu zwarciovego

Poniżej przedstawiono metody obliczania charakterystycznych parametrów prądu zwarciovego, których źródłem jest grupa silników asynchronicznych.

6.1.12.1. Prąd udarowy

Prąd udarowy płynący od silników liczymy ze wzoru:

$$\Delta i_u = \sqrt{2} k_{uM} k_{rM} I_{rM} \quad (6.18)$$

gdzie:

- I_{rM} – suma prądów znamionowych silników,
- k_{rM} – współczynnik samorozruchu silników, który w braku danych przyjmuje się równy 5.5,

- k_{uM} – współczynnik udarowy równy:
1,7 dla zwarcia trójfazowego,
1,5 dla zwarcia dwufazowego.

Udarowy prąd zwarciovy z uwzględnieniem wpływu silników i_{uM} jest równy:

$$i_{uM} = i_u + \Delta i_u \quad (6.19)$$

6.1.12.2. Prąd wyłączeniowy symetryczny

Prąd wyłączeniowy symetryczny płynący od silników liczymy ze wzoru:

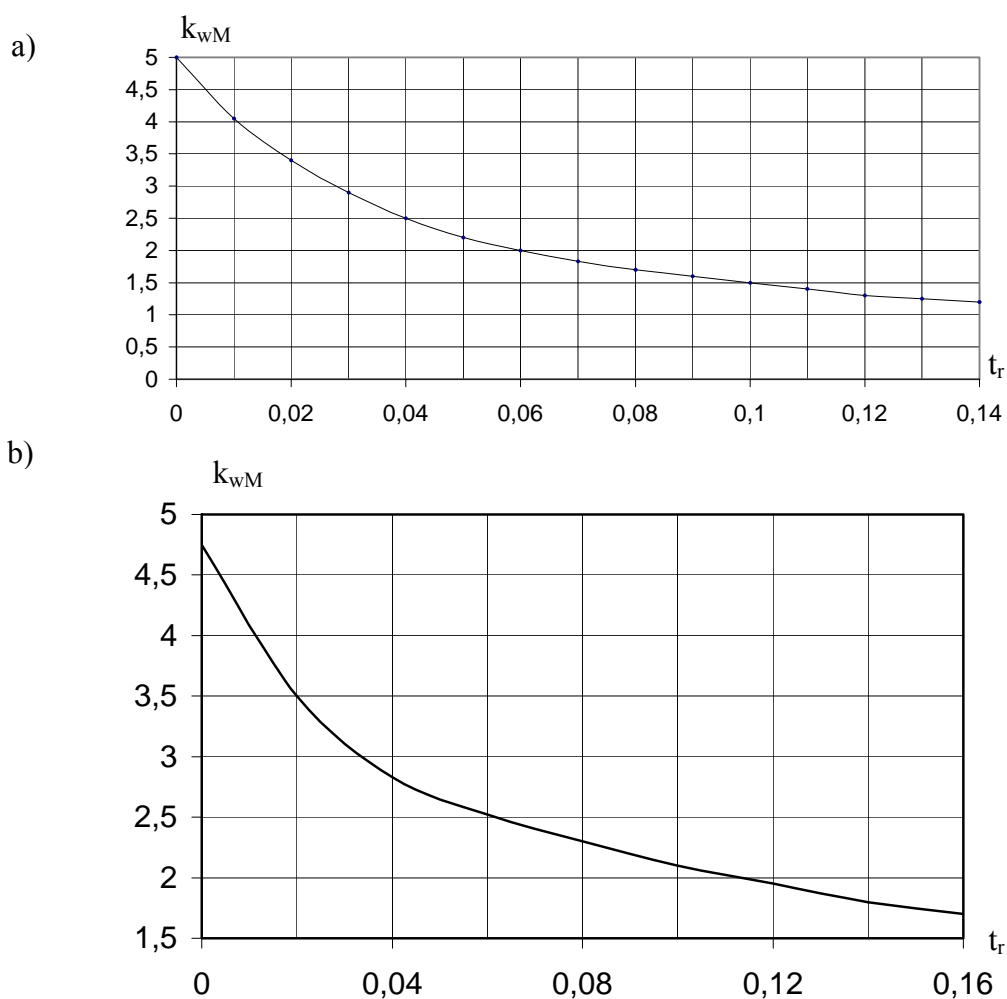
$$\Delta I_{ws} = k_{wM} I_{rM} \quad (6.20)$$

gdzie:

- k_{wM} - współczynnik zależny od czasu t_r wyznaczony z wykresów na rys. 5.5.

Całkowity prąd wyłączeniowy z uwzględnieniem silników I_{wsM}

$$I_{wsM} = I_{ws} + \Delta I_{ws} \quad (6.21)$$



Rys. 6.5 Zależność współczynnika k_{wM} od czasu t_r . przy zwarciu a) trójfazowym; b) dwufazowym.

6.1.12.3. Prąd wyłączeniowy niesymetryczny

Składową nieokresową prądu zwarciego silników liczymy ze wzoru:

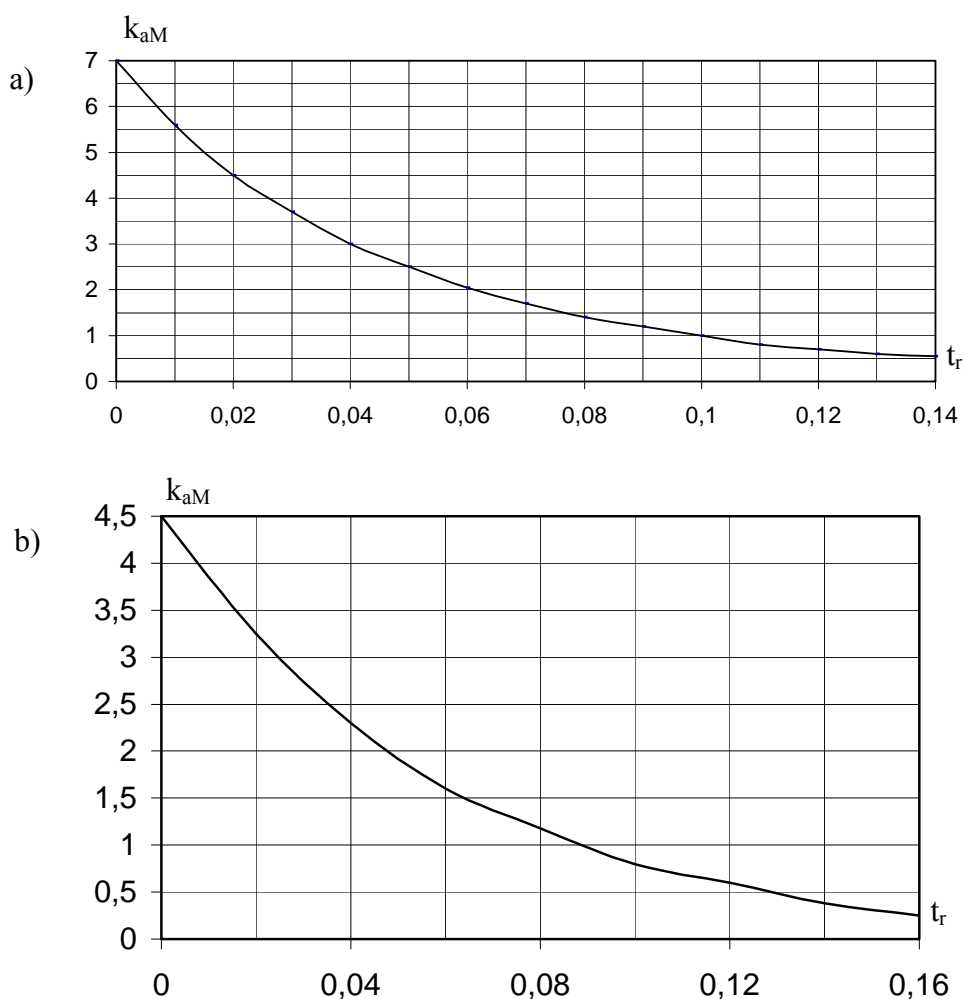
$$\Delta i_{\text{nok}} = k_{\text{aM}} I_{\text{rM}} \quad (6.22)$$

gdzie:

- k_{aM} – współczynnik zależny od czasu t_r , wyznaczamy z wykresów na rys. 6.6.

Niesymetryczny prąd wyłączeniowy z uwzględnieniem wpływu silników

$$I_{\text{wnsM}} = \sqrt{(I_{\text{ws}} + \Delta I_{\text{ws}})^2 + (i_{\text{nok}} + \Delta i_{\text{nok}})^2} \quad (6.23)$$



Rys. 6.6 Zależność współczynnika k_{aM} od czasu t_r . przy zwarcu a) trójfazowym; b) dwufazowym.

6.1.12.4. Zastępczy prąd zwarcioowy t_z – sekundowy

Zastępczy prąd zwarcioowy t_z – sekundowy liczymy ze wzoru:

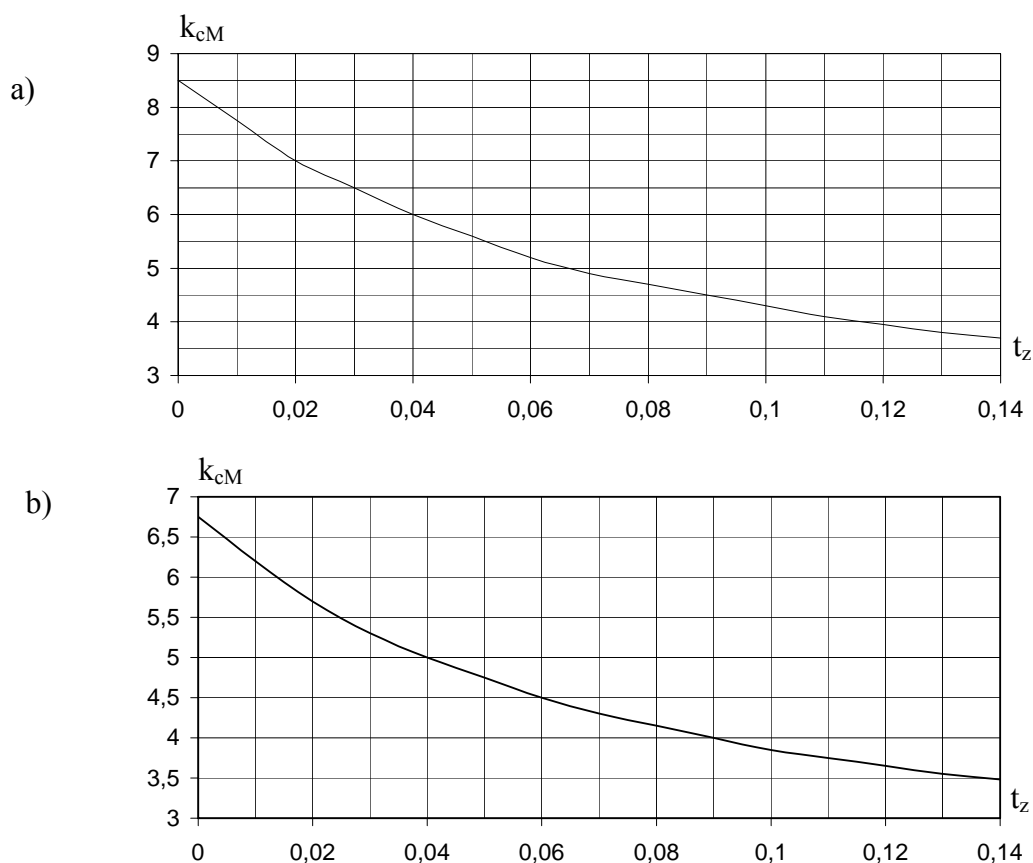
$$\Delta I_{tz} = k_{cM} I_{rM} \quad (6.24)$$

gdzie:

- k_{cM} - współczynnik zależny od czasu trwania zwarcia t_z , wyznaczony z wykresów na rys. 6.7.

Zastępczy prąd zwarciovyy I_{tz} – sekundowy z uwzględnieniem wpływu silników

$$I_{tzM} = I_{tz} + \Delta I_{tz} \quad (6.25)$$



Rys. 6.7 Zależność współczynnika k_{cM} od czasu t_z przy zwarciu a) trójfazowym; b) dwufazowym.

W przypadku zwarcia trójfazowego o czasie trwania zwarcia $t_z > 0,14s$, współczynnik k_{cM} przyjmuje się:

$$k_{cM} = 3.4 \quad \text{dla} \quad t_z = 0.2 \text{ s} \quad (6.26)$$

$$k_{cM} = 3.0 \quad \text{dla} \quad t_z = 0.3 \text{ s} \quad (6.27)$$

$$k_{cM} = \sqrt{\frac{3.0}{t_z}} \quad \text{dla} \quad t_z > 0.3 \text{ s} \quad (6.28)$$

W przypadku wystąpienia zwarcia nie na zaciskach silnika, wielkości zwarciovyy płynące od tego silnika należy pomnożyć przez współczynnik:

$$c_1 = \frac{X_M}{X_M + X_S} \quad (6.29)$$

gdzie:

- X_M - reaktancja rozruchowa silnika,
- X_S - reaktancja odcinka łączącego silnik z miejscem zwarcia.

6.2. Metoda ogólnego i indywidualnego zanikania

Obliczenia prądów zwarciovych metodą ogólnego zanikania polegają na tym, że schemat zastępczy obwodu zwarciovego sprowadza się do jednej impedancji i jednej SEM zgodnie z zasadą Thevenina. Po obliczeniu dla takiego obwodu impedancji zwarciovowej wyznacza się prąd zwarciovowy początkowy I_p . Obliczając charakterystyczne parametry prądu zwarciovego wyznacza się parametry charakteryzujące zanikanie prądów zwarciovych jako średnie dla całego systemu. Prowadzi to niekiedy do wyznaczenia I_{ws} oraz I_{tz} , zbyt dużych. W przypadku, gdy występują grupy źródeł o znacznie różniących się szybkościach zanikania prądów zwarciovych. Występuje to, gdy źródła są połączone z miejscem zwarcia przez impedancje znacznie różniące się lub, gdy moce znamionowe źródeł znacznie różnią się.

Kiedy spodziewamy się, że w wyniku zastosowania obliczeń metodą ogólnego zanikania otrzymamy zbyt zawyżone wyniki należy obliczać charakterystyczne parametry zwarciove płynące od poszczególnych źródeł uwzględniając szybkość zanikania prądów zwarciovych danego źródła (grup źródeł) a charakterystyczne parametry zwarciove w miejscu zwarcia obliczać jako sumę tych prądów w miejscu zwarcia. Taki tok postępowania nazywamy metodą indywidualnego zanikania. Przebieg wykonywania obliczeń metodą indywidualnego zanikania jest następujący:

- a) Buduje się schemat zastępczy obwodu zwarciovego i drogą przekształceń doprowadza się z jednej impedancji i jednej SEM.
- b) Oblicza się wartość składowej zgodnej prądu początkowego w miejscu zwarcia $I_{(1)}$.
- c) Wyznacza się stosunki $\frac{I_{(1)}}{I_n}$ dla każdego źródła prądu zwarciovego.
- d) Należy określić, które generatory przynależą, do której grupy źródeł prądów zwarciovych. Powinno się wyodrębnić dwa lub trzy grupy. W przypadku obliczania prądu I_{ws} oraz I_{tz} do jednej grupy źródeł włączamy generatory o zbliżonej szybkości zanikania prądów zwarciovych, czyli gdy zbliżone są wielkości $\frac{I_{(1)}}{I_n}$. Ma to miejsce, gdy zbliżone są moce znamionowe generatorów i zbliżone są impedancje łączące generator z miejscem zwarcia. Moc znamionowa takiego zastępczego źródła (generatora) jest równa sumie mocy znamionowych źródeł wchodzących w skład danego zastępczego źródła.
- e) Drogą przekształceń schemat zastępczy obwodu zwarciovego doprowadza się do postaci, w której określone są impedancje łączące bezpośrednio SEM każdej grupy źródeł z miejscem zwarcia. Odpowiada to przekształceniu schematu zastępczego obwodu zwarciovego do postaci gwiazdy wieloramiennej.
- f) Oblicza się współczynniki udziału c_i każdej grupy w całkowitym prądzie $I_{(1)}$ w miejscu zwarcia. Należy pamiętać, że:

$$\sum_i c_i = 1 \quad (6.30)$$

Możemy również obliczyć składowe prądu początkowego wydawane przez i-tą grupę źródeł.

g) Z wykresów oblicza się współczynniki k_{wi} oraz k_{ci} dla każdej grupy źródeł w zależności od $\frac{I_{(i)}}{I_n}$ dla danej grupy.

h) Oblicza się prądy wyłączeniowy i cieplny płynące od każdej z grup źródeł:

$$I_{wsi} = m k_{wi} I_{(i)} \quad (6.31)$$

$$I_{tzi} = m k_{ci} I_{(i)} \quad (6.32)$$

i) Oblicza się prądy wyłączeniowy i cieplny w miejscu zwarcia:

$$I_{ws} = \sum_i I_{wsi} \quad (6.33)$$

$$I_{tz} = \sum_i I_{tzi} \quad (6.34)$$

Stosowanie metody indywidualnego zanikania powoduje, że obliczone przez nas charakterystyczne wartości prądów zwarciovych są mniejsze od obliczonych metodą ogólnego zanikania. W przypadku niewłaściwego określenia składu poszczególnych grup źródeł otrzymamy wartości pośrednie. Zastosowanie metody indywidualnego zanikania w przypadku zwarc niesymetrycznych jest identyczne jak powyżej z tym, że impedancję ΔZ włącza się do rozpatrywanego obwodu zwarcia.

6.3. Zasady obliczania charakterystycznych parametrów zwarciovych według normy PN-EN 60909-0:2002 (U)

6.3.1. Założenia do obliczeń

W normie PN-EN 60909-0: 2002 (U) *Prądy zwarciovych w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Część 0. Obliczanie prądów* (U - norma uznaniowa, czyli tekst jej jest w języku angielskim) obliczenia prądów i wielkości zwarciovych mają różny przebieg w zależności od typu zwarcia, i tak rozróżnia się:

- zwarcia pobliskie podczas którego składowa okresowa prądu zwarciovego pozostaje stała,
- zwarcia odległe podczas którego w co najmniej jednej maszynie synchronicznej prąd zwarciovych początkowy jest dwukrotnie większy od prądu znamionowego tej maszyny lub udział silników asynchronicznych w prądzie zwarciovym początkowym liczonym bez tych silników jest większy niż 5% tego prądu.

Podział ten jak i przebiegi prądu zwarciovego podczas zwarcia pobliskiego i odległego jest identyczny jak omówiony już w rozdziale 2. Wspólną wielkością dla obu typów zwarc jest pojęcie źródła napięciowego zastępczego włączonego w miejscu zwarcia jako idealne źródło, niezależne od prądów zwarciovych i niezależne od stanu sieci przed zwarcim. Źródło napięciowe zastępcze w miejscu zwarcia jest jedynym źródłem aktywnym w sieci podczas zwarcia. Wartość tego źródła to:

$$\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (6.35)$$

gdzie:

- c - współczynnik napięciowy podany w tabl. 6.1.

Zastosowanie współczynnika c powoduje, że obliczanie stanu sieci przed zwarcie nie jest wymagane.

Tabl. 6.1. Współczynnik napięciowy c

Napięcie nominalne sieci U_n	Współczynnik napięciowy c do obliczania	
	maksymalnego prądu zwarciovego $c_{\max}^{1)}$	minimalnego prądu zwarciovego c_{\min}
Niskie napięcie od 100 V do 1000 V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Średnie napięcia powyżej 1 kV do 35 kV	1,10	1,00
Wysokie napięcia powyżej 35 kV do 230 kV ²⁾		
¹⁾ $c_{\max} \cdot U_n$ nie może przekraczać najwyższego napięcia urządzeń U_m ; ²⁾ Jeżeli nie jest zdefiniowane napięcie nominalne sieci to powinno się zastosować $c_{\max} \cdot U_n = U_m$ ³⁾ lub $c_{\min} \cdot U_n = 0,9 \cdot U_m$. ⁴⁾ Dla niskiego napięcie z zakresem napięcia +6% np. dla 380 lub 400 V. Dla niskiego napięcie z zakresem napięcia +10%.		

Norma PN-EN 60909-0: 2002 (U) podaje następujące założenia upraszczające:

- rozpatruje się zwarcie pojedyncze, jednoczesne,
- podczas zwarcia nie występują zmiany w rozważanej sieci,
- pomija się wszystkie pojemności i upływności linii oraz admitancje równoległe reprezentujące nie wirujące obciążenia z wyjątkiem pojemności linii dla składowej zerowej w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym,
- nie jest potrzebna znajomość położenia przełączników zaczeów transformatorów,
- pomija się stany przejściowe w generatorach i silnikach,
- pomija się rezystancję łuku.

Norma proponuje, aby stosować metodę składowych symetrycznych podczas obliczania zwarć symetrycznych jak i niesymetrycznych.

Obliczając prądy zwarciovowe w sieci wielonapięciowej należy przeliczać impedancje z jednego poziomu napięcia na inny, zwykle na poziom napięcia w miejscu zwarcia. Przeliczenie to powinno wykorzystywać kwadraty rzeczywistych przekładni transformatorów, przekładnie te powinny być równe stosunkowi napięć znamionowych transformatora, czyli $t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}}$. Metodę jednostek

względnych można zastosować, gdy różnonapięciowe sieci są koherentne, czyli $\frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{U_{nHV}}{U_{nLV}}$

dla każdego transformatora.

W rozdziale tym zostaną omówione tylko te zagadnienia, które są zasadniczo inne niż to, co było już prezentowane w poprzednich rozdziałach.

6.3.2. Maksymalny prąd zwarciovowy

W przypadku konieczności wyznaczenia maksymalnego prądu zwarciovego należy założyć:

- współczynnik c przyjąć z tabl. 6.1 dla maksymalnego prądu zwarciovego,
- wybrać konfiguracją systemu, która prowadzi do maksymalnych prądów zwarciovych,
- wyznaczając impedancję zastępczej sieci elektroenergetycznej wybrać taką konfigurację, która prowadzi do maksymalnego prądu zwarciovego,
- uwzględnić silniki asynchroniczne,

- rezystancje linii wyznaczyć w temperaturze 20°C.

6.3.3. Minimalny prąd zwarciov

W przypadku konieczności wyznaczenia minimalnego prądu zwarciovego należy założyć:

- współczynnik c przyjąć z tabl. 6.1 dla minimalnego prądu zwarciovego,
- wybrać konfigurację systemu, która prowadzi do minimalnych prądów zwarciovych,
- pominąć silniki,
- rezystancję linii przeliczyć na maksymalną temperaturę zgodnie z wzorem:

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\theta_e - 20)] \cdot R_{L20} \quad (6.36)$$

gdzie:

- R_{L20} - rezystancja linii w temperaturze 20°C,
- θ_e - temperatura przewodnika linii na koniec trwania zwarcia w [°C],
- $\alpha = 0,004$ w [1/°C].

Temperaturę przewodnika linii na koniec trwania zwarcia wyznaczyć można zgodnie np. z IEC 60865-1.

6.3.4. Impedancje elementów systemu elektroenergetycznego i współczynniki korekcyjne impedancji

6.3.4.1. Sieć elektroenergetyczna zastępcza

Impedancja sieci elektroenergetycznej zastępczej Z_Q jest wyznaczana w oparciu prąd zwarciov początkowy zwarcia trójfazowego, jaki płynie z tej sieci przy zwarciu na jej zaciskach I''_{kQ} :

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (6.37)$$

Rezystancję i reaktancję sieci elektroenergetycznej zastępczej wyznacza się następująco:

- Dla sieci o napięciu nominalnym powyżej 35 kV zakładamy, że rezystancja sieci jest równa zeru a reaktancja jej impedancji.
- Dla pozostałych sieci mamy:

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad (6.38)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad (6.39)$$

6.3.4.2. Transformatory

Obliczanie impedancji transformatorów jest takie samo jak było podane w rozdziale 4 jednak za względu na inne oznaczenia wielkości zostaną dodatkowo podane:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{(U_{rT})^2}{S_{rT}} \quad (6.40)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{(U_{rT})^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot (I_{rT})^2} \quad (6.41)$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T)^2 - (R_T)^2} \quad (6.42)$$

W przypadku transformatorów wprowadzono współczynniki korekcyjne, przez który należy pomnożyć impedancję transformatora. Współczynniki korekcyjne należy użyć także przy wyznaczaniu impedancji transformatora dla składowej przeciwnej i zerowej, przy czym nie dotyczy to impedancji uziemiającej transformatora. Współczynniki te są o postaci:

- Transformator sieciowy dwuuzwojeniowy za wyjątkiem transformatorów blokowych

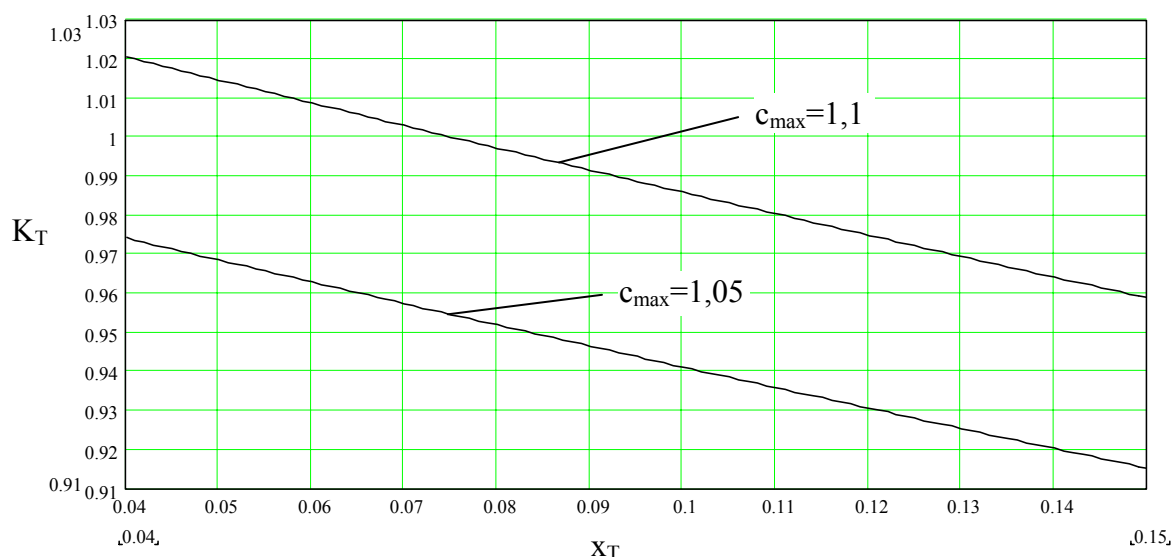
$$K_T = \frac{0,95 \cdot c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (6.43)$$

gdzie:

- x_T - reaktancja transformatora wyznaczona w jednostkach względnych, czyli:

$$x_T = X_T \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (6.44)$$

Na rys. 6.8 pokazano wartości współczynnika korekcyjnego K_T w funkcji reaktancji transformatora wyznaczonej w jednostkach względnych (w przybliżeniu równej napięciu zwarcia transformatora w jednostkach względnych) dla dwóch wartości współczynnika c .



Rys. 6.8. Współczynnik K_T w zależności od wartości impedancji transformatora wyznaczonej w jednostkach względnych x_T

- Transformator sieciowy dwuuzwojeniowy, dla którego możliwe jest określenie warunków pracy w stanie przedzwarciovym za wyjątkiem transformatorów blokowych,

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_T \cdot \left(\frac{I_T^b}{I_{rT}} \right) \cdot \sin \varphi_T^b} \quad (6.45)$$

gdzie:

- U^b - najwyższe napięcie pracy sieci przed zwarcie,
- I_T^b - najwyższy prąd transformatora przed zwarcie,
- I_{rT} - prąd znamionowy transformatora,
- φ_T^b - kąt obciążenia prądu transformatora przed zwarcie.

- Transformator trójzwojowy

$$K_{TAB} = \frac{0,95 \cdot c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (6.46)$$

$$K_{TAC} = \frac{0,95 \cdot c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (6.47)$$

$$K_{TBC} = \frac{0,95 \cdot c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (6.48)$$

6.3.4.3. Generator synchroniczny

Impedancję generatora synchronicznego należy pomnożyć przez poniżej zdefiniowane współczynniki korekcyjne przy obliczaniu jej dla składowej symetrycznej zgodnej, przeciwnej i zerowej:

- Generator synchroniczny przyłączony bezpośrednio do sieci

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (6.49)$$

gdzie:

- U_{rG} - napięcie znamionowe generatora,
- x_d'' - reaktancja nadprzejściowa generatora w jednostkach względnych,
- φ_{rG} - kąt obciążenia prądu generatora przed zwarcie.

W przypadku, gdy napięcie na zaciskach generatora różni się od jego napięcia znamionowego to można do powyższego równania zamiast napięcia znamionowego wprowadzić napięcie rzeczywiste generatora przed zwarcie wyznaczone następująco:

$$U_G = U_{rG} \cdot (1 + p_G) \quad (6.50)$$

gdzie:

- p_G - zakres regulacji napięcia generatora.

Dla generatorów synchronicznych podano także wartości rezystancji obliczeniowej R_{Gf} wyznaczonej w oparciu o reaktancje nadprzejęściową generatora X_d'' :

- $R_{Gf} = 0,15 \cdot X_d''$ dla generatorów o napięciu znamionowym $U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$,
- $R_{Gf} = 0,07 \cdot X_d''$ dla generatorów o napięciu znamionowym $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ i mocy znamionowej $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$,
- $R_{Gf} = 0,05 \cdot X_d''$ dla generatorów o napięciu znamionowym $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ i mocy znamionowej $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$.

Powyższe wartości rezystancji należy stosować podczas wyznaczaniu prądu zwarciego udarowego. W przypadku obliczania zanikania składowej aperiodycznej prądu zwarciego należy brać pod uwagę fabrycznie podane wartości rezystancji generatora albowiem powyższe wartości są znacznie zawyżone.

Obliczanie minimalnego prądu zwarciego w układzie z niedowzbudzonym generatorem wykracza poza zakres tej normy.

- Generator połączony z siecią za pomocą transformatora blokowego posiadającego podobciążeniową regulację przekładni

Szeregowo połączone impedancje generatora Z_G i transformatora blokowego wyznaczona na poziomie napięcia górnego Z_{THV} oznaczone są jako impedancja bloku Z_S i wyznaczone z użyciem współczynnika korekcyjnego K_S z wzoru:

$$Z_S = K_S \cdot (t_r^2 \cdot Z_G + Z_{THV}) \quad (6.51)$$

gdzie:

- t_r - stosunek napięć znamionowych górnego U_{rTHV} do dolnego U_{rTLV} transformatora blokowego.

Współczynnik korekcyjny K_S wyznaczamy z wzoru:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (6.52)$$

gdzie:

- U_{nQ} - nominalne napięcie sieci, do której jest przyłączony transformator blokowy.

Gdy minimalne napięcie pracy strony górnej $U_{Q_{\min}}^b$ jest trwale większe od nominalne napięcie sieci, do której jest przyłączony transformator blokowy $U_{Q_{\min}}^b \geq U_{nQ}$ wtedy w równaniu (6.52) zamiast członu U_{nQ}^2 można wprowadzić iloczyn $U_{Q_{\min}}^b \cdot U_{nQ}$. Jednakże, gdy chcemy obliczyć maksymalny prąd zwarciego płynący od bloku generator-transformator to należy wykorzystać równanie (6.52) w pierwotnej postaci.

W przypadku, gdy napięcie na zaciskach generatora różni się od jego napięcia znamionowego to można do powyższego równania zamiast napięcia znamionowego wprowadzić napięcie rzeczywiste generatora przed zwarcie wyznaczone z równania (6.47) z $p_G=0,05$.

W układzie z niedowzbudzonym generatorem obliczanie prądów zwarcie niesymetrycznych z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego K_S z równania (6.52) może prowadzić do zawyżenia tych prądów.

- Generator połączony z siecią za pomocą transformatora blokowego nie posiadającego podobciążeniowej regulacji przekładni

Szeregowo połączone impedancje generatora Z_G i transformatora blokowego wyznaczona na poziomie napięcia górnego Z_{THV} oznaczone są jako impedancja bloku Z_{SO} i wyznaczone z użyciem współczynnika korekcyjnego K_{SO} z wzorów:

$$Z_{SO} = K_{SO} \cdot (t_T^2 \cdot Z_G + Z_{THV}) \quad (6.53)$$

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} \cdot (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (6.54)$$

gdzie:

- p_T - zakres regulacji w stanie bezprądowym transformatora blokowego.

Dodatkowo należy stwierdzić, że w przypadku gdy:

- Transformator blokowy nie posiada żadnego przełącznika zaczeów to należy przyjąć, że $(1 \pm p_T) = 1$.
- Wyznaczamy największy prąd zwarcioowy płynący po stronie górnego napięcia transformatora blokowego wyposażonego w przełącznik zaczeów zmieniany w stanie beznapięciowym to należy przyjąć $(1 - p_T)$

6.3.4.4. Silniki asynchroniczne

Silniki asynchroniczne średniego i niskiego napięcia są źródłem prądu zwarcioowego i należy dla nich wyznaczać:

- prąd zwarcioowy początkowy I_k'' ,
- prąd zwarcioowy udarowy i_p ,
- prąd zwarcioowy wyłączeniowy symetryczny I_b ,

a dla zwarć niesymetrycznych także prąd zwarcioowy ustalony I_k .

Silniki asynchroniczne niskiego napięcia należy brać pod uwagę w następujących instalacjach:

- w układach potrzeb własnych elektrowni,
- w przemysłowych instalacjach np. zakładach przemysłu chemicznego, stalowego cz w stacjach pomp.

Wpływ silników asynchronicznych niskiego napięcia można pominąć, jeżeli udział silników asynchronicznych w prądzie zwarcioowym początkowym liczonym bez tych silników jest mniejszy niż 5% tego prądu tzn., gdy spełniona jest zależność:

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_{kM}'' \quad (6.55)$$

gdzie:

- $\sum I_{rM}$ - suma prądów znamionowych silników przyłączonych bezpośrednio do sieci, w której wystąpiło zwarcie, czyli bez pośrednictwa transformatora,
- I_{kM}'' - prąd zwarcioowy początkowy liczonym bez tych silników.

Impedancja silników jest obliczana z zależności:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{\frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM}}} \quad (6.56)$$

gdzie:

- $\frac{I_{LR}}{I_{rM}}$ - współczynnik samorozruchu silnika,
- η_{rM} - sprawność silnika.

Rezystancję i reaktancję silnika asynchronicznego wyznaczamy wtedy zależności od wielkości silnika:

- silniki wysokonapięciowe o mocy P_{rM} podzielonej przez liczbę par biegunów większej lub równej 1 MW:

$$X_M = 0,995 \cdot Z_M \quad (6.57)$$

$$R_M = 0,1 \cdot X_M \quad (6.58)$$

- silniki wysokonapięciowe o mocy P_{rM} podzielonej przez liczbę par biegunów mniejszej od 1 MW:

$$X_M = 0,989 \cdot Z_M \quad (6.59)$$

$$R_M = 0,15 \cdot X_M \quad (6.60)$$

- silniki niskonapięciowe:

$$X_M = 0,922 \cdot Z_M \quad (6.61)$$

$$R_M = 0,42 \cdot X_M \quad (6.62)$$

Impedancje silników są włączana w schemat zastępczy sieci dla składowej zgodnej i ewentualnie przeciwnej.

Silniki asynchroniczne średniego i niskiego napięcia połączone z miejscem zwarcia za pośrednictwem transformatora lub za pośrednictwem pracujących równolegle transformatorów mogą być pominięte, gdy:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{100 \cdot c \cdot \sum S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I''_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad (6.63)$$

gdzie:

- $\sum P_{rM}$ - suma mocy znamionowych czynnych silników,
- $\sum S_{rT}$ - suma mocy znamionowych pozornych transformatorów, przez które silniki są połączone z miejscem zwarcia.
- I''_{kQ} - prąd zwarciovowy początkowy płynący z układu zasilania liczonym bez tych silników.

Wzoru (6.63) nie należy stosować w przypadku transformatora trójzwojeniowego.

Silniki asynchroniczne niskiego napięcia połączone z miejscem zwarcia za pośrednictwem transformatora i przyłączone do strony dolnego napięcia tego transformatora za pośrednictwem różnych kabli można zastąpić jednym zastępczym silnikiem, którego parametry są następujące:

- $\frac{P_{rM}}{p} = 0,05 \text{ MW}$, przy czym p to liczba par biegunów silnika,
- $\frac{I_{LR}}{I_{rM}} = 5$,
- $\frac{R_M}{X_M} = 0,42$.

6.3.4.5. Przekształtniki statyczne

Odwracalne statyczne przekształtniki zasilające różne napędy są rozważane jako źródła prądu zwarciovego jedynie podczas zwarcia trójfazowego, jeżeli:

- masy wirujące silników są dostatecznie duże,
- układ przekształtnika umożliwia przepływ energii od silnika do miejsca zwarcia podczas wybiegu silnika spowodowanego zwarcie.

W tej sytuacji wyznacza się jedynie:

- prąd zwarciovowy początkowy I_k'' ,
- prąd zwarciovowy udarowy i_p .

Odwracalny statyczny przekształtnik modeluje się impedancją wyznaczoną z parametrów silnika, przy czym przyjmuje się:

- $\frac{I_{LR}}{I_{rM}} = 3$,
- $\frac{R_M}{X_M} = 0,1$, $X_M = 0,995 \cdot Z_M$.

6.3.4.6. Kondensatory i obciążenia niewirujące

Podczas obliczania prądów zwarciovych należy:

- pominąć kondensatory równoległe i obciążenia niewirujące również podczas wyznaczania prądu zwarciovego udarowego,
- pominąć kondensatory szeregowo do kompensacji reaktancji linii jeśli wyposażone są w urządzenia do ograniczania przepięć włączane równoległe z kondensatorem,
- odnośnie zachowania się układów przesyłowych prądu stałego podczas zwarcia po stronie prądu przemiennego norma nakazuje specjalne rozważania nie zawarte w PN-EN 60909-0: 2002.

6.3.5. Prąd zwarciovowy początkowy I_k''

Prąd zwarciovowy początkowy dla poszczególnych rodzajów zwarcia wyraża się wzorem:

- zwarcie trójfazowe

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (6.64)$$

- zwarcie dwufazowe

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z(1) + Z(2)|} \quad (6.65)$$

- zwarcie jednofazowe

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|Z(1) + Z(2) + Z(0)|} \quad (6.66)$$

- zwarcie dwufazowe doziemne

$$I''_{k2EL2} = c \cdot U_n \cdot \frac{\left| 1 + a^2 + \frac{Z(0)}{Z(1)} \right|}{|Z(1) + 2 \cdot Z(0)|} \quad (6.67)$$

$$I''_{k2EL3} = c \cdot U_n \cdot \frac{\left| 1 + a + \frac{Z(0)}{Z(1)} \right|}{|Z(1) + 2 \cdot Z(0)|} \quad (6.68)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|Z(1) + 2 \cdot Z(0)|} \quad (6.69)$$

6.3.6. Prąd zwarciaowy udarowy i_p

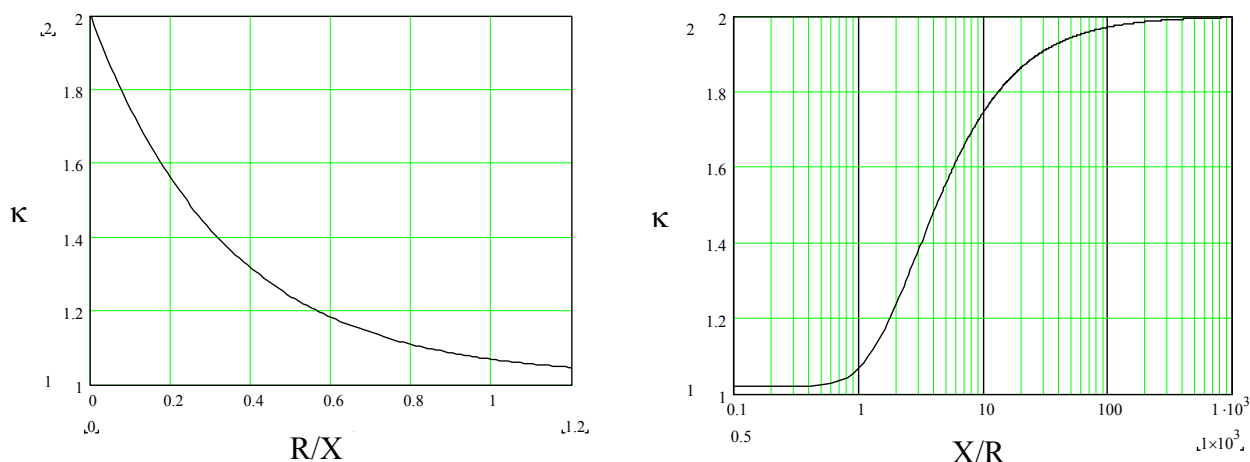
6.3.6.1. Zwarcie w sieci promieniowej

Prąd zwarciaowy udarowy może być wyznaczony z zależności:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \quad (6.70)$$

Współczynnik udaru κ można wyznaczyć z rys. 6.9 lub z wzoru:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X} \quad (6.71)$$



Rys. 6.9. Współczynnik udaru w zależności od wartości R/X oraz X/R

6.3.6.2. Zwarcie w sieci zamkniętej

Obliczając prąd zwarciaowy udarowy w sieci zamkniętej wykorzystujemy dotychczasowe wzory, przy czym podczas obliczenia współczynnika κ stosunek R/X należy wyznaczyć stosując jedną z trzech poniższych metod:

Metoda jednakowych wartości stosunków R/X lub X/R w sieci

Współczynnik κ wyznaczamy przyjmując najmniejszą wartość stosunku R/X (lub największą wartość X/R) spośród gałęzi sieci. Do wyznaczenia stosunku R/X przyjmujemy gałąź bezpośrednio przyłączoną do miejsca zwarcia, przy czym może to być kilka szeregowo połączonych gałęzi pracujących na napięciu występującym w miejscu zwarcia traktowane wtedy jako jedna gałąź.

Metoda wyznaczenia stosunku R/X lub X/R z impedancji zwarciaowej

W tej metodzie wyznaczamy impedancję zwarciaową obwodu $Z_k = R_k + j \cdot X_k$ i w oparciu o wartość R_k/X_k obliczamy współczynnik κ . Prąd zwarciaowy udarowy wynosi:

$$i_p = 1,15 \cdot \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (6.72)$$

Tak długo jak stosunek R/X w każdej gałęzi jest mniejszy od 0,3 nie jest konieczne stosowanie współczynnika 1,15. Mnożenie przez ten współczynnik nie występuje, jeśli $1,15 \cdot \kappa$ jest większe od 1,8 w sieci niskiego napięcia lub 2,0 w sieci średniego lub wysokiego napięcia.

Metoda częstotliwości zastępczej

W tej metodzie wyznaczamy zastępczą impedancję zwarciaową obwodu $Z_c = R_c + j \cdot X_c$ dla zastępczej częstotliwości $f_c = 20$ Hz dla sieci o częstotliwości znamionowej 50 Hz i $f_c = 24$ Hz dla sieci o częstotliwości znamionowej 60 Hz. Znając ww. zastępczą impedancję zwarciaową obwodu stosunek R/X obliczamy z wzoru:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \quad (6.73)$$

Prąd zwarciaowy udarowy wyznaczamy dalej tak jak opisano w rozdziale 6.3.6.1. Metoda c) jest proponowana dla sieci zamkniętej. Stosując tę metodę współczynniki korekcyjne impedancji wyznacza się używając częstotliwości znamionowej sieci a nie zastępczej.

6.3.7. Składowa aperiodyczna prądu zwarciaowego $i_{d.c.}$

Maksymalną wartość składowej aperiodycznej prądu zwarciaowego wyznaczamy z zależności:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \frac{R}{X}} \quad (6.74)$$

W sieci zamkniętej stosunek $\frac{R}{X}$ powinien być wyznaczony stosując metodę częstotliwości zastępczej, przy czym w zależności od czasu częstotliwość zastępczą określamy zgodnie z tabl. 6.2.

Tabl. 6.2. Częstotliwości zastępcze w funkcji czasu

$f \cdot t$	<1	<2,5	<5	<12,5
$\frac{f_c}{f}$	0,27	0,15	0,092	0,055

6.3.8. Prąd wyłączeniowy symetryczny I_b

6.3.8.1. Zwarcie odległe

Podczas zwarcia odległego prąd wyłączeniowy symetryczny jest równy prądowi zwarciaowemu początkowemu, czyli:

$$I_b = I_k'' \quad (6.75)$$

6.3.8.2. Zwarcie pobliskie w sieci nie zamkniętej

Prąd wyłączeniowy symetryczny płynący od generatora w przypadku występowania zwarcia pobliskiego w sieci promieniowej jest równy iloczynowi prądu zwarciaowego początkowego i współczynnika μ uwzględniającego zanikanie składowej okresowej prądu zwarciaowego:

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (6.76)$$

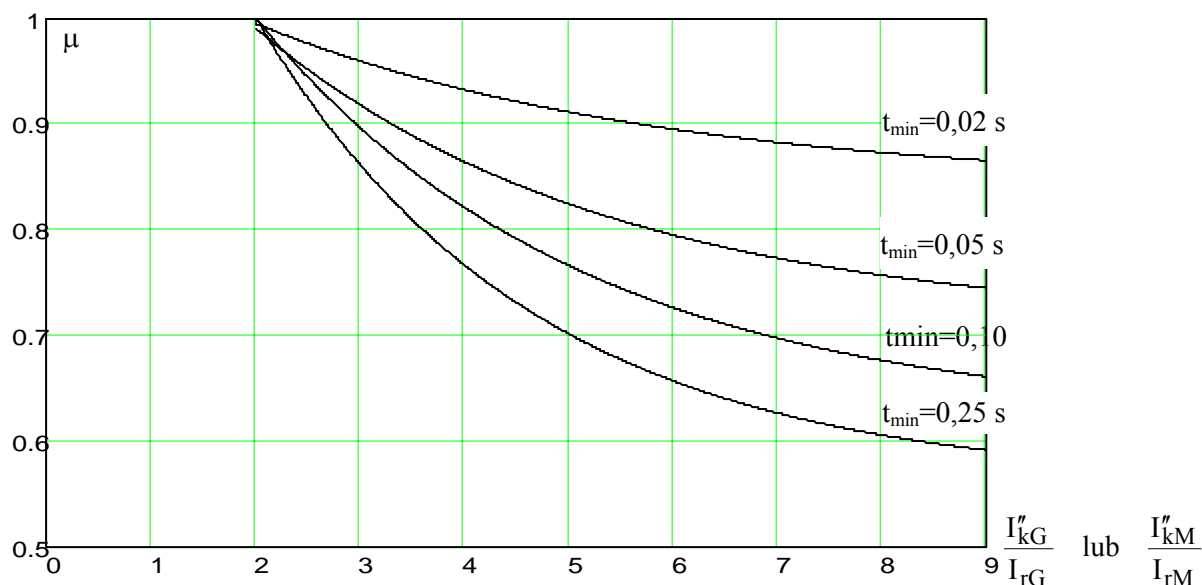
Współczynnik μ wyznaczany jest dla najkrótszego czasu od chwili powstania zwarcia do momentu otwarcia pierwszego bieguna łącznika. Współczynnik ten wyznaczamy z poniższych wzorów lub wykorzystując rys. 6.10.

$$\mu = 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 \cdot \frac{I_{kG}''}{I_{rG}}} \quad \text{dla} \quad t_{\min} = 0,02 \text{ s} \quad (6.77)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot \frac{I_{kG}''}{I_{rG}}} \quad \text{dla} \quad t_{\min} = 0,05 \text{ s} \quad (6.78)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad \text{dla} \quad t_{\min} = 0,10 \text{ s} \quad (6.79)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad \text{dla} \quad t_{\min} \geq 0,25 \text{ s} \quad (6.80)$$



Rys. 6.10. Współczynnik μ dla wyznaczania prądu wyłączeniowego symetrycznego dla zwarcia pobliskiego

Wzory dla współczynnika μ dotyczą generatorów synchronicznych wyposażonych we wzbudnice maszynowe lub wzbudnice półprzewodnikowe, których pułap forsowania wzbudzenia nie przekracza 1,6 a czas t_{\min} jest mniejszy niż 0,25 s. Wzory te można też stosować dla generatorów niskiego napięcia wyposażonych we wzbudnice półprzewodnikowe kompaundowane, jeżeli czas t_{\min} jest nie większy niż 0,1. W pozostałych przypadkach należy przyjąć, że $\mu = 1$ lub wyznaczyć tą wielkość inną metodą.

W przypadku występowania w sieci promieniowej kilku źródeł prąd wyłączeniowy symetryczny jest równy sumie arytmetycznej prądów wyłączeniowych symetrycznych płynących od każdego źródła. Zwarcia niesymetryczne należy traktować jako zwarcia odległe.

Prąd wyłączeniowy symetryczny płynący od silników asynchronicznych w sieci promieniowej jest równy iloczynowi prądu zwarciovego początkowego, współczynnika μ uwzględniającego zanikanie składowej okresowej tego prądu zwarciovego i współczynnika q zależnego od mocy znamionowej czynnej silnika na parę biegunów:

$$I_{bM} = \mu \cdot q \cdot I''_{kM} \quad (6.81)$$

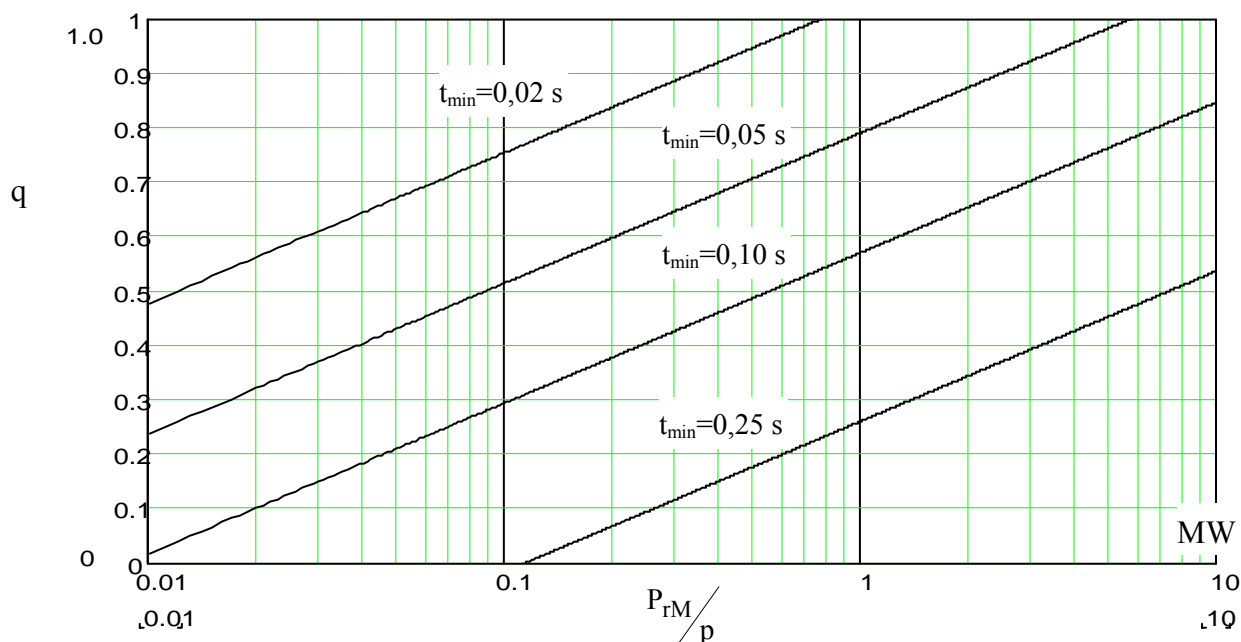
Wartości współczynnika q wyznaczamy z poniższych zależności lub w oparciu o rys. 6.11:

$$q = 1,03 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{P_{rM}}{p}\right) \quad \text{dla} \quad t_{\min} = 0,02 \text{ s} \quad (6.82)$$

$$q = 0,79 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{P_{rM}}{p}\right) \quad \text{dla} \quad t_{\min}=0,05 \text{ s} \quad (6.83)$$

$$q = 0,57 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{P_{rM}}{p}\right) \quad \text{dla} \quad t_{\min}=0,10 \text{ s} \quad (6.84)$$

$$q = 0,26 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{P_{rM}}{p}\right) \quad \text{dla} \quad t_{\min}=0,25 \text{ s} \quad (6.85)$$



Rys. 6.11. Współczynnik q uwzględniający wpływ mocy silnika na zmianę składowej okresowej prądu zwarciovego

6.3.8.3. Zwarcie pobliskie w sieci zamkniętej

Obliczając prąd wyłączeniowy symetryczny płynący od generatorów lub silników asynchronicznych i innych źródeł w przypadku występowania zwarcia pobliskiego w sieci zamkniętej rozpoczynamy te obliczenia od określenia prądu zwarciovego początkowego, następnie jego rozptył w każdym analizowanym źródle, aby potem stosując metodę nazywaną w literaturze polskiej metodą indywidualnego zanikania wyznaczyć całkowity prąd wyłączeniowy symetryczny w miejscu zwarcia stosując poniższe wyrażenie:

$$I_b = I''_k - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_i) \cdot I''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_j \cdot q_j) \cdot I''_{kMj} \quad (6.86)$$

Występujące w powyższym wzorze wielkości $\Delta U''_{Gi}$ i $\Delta U''_{Mi}$ to spadki napięć na reaktancjach generatora lub silnika podczas zwarcia i obliczamy je następująco:

$$\Delta U''_{Gi} = j \cdot X''_{diK} \cdot I''_{kGi} \quad (6.87)$$

$$\Delta U''_{Mi} = j \cdot X''_{Mi} \cdot I''_{kMi} \quad (6.88)$$

6.3.9. Prąd zwarciový ustalony I_k

6.3.9.1. Uwagi ogólne

Prąd zwarciový ustalony zależy od wielu czynników trudnych do ilościowego oszacowania takich jak: typ układu wzbudzenia, działanie regulatora wzbudzenia czy nasycanie się obwodów generatora i dlatego dokładność obliczeń tego prądu nie jest zbyt wielka. Dodatkowo należy pamiętać, że maszyny synchroniczne ze wzbudnicami statycznymi zasilanymi napięciem generatorowym nie generują prądu zwarciovego ustalonego w przypadku zwarcia na zaciskach maszyny, gdy napięcie zasilające układ wzbudzenia jest równe zeru, ale są źródłami tego prądu, gdy zwarcie jest nie na zaciskach, ale za pewną impedancją.

W sieciach zamkniętych, z wieloma źródłami należy przyjąć, że prąd zwarciový ustalony jest równy prądowi zwarciovemu początkowemu. Tak samo należy postąpić w przypadku zwarcí niesymetrycznych.

6.3.9.2. Maksymalny prąd zwarciový ustalony

Maksymalny prąd zwarciový ustalony obliczamy z wzoru:

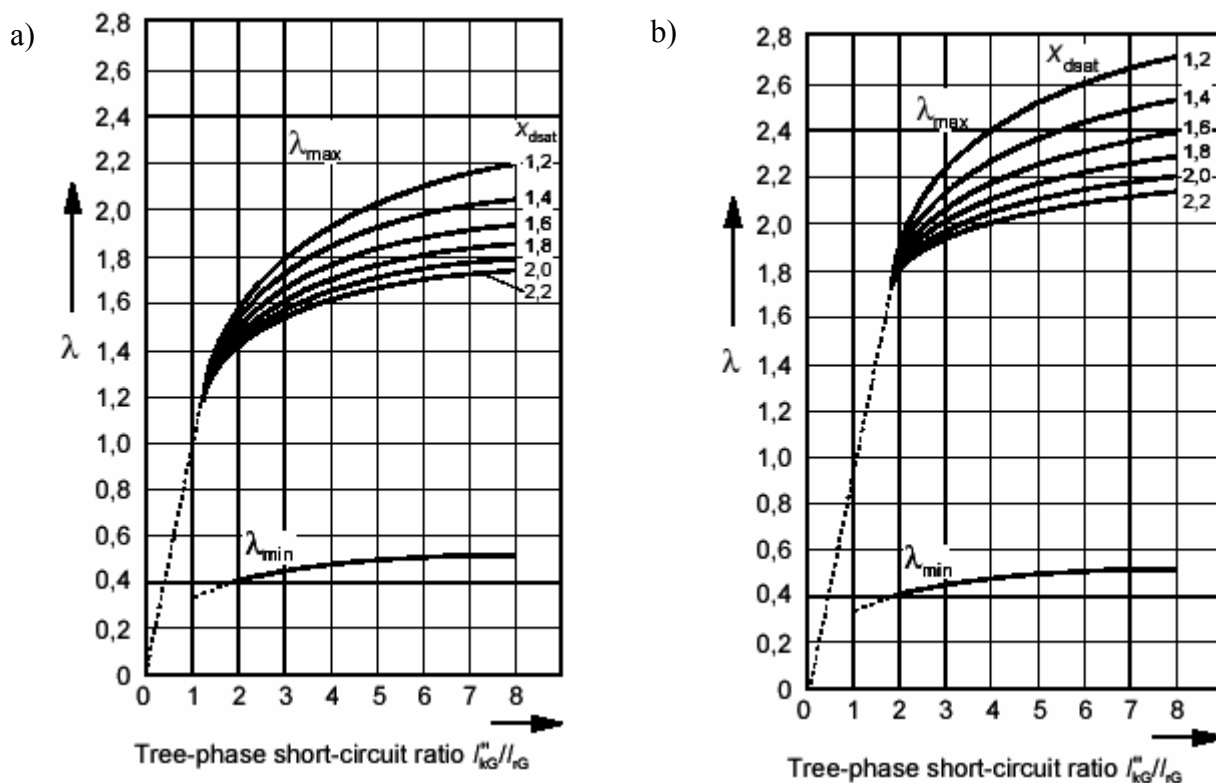
$$I_{k\max} = \lambda_{\max} \cdot I_{rG} \quad (6.89)$$

Współczynniki λ_{\max} w funkcji stosunku prądu zwarciovego początkowego generatora do prądu znamionowego I_{kG}''/I_{rG} oraz w funkcji reaktancji synchronicznej podłużnej nasyconej wyrażonej w jednostkach względnych x_{dsat} odczytujemy z:

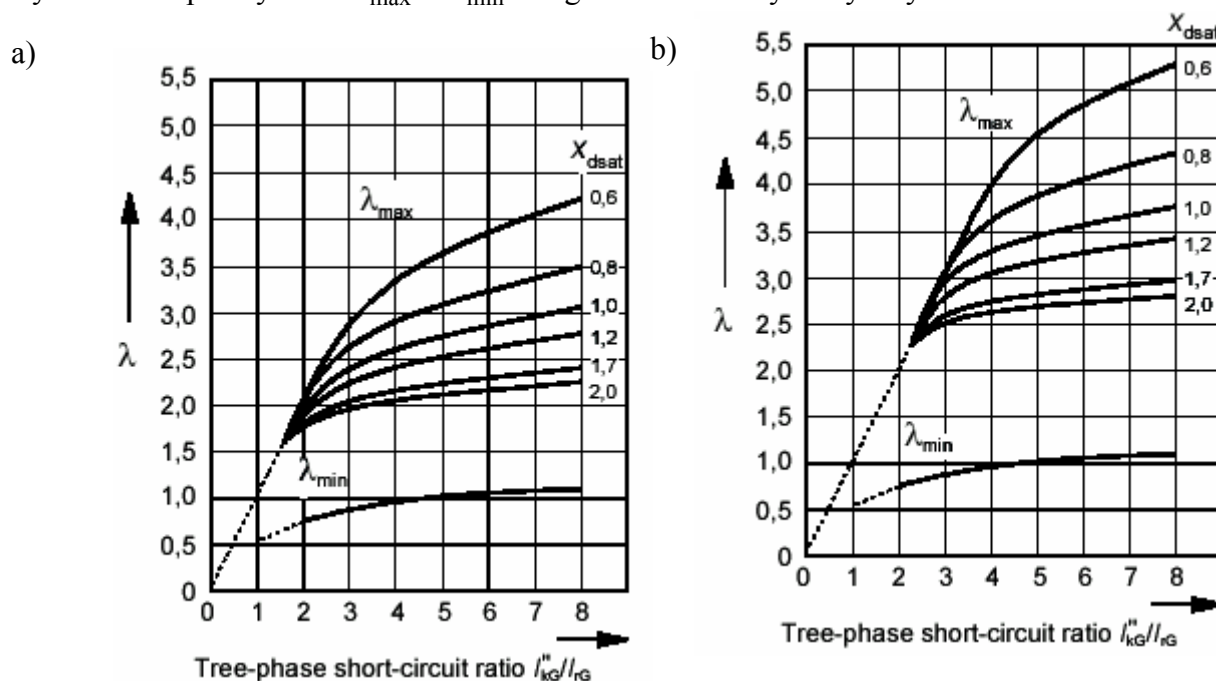
- rys. 6.12 dla generatorów z cylindrycznym wirnikiem (turbogeneratorów),
- rys. 6.13 dla generatorów z wystającymi biegunami (hydrogeneratorów).

Na tych rysunkach wielkości współczynnika λ_{\max} jest podana dla dwóch przypadków podanych na części a) lub b) rysunku:

- a) dla maszyn synchronicznych z cylindrycznym wirnikiem mających pułap forsowania wzbudzenia wynoszących 1,3 lub 1,6 dla maszyn synchronicznych z wystającymi biegunami,
- b) dla maszyn synchronicznych z cylindrycznym wirnikiem mających pułap forsowania wzbudzenia wynoszących 1,6 lub 2,0 dla maszyn synchronicznych z wystającymi biegunami.



Rys. 6.12. Współczynniki λ_{\max} i λ_{\min} dla generatorów z cylindrycznym wirnikiem



Rys. 6.13. Współczynniki λ_{\max} i λ_{\min} dla generatorów z wystającymi biegunami

6.3.9.3. Minimalny prąd zwarcia ustalony

Minimalny prąd zwarcia ustalony obliczamy z wzoru:

$$I_{k\min} = \lambda_{\min} \cdot I_{rG} \quad (6.90)$$

6.3.10. Prądy zwarciove przy zwarcu na zaciskach silnika asynchronicznego

W rozdziale tym zostaną podsumowane w tabl. 6.3 zależności na prądy zwarciove płynące przy różnych rodzajach zwarć na zaciskach silnika asynchronicznego. Podczas zwarcia jednofazowego $Z_{(0)M} = \infty$, jeżeli silnik nie ma uziemionego punktu neutralnego.

Tabl. 6.3. Prądy zwarciove przy zwarcu na zaciskach silnika asynchronicznego

Rodzaj zwarcia	Trójfazowe	Dwufazowe	Jednofazowe
Prąd zwarciovy początkowy	$I''_{k3M} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_M}$	$I''_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$	$I''_{k1M} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{2 \cdot Z_{(1)M} + Z_{(0)M}}$
Prąd zwarciovy udarowy	$i_{p3M} = \kappa_M \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3M}$	$i_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3M}$	$i_{p1M} = \kappa_M \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1M}$
	Silniki średniego napięcia: <ul style="list-style-type: none"> • $\kappa_M = 1,65$ silniki o mocy na parę biegunów mniejszej od 1 MW, • $\kappa_M = 1,75$ silniki o mocy na parę biegunów większej lub równej od 1 MW. Silnik niskiego napięcia razem kablami łączącymi je z rozdzielnią: <ul style="list-style-type: none"> • $\kappa_M = 1,3$. 		
Prąd zwarciovy wyłączeniowy symetryczny	$I_{b3M} = \mu \cdot q \cdot I''_{k3M}$	$I_{b2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3M}$	$I_{b1M} = I''_{k1M}$
	Współczynniki zgodnie z: <ul style="list-style-type: none"> • μ - wzory od (6.74) do (6.77) lub rys. 6.10, • q - wzory od (6.79) do (6.82) lub rys. 6.11. 		
Prąd zwarciovy ustalony	$I_{k3M} = 0$	$I_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3M}$	$I_{k1M} = I''_{k1M}$

6.3.11. Całka Joule'a i zastępczy prąd zwarciovy cieplny I_{th}

Całka Joule'a to energia cieplna wydzielana przez prąd zwarciovy w czasie trwania zwarcia na rezystancji i można ją opisać zależnością:

$$\int_0^{T_k} i^2 \cdot dt = (I''_k)^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = (I_{th})^2 \cdot T_k \quad (6.91)$$

Całka ta została uzależniona od prądu zwarciowego początkowego i dwóch współczynników:

- m - opisującego wpływ zmian składowej nieokresowej prądu zwarciowego,
- n - opisującego wpływ zmian składowej nieokresowej prądu zwarciowego.

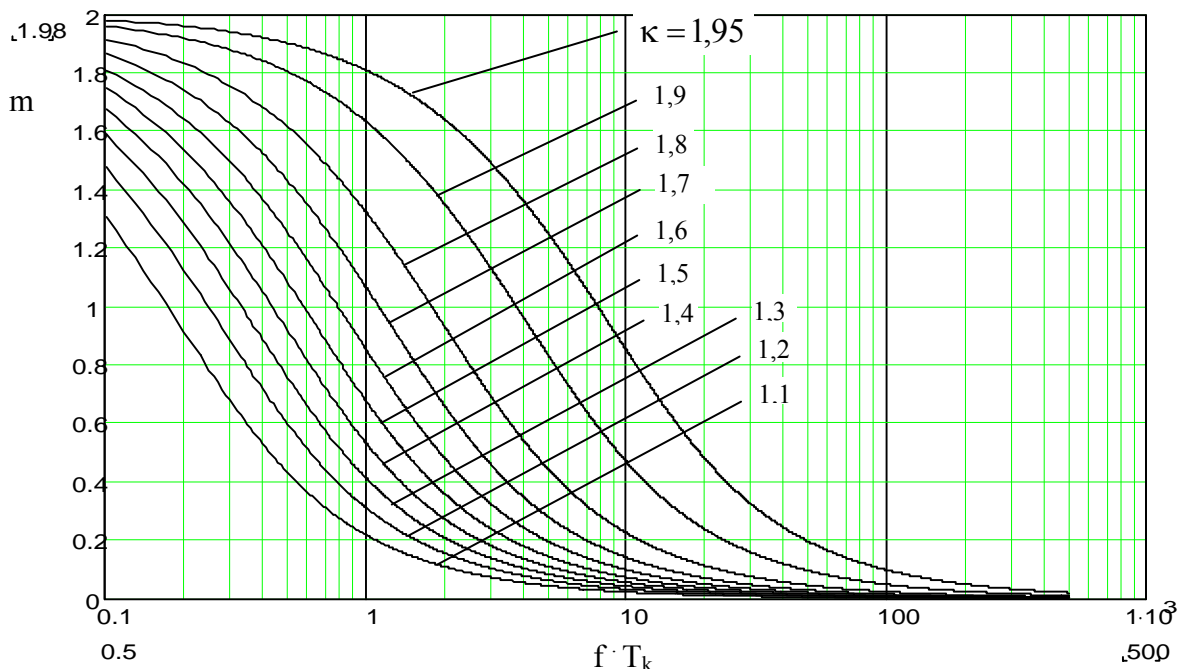
W oparciu o równanie (6.54) wyprowadzono wzór na zastępczy prąd zwarciovy cieplny, który jest prądem okresowym o stałej amplitudzie i wydzielającym tą samą ilość ciepła co prąd zwarciovy. Zastępczy prąd zwarciovy cieplny można zapisać następująco:

$$I_{th} = I''_k \cdot \sqrt{m + n} \quad (6.92)$$

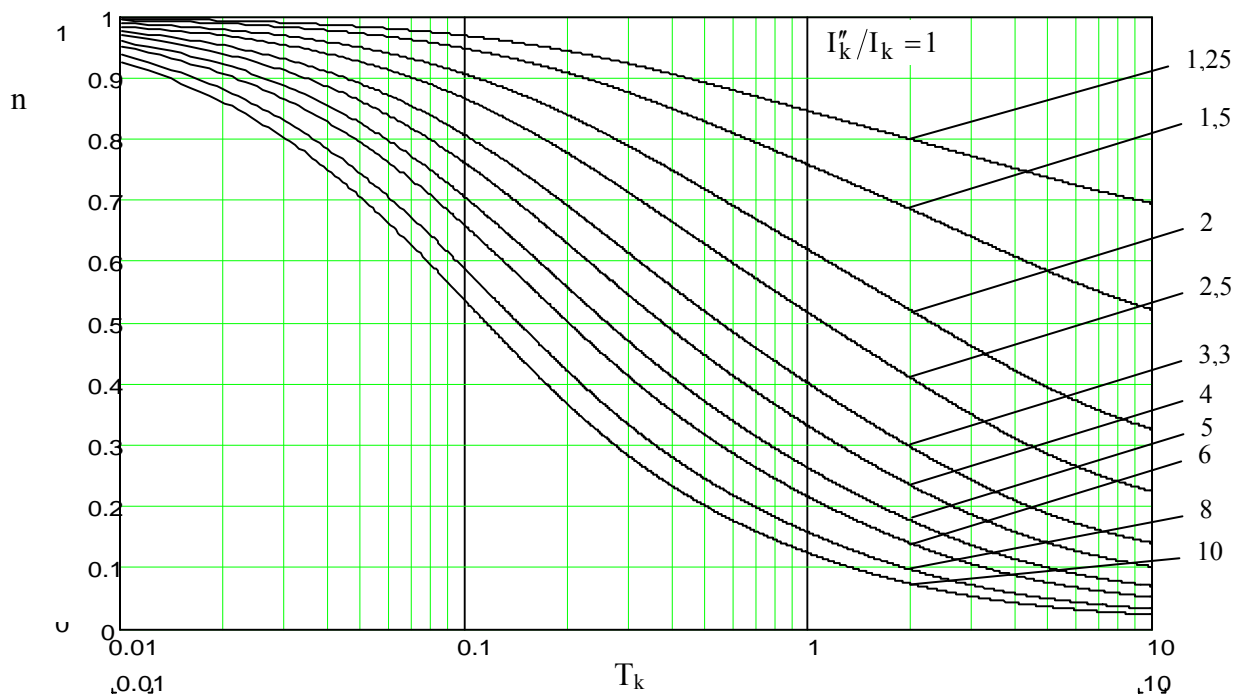
Współczynniki m oraz n można odczytać z rys. 6.14 i rys. 6.15 lub z zależności analitycznych, wzory od (6.56) do (6.60).

Uwagi:

- Podczas zwarcia odległego, gdy czas trwania zwarcia jest większy lub równy 0,5 s można przyjąć, że $m+n=1$.
- W sytuacji, gdy zastosowano w sieci bezpieczniki lub wyłączniki ograniczające prąd zwarciaowy to całkę Joule'a należy wyznaczyć z odpowiednich charakterystyk tych urządzeń.



Rys. 6.14. Współczynnik m uwzględniający wpływ zmian składowej nieokresowej prądu zwarciaowego na nagrzewanie się przewodu



Rys. 6.15. Współczynnik n uwzględniający wpływ zmian składowej okresowej prądu zwarciaowego na nagrzewanie się przewodu

W normie współczynniki m oraz n są podane także w formie analitycznej:

- współczynnik m

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot \left[e^{4 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} - 1 \right] \quad (6.93)$$

Dla $\kappa = 2$ z powyższego wzoru otrzymuje się złe wyniki ($m=0$). W tej sytuacji należy podstawić $\kappa = 1,99$ i to rozwiązuje ten problem.

- współczynnik n

$$\text{dla } \frac{I_k''}{I_k} = 1 \quad n=1, \quad (6.94)$$

$$\text{dla } \frac{I_k''}{I_k} \geq 1,25$$

$$\begin{aligned} n = \frac{1}{\left(\frac{I_k''}{I_k}\right)^2} & \left[1 + \frac{T_d'}{20 \cdot T_k} \left(1 - e^{-20 \cdot T_k / T_d'} \right) \cdot \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right)^2 + \frac{T_d'}{2 \cdot T_k} \left(1 - e^{-2 \cdot T_k / T_d'} \right) \cdot \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right)^2 + \right. \\ & + \frac{T_d'}{5 \cdot T_k} \left(1 - e^{-10 \cdot T_k / T_d'} \right) \cdot \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) + \frac{2 \cdot T_d'}{T_k} \left(1 - e^{-T_k / T_d'} \right) \cdot \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) + \\ & \left. + \frac{T_d'}{5,5 \cdot T_k} \left(1 - e^{-11 \cdot T_k / T_d'} \right) \cdot \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) \cdot \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \right] \quad (6.95) \end{aligned}$$

przy czym:

$$\frac{I_k'}{I_k} = \frac{\frac{I_k''}{I_k}}{0,88 + 0,17 \cdot \frac{I_k''}{I_k}} \quad (6.96)$$

$$T_d' = \frac{3,1}{\frac{I_k'}{I_k}} \quad (6.97)$$

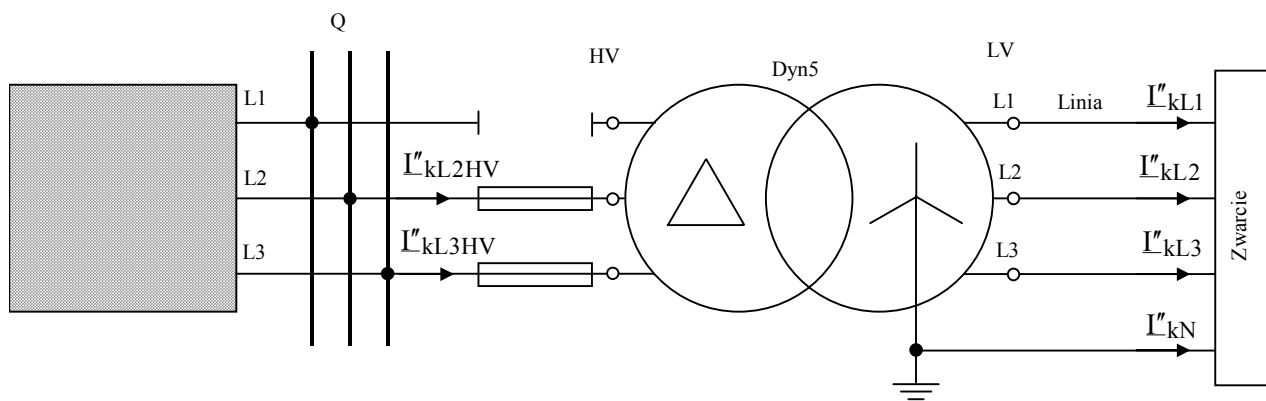
W przypadku stosowania automatyki SPZ o krótkich czasach przerwy beznapięciowej, zastępczy ciepły prąd zwarcia oblicza się ze wzorów:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^n \left(I_{thi}^2 \cdot T_{ki} \right)} \quad (6.98)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (6.99)$$

6.3.12. Zwarcia w sieci niskiego napięcia z jednoczesną przerwą po stronie średniego napięcia

Zwarcia w sieci niskiego napięcia występujące na zaciskach transformatora zasilającego mogą wywołać przepalenie się jednego bezpiecznika po stronie górnego napięcia tego. Wtedy zwarcie po stronie niskiego napięcia transformatora występuje jednocześnie z przerwą w jednej fazie po stronie górnego napięcia transformatora i taka sytuacja jest teraz analizowana i pokazana na rys. 6.16.



Rys. 6.16. Schemat sieci ze zwarcie po stronie niskiego napięcia i z jednoczesną z przerwą w jednej fazie po stronie górnego napięcia transformatora

Tabl. 6.4. Współczynniki α oraz β dla obliczenia prądów zwarciovych występujących po obu stronach transformatora

Zwarcie	Trójfazowe	Dwufazowe doziemne		Jednofazowe
Dotyczy faz	L1, L2, L3 L1, L2, L3, N (E)	L1, L3, N (E)	L1, L2, N (E) L2, L3, N (E)	L2, N (E) ¹⁾
Współczynnik β	0	2	0,5	0,5
Współczynnik α dla strony niskiego napięcia				
I''_{kL1}	0,5	1,5	-	-
I''_{kL2}	1,0	-	1,5	1,5
I''_{kL3}	0,5	1,5	-	-
I''_{kN}	-	3,0	1,5	1,5
Współczynnik α dla strony górnego napięcia				
$I''_{kL2HV} = I''_{kL3HV}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$

¹⁾ W przypadku zwarcia jednofazowego w fazach L1 lub L3 otrzymujemy znikomo małe prądy zwarcia albowiem ogranicza je reaktancja magnesująca transformatora. Przypadki te mogą być pominięte.

Prądy zwarciovie występujące po obu stronach transformatora można obliczyć stosując poniższe równanie:

$$I''_{kv} = \alpha \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Qt} + K_T \cdot Z_T + Z_L + \beta \cdot (K_T \cdot Z_{(0)T} + Z_{(0)L})|} \quad (6.100)$$

gdzie:

- v - faza L1, L2, L3, N (E) po stronie niskiego napięcia lub L2, L3 po stronie wysokiego napięcia,
- Z_{Qt} , Z_T , Z_L - impedancje dla składowej zgodnej sieci zastępczej, transformatora i linii przeliczone na stronę niskiego napięcia transformatora,
- α , β - współczynniki określone w tabl.6.4.

6.3.13. Algorytm obliczania wielkości zwarciovych wg PN-EN 60909-0:2002

W poprzednich rozdziałach podano główne zasady stosowania normy PN-EN 60909-0:2002. Obecnie dla sieci elektroenergetycznej składającej się z sieci zastępczej zasilającej transformator obniżający napięcie, z którego zasilane są silniki asynchroniczne dla zwarcia trójfazowego na zaciskach dolnego napięcia tego transformatora zostanie sformułowany algorytm obliczania wielkości zwarciovych. Algorytm ten jest następujący:

1. Obliczamy impedancje sieci zastępczej Z_Q , X_Q oraz R_Q sprowadzone na poziom dolnego napięcia transformatora.
2. Obliczamy impedancje transformatora Z_T , X_T oraz R_T na poziomie dolnego napięcia transformatora.
3. Obliczamy współczynnik korekcyjny transformatora K_T .
4. Impedancję zespoloną transformatora mnożymy przez współczynnik korekcyjny otrzymując skorygowaną impedancję transformatora.
5. Obliczamy impedancję zwarciovą bez uwzględnienia silników asynchronicznych, w tej sytuacji równą sumie impedancji sieci zastępczej oraz skorygowanej impedancji transformatora.
6. Obliczamy prąd zwarciovą początkowy bez uwzględnienia silników asynchronicznych.
7. Obliczamy sumaryczny prąd znamionowy silników asynchronicznych.
8. Gdy sumaryczny prąd znamionowy silników asynchronicznych jest większy od jednej setnej prądu zwarciovą początkowego bez uwzględnienia silników asynchronicznych to należy uwzględnić silniki w dalszych obliczeniach. Zakładamy, że warunek ten jest spełniony.
9. Obliczamy impedancję silników i włączamy ją do schematu zastępczego zwarcia. W tej sytuacji impedancja zwarciovą z uwzględnieniem silników asynchronicznych będzie połączeniem równoległym impedancji zwarciovą bez uwzględnienia silników asynchronicznych oraz impedancji silników.
10. Obliczamy prąd zwarciovą początkowy z uwzględnieniem silników asynchronicznych.
11. Obliczamy rozptyw prądu zwarciovą początkowego z uwzględnieniem silników asynchronicznych na prąd płynący od sieci i od silników.
12. Obliczamy współczynniki udarowe dla ww. obu źródeł wykorzystując ich stosunki rezystancji do reaktancji.
13. Obliczamy prądy udarowe dla obu źródeł a następnie prąd zwarciovą udarowy jako sumę tych dwóch prądów udarowych składowych.
14. Wyznaczamy współczynniki μ oraz q dla silników asynchronicznych.
15. Obliczamy prądy wyłączeniowy sieci zastępczej równy prądowi zwarciovemu początkowemu.
16. Obliczamy prądy wyłączeniowy płynący od silników równy iloczynowi współczynników μ , q oraz prądowi zwarciovemu początkowemu płynącemu od silników.
17. Prąd wyłączeniowy jest równy sumie tych dwóch prądów wyłączeniowych.
18. W podobny sposób jak wyznaczano prąd wyłączeniowy postępujemy przy obliczaniu prądu zwarciovą cieplnego.

6.4. Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarć doziemnych wg normy PN-EN 60909-3: 2002 (U)

W sieci z izolowanym punktem neutralnym, według normy PN-EN 60909-3: 2002 (U) *Prądy zwarciove w sieciach trójfazowych prądu przemiennego - Część 3: Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarć doziemnych i częściowe prądy zwarciove płynące w ziemi, prąd zwarciovy początkowy podczas zwarcia podwójnego w punktach A i B* wynosi:

$$I''_{kEE} = 3 \cdot \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)A} + Z_{(2)A} + Z_{(1)B} + Z_{(2)B} + \underline{M}_{(1)} + \underline{M}_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (6.101)$$

gdzie:

- $Z_{(1)A}$, $Z_{(2)A}$ -
- $Z_{(1)B}$, $Z_{(2)B}$ -
- $\underline{M}_{(1)}$, $\underline{M}_{(2)}$ -
- $Z_{(0)}$

W przypadku zwarcia odległego

$$I''_{kEE} = 3 \cdot \frac{c \cdot U_n}{|2 \cdot Z_{(1)A} + 2 \cdot Z_{(1)B} + 2 \cdot \underline{M}_{(1)} + Z_{(0)}|} \quad (6.102)$$

Współczynniki $\underline{M}_{(1)}$ oraz $\underline{M}_{(2)}$

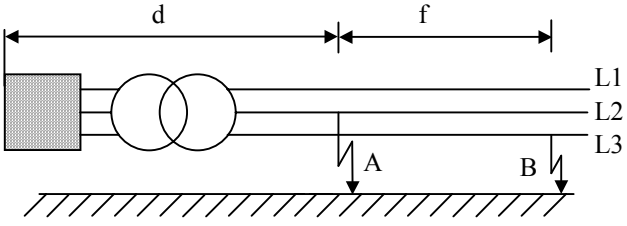
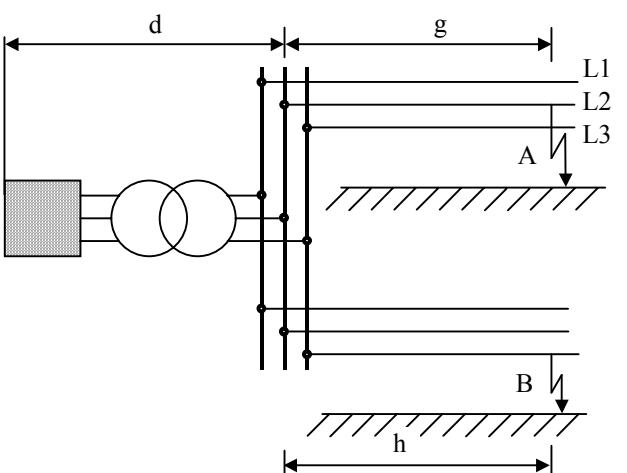
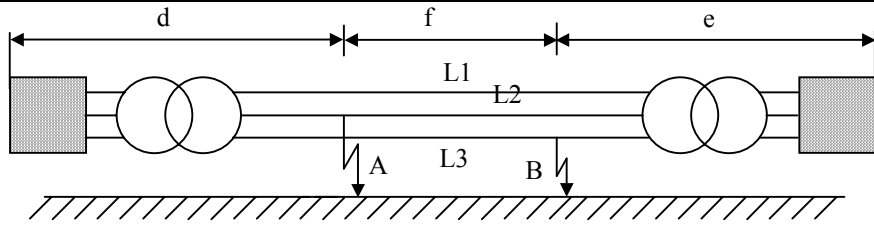
$$\underline{M}_{(1)} = \frac{U_{(1)B}}{I_{(1)A}} \quad (6.103)$$

$$\underline{M}_{(2)} = \frac{U_{(2)B}}{I_{(2)A}} \quad (6.104)$$

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{U_{(1)A}}{I_{(1)B}} \quad (6.105)$$

$$\underline{M}_{(2)} = \frac{U_{(2)A}}{I_{(2)B}} \quad (6.106)$$

Tabl. 6.5. Prądy zwarciove początkowe podczas zwarcia podwójnego w prostych przypadkach

<p>a)</p>	 $I''_{kEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{ 6 \cdot Z_{(1)d} + 2 \cdot Z_{(1)f} + Z_{(0)f} } \quad (6.107)$	
<p>b)</p>	 $I''_{kEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{ 6 \cdot Z_{(1)d} + 2 \cdot (Z_{(1)g} + Z_{(1)h}) + Z_{(0)g} + Z_{(0)h} } \quad (6.108)$	
<p>c)</p>	 $I''_{kEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\left \frac{6 \cdot Z_{(1)d} \cdot Z_{(1)e} + 2 \cdot Z_{(1)f} \cdot (Z_{(1)d} + Z_{(1)e})}{Z_{(1)d} + Z_{(1)f} + Z_{(1)e}} + Z_{(0)e} \right } \quad (6.109)$	

Prąd zwarciovy udarowy i wyłączeniowy

$$i_{pEE} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kEE} \quad (6.110)$$

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \quad (6.111)$$

6.5. Pytania kontrolne

1. Fizyczna interpretacja pojęcia mocy zwarciowej.
2. Podać wzory dla obliczania charakterystycznych wielkości zwarciowych korzystając z prądu zwarciowego początkowego.
3. Sens fizyczny charakterystycznych wielkości prądu zwarciowego.
4. Co to jest prąd zwarciowy udarowy?
5. Jakie założono warunki dla wyznaczania prądu zwarciowego udarowego?
6. Czy prąd zwarciowy udarowy jest większy od prądu zwarciowego początkowego?
7. Dlaczego dla zwarcia odległego prąd zwarciowy cieplny jest większy od prądu zwarciowego początkowego?
8. Czy składowa nieokresowa prądu zwarciowego płynąc przewodnikiem wydziela ciepło?
9. Podać algorytm postępowania przy obliczaniu prądów zwarciowych płynących od silników asynchronicznych.
10. Podać algorytm postępowania przy obliczaniu charakterystycznych wielkości prądów zwarciowych wg. metody PN-74/E-05002.
11. Podać przypadek, kiedy w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym przy doborze aparatury ze względu na działanie cieplne prądu zwarciowego należy uwzględnić zwarcie dwufazowe a nie trójfazowe.

6.6. Zadania

6.6.1. Zadania wykonane zgodnie z normą PN-74/E-05002

6.6.1.1. Zadanie 1

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na rys. 6.18. Dane znamionowe elementów sieci:

$$\text{UE: } S_Z=2500 \text{ MVA}; \quad \frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} = 0.9; \quad \sum S_{NG} = 20000 \text{ MVA}$$

$$\text{T1: } S_N=50 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{110 \text{ kV}}{6.3 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%}=11 \%;$$

$$\text{G: } U_N=6.3 \text{ kV}; \quad S_N=25 \text{ MVA}; \quad X''_{d\%} = 12 \%;$$

$$\text{T2: } S_N=25 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{6 \text{ kV}}{3 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%}=7 \%;$$

$$\text{M1: } P_N=7 \text{ MW}; \quad U_N=6 \text{ kV}; \quad k_r=5.8;$$

$$\cos\varphi_N=0.91; \quad \eta_N=0.95;$$

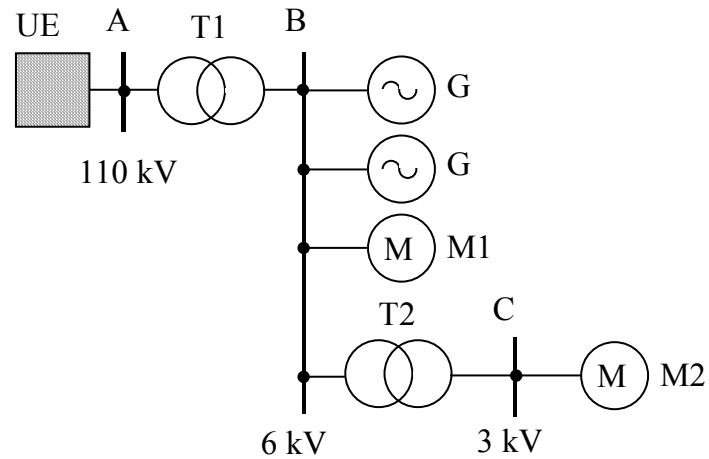
$$\text{M2: } P_N=15 \text{ MW}; \quad U_N=3 \text{ kV}; \quad k_r=5.4;$$

$$\cos\varphi_N=0.92; \quad \eta_N=0.96;$$

Dla zwarcia trójfazowego na szynach B obliczyć:

1. prąd zwarciowy początkowy,
2. moc zwarciową,
3. prąd zwarciowy udarowy,
4. prąd wyłączeniowy symetryczny dla $t_r=0.05 \text{ s}$,
5. prąd wyłączeniowy niesymetryczny dla $t_r=0.05 \text{ s}$,
6. prąd zastępczy zwarciowy cieplny dla $t_z=0.1 \text{ s}$.

Obliczenia wykonać stosując metodę ogólnego oraz indywidualnego zanikania.



Rys. 6.24. Schemat sieci

Rozwiązanie

- 1) Przyjmujemy moc podstawową $S_{pod} = 50$ MVA.
- 2) Obliczenie impedancji elementów dla składowej zgodnej

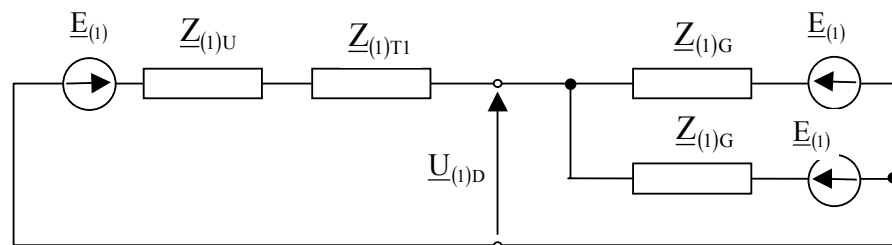
$$X_{(1)G} = \frac{X''_{d\%}}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NG}} = \frac{12}{100} \frac{50}{25} = 0.24$$

$$X_{(1)T1} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NT1}} = \frac{11}{100} \frac{50}{50} = 0.11$$

$$X_{(1)T2} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NT2}} = \frac{7}{100} \frac{50}{25} = 0.14$$

$$X_{(1)U} = \frac{S_{pod}}{S_Z} = \frac{50}{2500} = 0.020$$

- 3) Schemat zastępczy dla składowej zgodnej



Rys. 6.24. Schemat zastępczy sieci dla składowej zgodnej

- 4) Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zgodnej

$$X_{(1)B} = \frac{\frac{1}{2} X_{(1)G} (X_{(1)U} + X_{(1)T1})}{\frac{1}{2} X_{(1)G} + X_{(1)U} + X_{(1)T1}} = \frac{0.12 \cdot (0.02 + 0.11)}{0.12 + 0.02 + 0.11} = 0.0624$$

- 5) Obliczenie prądu w miejsc zwarcia

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{j X_{(1)}} = \frac{1.05}{j 0.0624} = -j 16.8$$

$$\underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = 0$$

$$I_{\text{pod}} = \frac{S_{\text{pod}}}{\sqrt{3} U_{\text{pod}}} = \frac{50}{\sqrt{3} (1.05 \cdot 6)} = 4.58 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(1)} = -j 16.8 \cdot 4.58 = -j 76.9 \text{ kA}$$

$$I_P = m I_{(1)} = 1 \cdot 76.9 = 76.9 \text{ kA}$$

- 6) Moc zwarciowa

$$S_Z = \sqrt{3} U_N I_P = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 76.9 = 800 \text{ MVA}$$

- 7) Prąd zwarciowy udarowy

$$i_U = \sqrt{2} k_U I_P = \sqrt{2} \cdot 1.8 \cdot 76.9 = 196 \text{ kA}$$

- 8) Metoda ogólnego zanikania, prąd wyłączeniowy symetryczny

$$I_N = \frac{\sum S_{NG}}{\sqrt{3} U_N} = \frac{20000 + 2 \cdot 25}{\sqrt{3} \cdot 6} = 1930 \text{ kA}$$

$$\frac{I_{(1)}}{I_N} = \frac{76.9}{1930} = 0.0398$$

Dla

$$t_r = 0.05 \text{ s} \quad \frac{I_{(1)}}{I_N} = 0.0398 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_w = 1.$$

$$I_{WS} = k_w I_P = 1 \cdot 76.9 = 76.9 \text{ kA}$$

- 9) Metoda ogólnego zanikania, prąd wyłączeniowy niesymetryczny

Dla

$$t_r=0.05 \text{ s} \quad \frac{R}{X} = 0.05 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_a=0.47.$$

$$i_{\text{nok}} = \sqrt{2} k_a I_P = \sqrt{2} \cdot 0.47 \cdot 76.9 = 51.1 \text{ kA}$$

$$I_{\text{WNS}} = \sqrt{(I_{\text{WS}})^2 + (i_{\text{nok}})^2} = \sqrt{76.9^2 + 51.1^2} = 92.3 \text{ kA}$$

- 10) Metoda ogólnego zanikania, prąd zastępczy cieplny

Dla

$$t_z=0.1 \text{ s} \quad \frac{I_{(1)}}{I_N} = 0.0398 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_c=1.225.$$

$$I_{\text{tz}} = k_c I_P = 1.225 \cdot 76.9 = 94.2 \text{ kA}$$

- 11) Sprawdzenie czy należy uwzględnić w obliczeniach silnik M2

Silniki asynchroniczne przyłączone do tej sieci przez transformator należy uważać za źródła prądu zwarciovego, jeżeli suma ich mocy znamionowej P_N spełnia nierówność:

$$P_{\text{NM}} > \frac{S_{\text{NT}}}{120 \frac{S_{\text{NT}}}{S_Z} - 0.4}$$

czyli

$$P_{\text{NM}} = 15 \text{ MW} > \frac{S_{\text{NT}}}{120 \frac{S_{\text{NT}}}{S_Z} - 0.4} = \frac{25}{120 \frac{25}{800} - 0.4} = 7.47 \text{ MVA}$$

Warunek powyższy jest spełniony a więc uwzględniamy w obliczeniach nie tylko silnik M1, ale także silnik M2.

- 12) Obliczenia wstępne podczas uwzględniania silników asynchronicznych w obliczeniach zwarciovych

- a) Prąd znamionowy silnika M1

$$I_{\text{NM1}} = \frac{P_{\text{NM1}}}{\sqrt{3} U_{\text{NM1}} \cos \varphi_{\text{NM1}} \eta_{\text{NM1}}} = \frac{7}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0.91 \cdot 0.95} = 779 \text{ A}$$

- b) Prąd znamionowy silnika M2 przeliczony na napięcie 6 kV

$$I_{NM2} = \frac{P_{NM2}}{\sqrt{3} U_{NM2} \cos \varphi_{NM2} \eta_{NM2} \vartheta_{T2}} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot 0.92 \cdot 0.96 \cdot 2} = 1630 \text{ A}$$

c) Współczynnik uwzględniający zwarcie silnika M2 przez transformator T2

$$X_{M2} = \frac{1}{k_{rM2}} \frac{S_{\text{pod}}}{S_{NM2}} = \frac{1}{k_{rM2}} \frac{S_{\text{pod}}}{\frac{P_{NM2}}{\cos \varphi_{NM2} \eta_{NM2}}} = \frac{1}{5.4} \frac{50}{\frac{15}{0.92 \cdot 0.96}} = 0.545$$

$$c_{M2} = \frac{X_{M2}}{X_{M2} + X_{T2}} = \frac{0.545}{0.545 + 0.14} = 0.796$$

13) Prąd zwarciovowy udarowy z uwzględnieniem silników asynchronicznych

$$\Delta i_{UM1} = \sqrt{2} k_{UM} k_{rM1} I_{NM1} = \sqrt{2} \cdot 1.7 \cdot 5.8 \cdot 779 = 10.9 \text{ kA}$$

$$\Delta i_{UM2} = \sqrt{2} k_{UM} k_{rM2} I_{NM2} c_{M2} = \sqrt{2} \cdot 1.7 \cdot 5.4 \cdot 1630 \cdot 0.796 = 16.8 \text{ kA}$$

$$i_{UM} = i_U + \Delta i_{UM1} + \Delta i_{UM2} = 196 + 10.9 + 16.8 = 224 \text{ kA}$$

14) Metoda ogólnego zanikania, prąd wyłączeniowy symetryczny z uwzględnieniem silników asynchronicznych

Dla $t_r=0.05$ s z wykresu odczytujemy, że $k_{WM}=2.2$.

$$\Delta I_{WSM1} = k_{WM} I_{NM1} = 2.2 \cdot 779 = 1.71 \text{ kA}$$

$$\Delta I_{WSM2} = k_{WM} I_{NM2} c_{M2} = 2.2 \cdot 1630 \cdot 0.796 = 2.86 \text{ kA}$$

$$I_{WSM} = I_{WS} + \Delta I_{WSM1} + \Delta I_{WSM2} = 76.9 + 1.71 + 2.86 = 81.5 \text{ kA}$$

15) Metoda ogólnego zanikania, prąd wyłączeniowy niesymetryczny z uwzględnieniem silników asynchronicznych

Dla $t_r=0.05$ s z wykresu odczytujemy, że $k_{aM}=2.5$.

$$\Delta i_{\text{nok}M1} = k_{aM} I_{NM1} = 2.5 \cdot 779 = 1.95 \text{ kA}$$

$$\Delta i_{\text{nok}M2} = k_{aM} I_{NM2} c_{M2} = 2.5 \cdot 1630 \cdot 0.796 = 3.25 \text{ kA}$$

$$I_{WNSM} = \sqrt{(I_{WSM})^2 + (i_{\text{nok}} + \Delta i_{\text{nok}M1} + \Delta i_{\text{nok}M2})^2} = \\ = \sqrt{81.5^2 + (51.1 + 1.95 + 3.25)^2} = 99.1 \text{ kA}$$

- 16) Metoda ogólnego zanikania, prąd zastępczy cieplny z uwzględnieniem silników asynchronicznych

Dla $t_z=0.1$ s z wykresu odczytujemy, że $k_{CM}=4.3$.

$$\Delta I_{tzM1} = k_{CM} I_{NM1} = 4.3 \cdot 779 = 3.35 \text{ kA}$$

$$\Delta I_{tzM2} = k_{CM} I_{NM2} = 4.3 \cdot 1630 = 5.59 \text{ kA}$$

$$I_{tzM} = I_{tz} + \Delta I_{tzM1} + \Delta I_{tzM2} = 94.2 + 3.35 + 5.59 = 103 \text{ kA}$$

- 17) Metoda indywidualnego zanikania, prądy początkowe od poszczególnych grup źródeł

Dzielimy źródła istniejące w rozpatrywanej sieci na dwie grupy. Do grupy pierwszej zaliczamy układ zasilający – grupa o nazwie A, do drugiej grupy dwa generatory – grupa B.

$$I_{(1)A} = I_{(1)} \frac{\frac{1}{2} X_{(1)G}}{\frac{1}{2} X_{(1)G} + X_{(1)U} + X_{(1)T1}} = 76.9 \frac{0.12}{0.12 + 0.02 + 0.11} = 36.9 \text{ kA}$$

$$I_{(1)B} = I_{(1)} \frac{X_{(1)U} + X_{(1)T1}}{\frac{1}{2} X_{(1)G} + X_{(1)U} + X_{(1)T1}} = 76.9 \frac{0.02 + 0.11}{0.12 + 0.02 + 0.11} = 40.0 \text{ kA}$$

- 18) Metoda indywidualnego zanikania, prąd wyłączeniowy symetryczny

$$I_{NA} = \frac{\sum S_{NGA}}{\sqrt{3} U_N} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 1920 \text{ kA}$$

$$\frac{I_{(1)A}}{I_{NA}} = \frac{36.9}{1920} = 0.0192$$

$$I_{NB} = \frac{\sum S_{NGB}}{\sqrt{3} U_N} = \frac{2 \cdot 25}{\sqrt{3} \cdot 6} = 4.81 \text{ kA}$$

$$\frac{I_{(1)B}}{I_{NB}} = \frac{40.0}{4.81} = 8.32$$

Dla

$$t_r=0.05 \text{ s} \quad \frac{I_{(1)A}}{I_{NA}} = 0.0192 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_{wA}=1.$$

$$t_r=0.05 \text{ s} \quad \frac{I_{(1)B}}{I_{NB}} = 8.32 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_{wB}=0.81.$$

$$I_{WSA} = k_{WA} I_{PA} = 1 \cdot 36.9 = 36.9 \text{ kA}$$

$$I_{WSB} = k_{WB} I_{PB} = 0.81 \cdot 40.0 = 32.4 \text{ kA}$$

$$I_{WS} = I_{WSA} + I_{WSB} = 36.9 + 32.4 = 69.3 \text{ kA}$$

Różnica między metodą ogólnego i indywidualnego zanikania wynosi 11 %.

- 19) Metoda indywidualnego zanikania, prąd wyłączeniowy niesymetryczny

Prąd nieokresowy nie ulega zmianie, w więc:

$$I_{WNS} = \sqrt{(I_{WS})^2 + (i_{nok})^2} = \sqrt{69.3^2 + 51.1^2} = 86.1 \text{ kA}$$

- 20) Metoda indywidualnego zanikania, prąd zastępczy cieplny

Dla

$$t_z=0.1 \text{ s} \quad \frac{I_{(1)A}}{I_{NA}} = 0.0192 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_{cA}=1.225.$$

$$t_z=0.1 \text{ s} \quad \frac{I_{(1)B}}{I_{NB}} = 8.32 \quad \text{z wykresu odczytujemy, że } k_{cB}=1.12.$$

$$I_{tzA} = k_{cA} I_{PA} = 1.225 \cdot 36.9 = 45.2 \text{ kA}$$

$$I_{tzB} = k_{cB} I_{PB} = 1.12 \cdot 40.0 = 44.8 \text{ kA}$$

$$I_{tz} = I_{tzA} + I_{tzB} = 45.2 + 44.8 = 90.0 \text{ kA}$$

- 21) Metoda indywidualnego zanikania, prąd wyłączeniowy symetryczny z uwzględnieniem silników asynchronicznych

$$I_{WSM} = I_{WS} + \Delta I_{WSM1} + \Delta I_{WSM2} = 69.3 + 1.71 + 2.86 = 73.9 \text{ kA}$$

- 22) Metoda indywidualnego zanikania, prąd wyłączeniowy niesymetryczny z uwzględnieniem silników asynchronicznych

$$\begin{aligned} I_{WNSM} &= \sqrt{(I_{WSM})^2 + (i_{nok} + \Delta i_{nokM1} + \Delta i_{nokM2})^2} = \\ &= \sqrt{73.9^2 + (51.1 + 1.95 + 3.25)^2} = 92.9 \text{ kA} \end{aligned}$$

- 23) Metoda indywidualnego zanikania, prąd zastępczy cieplny z uwzględnieniem silników asynchronicznych

$$I_{tzM} = I_{tz} + \Delta I_{tzM1} + \Delta I_{tzM2} = 90.0 + 3.35 + 5.59 = 98.9 \text{ kA}$$

6.6.2. Zadania wykonane zgodnie z normą PN-EN 60909-0

6.6.2.1. Zadanie 2

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na rys. 6.10 (identyczna sieć jak ta z rys. 6.8). Dane znamionowe elementów sieci:

UE: $S_{kQ}'' = 2500 \text{ MVA}$;

T1: $S_{rT1} = 50 \text{ MVA}$; $\vartheta = \frac{110 \text{ kV}}{6.3 \text{ kV}}$: $\Delta u_{krT1} = 11\%$;

G: $U_{rG} = 6,3 \text{ kV}$; $S_{rG} = 25 \text{ MVA}$; $X_{d\%}'' = 12\%$; $X_{d\%} = 180\%$;

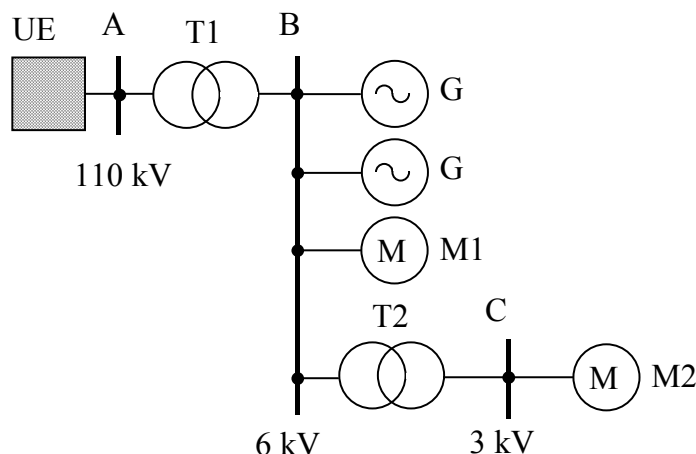
T2: $S_{rT2} = 25 \text{ MVA}$; $\vartheta = \frac{6 \text{ kV}}{3 \text{ kV}}$: $\Delta u_{krT2} = 7\%$;

M1: $P_{rM1} = 7 \text{ MW}$; $U_{rM1} = 6,0 \text{ kV}$; $k_{rM1} = 5,8$;
 $\cos \varphi_{rM1} = 0,91$; $\eta_{rM1} = 0,95$; $p_{M1} = 1$;

M2: $P_{rM2} = 15 \text{ MW}$; $U_{rM2} = 3,0 \text{ kV}$; $k_{rM2} = 5,4$;
 $\cos \varphi_{rM2} = 0,92$; $\eta_{rM2} = 0,96$; $p_{M2} = 1$;

Dla zwarcia trójfazowego na szynach B obliczyć:

- prąd zwarciaowy początkowy,
- prąd zwarciaowy udarowy,
- prąd wyłączeniowy symetryczny dla $t_{\min} = 0.05 \text{ s}$,
- prąd zwarciaowy cieplny dla $T_k = 0.1 \text{ s}$.



Rys. 6.10. Schemat sieci

Rozwiązanie

19. Obliczenie impedancji elementów dla składowej zgodnej

$$X_{dG}'' = \frac{X_{d\%}''}{100} \cdot \frac{(U_{rG})^2}{S_{rG}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{6,3^2}{25} = 0,1905 \quad \Omega$$

$$R_G = 0,07 \cdot X_{dG}'' = 0,07 \cdot 0,1905 = 0,01334 \quad \Omega$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} = \frac{6}{6,3} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,12 \cdot 0,8} = 0,9559$$

$$Z_{GK} = K_G \cdot (R_G + j \cdot X_{dG}'') = 0,9559 \cdot (0,01334 + j \cdot 0,1905) = (0,01275 + j \cdot 0,1821) \quad \Omega$$

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot (U_{nQ})^2}{S_{kQ}''} \cdot \frac{1}{(t_{rT1})^2} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{2500} \cdot \frac{6,3^2}{110^2} = 0,01746 \quad \Omega$$

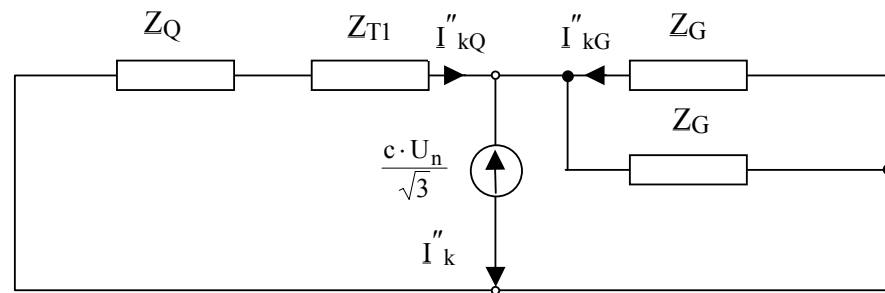
$$Z_{Qt} = j \cdot 0,01746 \quad \Omega$$

$$X_{T1} = \frac{u_{krT1} (U_{rT})^2}{100 S_{rT1}} = \frac{11}{100} \frac{6,3^2}{50} = 0,08732 \quad \Omega$$

$$K_{T1} = \frac{0,95 \cdot c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{T1}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,11} = 0,9803$$

$$Z_{TIK} = K_T \cdot (R_{T1} + j \cdot X_{T1}) = 0,99803 \cdot (0,0 + j \cdot 0,08732) = (0,0 + j \cdot 0,08560) \quad \Omega$$

20. Schemat zastępczy dla składowej zgodnej dla obliczenia prądu I''_{kM}



Rys. 6.11. Schemat zastępczy sieci dla składowej zgodnej dla obliczenia prądu I''_{kM}

21. Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zgodnej dla obliczenia prądu I''_{kM}

$$\begin{aligned} Z_k &= \frac{\frac{1}{2} Z_{GK} (j \cdot X_{Qt} + j \cdot X_{TIK})}{\frac{1}{2} Z_{GK} + j \cdot X_{Qt} + j \cdot X_{TIK}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (0,01275 + j \cdot 0,1821) \cdot j \cdot (0,01746 + 0,0856)}{\frac{1}{2} \cdot (0,01275 + j \cdot 0,1821) + j \cdot 0,01746 + j \cdot 0,0856} = \\ &= (0,00179 + j \cdot 0,0484) \quad \Omega \end{aligned}$$

22. Obliczenie prądu I''_{k3M} w miejsc zwarcia

$$I''_{k3M} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,00179^2 + 0,0848^2}} = 78,7 \quad \text{kA}$$

Stosując metodę z PNE-05002 otrzymano $I_{P-PNE-05002} = 76,9 \text{ kA}$. Według omawianej metody mamy wynik o 2,3% większy.

23. Sprawdzenie warunku dla silników M1

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I''_{kM}$$

$$I_{rM1} = \frac{P_{rM1}}{\sqrt{3} \cdot U_{rM1} \cdot \cos \varphi_{rM1} \cdot \eta_{rM1}} = \frac{7}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,91 \cdot 0,95} = 779 \text{ A}$$

$$I_{rM1} = 779 \text{ A} \quad \text{a drugi składnik wynosi} \quad 0,01 \cdot I''_{kM} = 0,01 \cdot 78700 = 787 \text{ A}$$

Silnik M1 należy pominąć w dalszych obliczeniach.

24. Sprawdzenie warunku dla silników M2

$$\frac{\sum P_{rM2}}{\sum S_{rT2}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{100 \cdot c \cdot \sum S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I''_{kQ}} - 0,3 \right|}$$

$$\frac{15}{25} = 0,6 \leq \frac{0,8}{\left| \frac{100 \cdot 1,1 \cdot 25}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 78,7} - 0,3 \right|} = 0,261$$

Silnik M2 należy uwzględnić w obliczeniach.

25. Obliczenie impedancji transformatora T2 i silnika M2

$$X_{T2} = \frac{u_{krT2}}{100} \cdot \frac{(U_{rT2})^2}{S_{rT2}} = \frac{7}{100} \cdot \frac{6,0^2}{25} = 0,1008 \quad \Omega$$

$$K_{T2} = \frac{0,95 \cdot c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot X_{T2}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,07} = 1,003$$

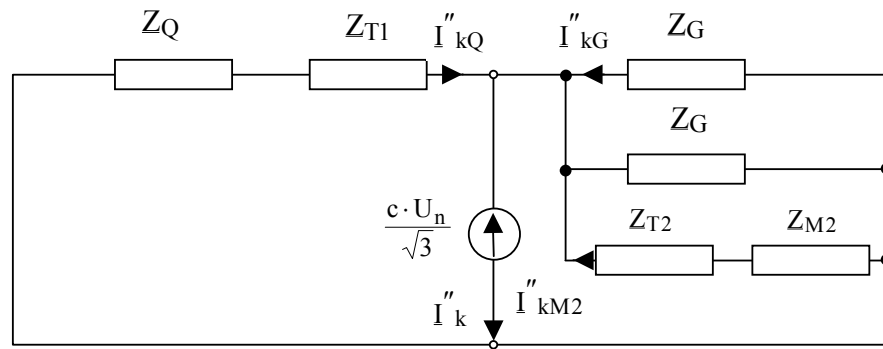
$$Z_{T2K} = K_{T2} \cdot (R_{T2} + j \cdot X_{T2}) = 1,003 \cdot (0,0 + j \cdot 0,1008) = (0,0 + j \cdot 0,1011) \quad \Omega$$

$$Z_{M2} = \frac{1}{\frac{I_{LR2}}{I_{rM2}}} \cdot \frac{U_{rM2}^2}{\frac{P_{rM2}}{\eta_{rM2} \cdot \cos \varphi_{rM2}}} = \frac{1}{5,4} \cdot \frac{6^2}{0,92 \cdot 0,96} = 0,3925 \quad \Omega$$

$$Z_{M2} = (0,0995 + j \cdot 0,995) \cdot 0,3925 = (0,03906 + j \cdot 0,3905) \quad \Omega$$

$$\underline{Z}_{T2M2} = \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{M2} = j \cdot 0,1011 + 0,03906 + j \cdot 0,3905 = (0,03906 + j \cdot 0,4917) \quad \Omega$$

26. Schemat zastępczy dla składowej zgodnej



Rys. 6.12. Schemat zastępczy sieci dla składowej zgodnej

27. Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zgodnej

$$Z_{kM2} = \frac{Z_k \cdot Z_{T2M2}}{Z_k + Z_{T2M2}} = \frac{(0,00179 + j \cdot 0,0484) \cdot (0,03906 + j \cdot 0,4917)}{0,00179 + j \cdot 0,0484 + 0,03906 + j \cdot 0,4917} = (0,0018 + j0,04407) \Omega$$

28. Obliczenie prądu zwarciowego początkowego I''_k w miejsc zwarcia

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0018^2 + 0,04407^2}} = 86,4 \text{ kA}$$

29. Obliczenie prądu zwarciowego początkowego płynącego z sieci, generatora silnika M2

$$I''_{k3Q} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (X_{Qt} + X_{TIK})} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot (0,01746 + 0,0856)} = 37,0 \text{ kA}$$

$$I''_{k3G} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{kG}^2 + X_{kG}^2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,01275^2 + 0,1821^2}} = 20,9 \text{ kA}$$

$$I''_{k3M2} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{kT2M2}^2 + X_{kT2M2}^2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,03906^2 + 0,4917^2}} = 7,73 \text{ kA}$$

30. Prąd zwarciowy udarowy

$$i_{pQ} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3Q} = \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_{Qt}}{X_{Qt}}} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3Q} = \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,0}{0,1031}} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot 37,0 = 105 \text{ kA}$$

$$i_{pG} = \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_G}{X_G}} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3G} = \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,01275}{0,1821}} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot 20,9 = 53,6 \text{ kA}$$

$$i_{pM2} = \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_{T2M2}}{X_{T2M2}}} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3M2} = \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,03906}{0,4917}} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot 7,73 = 19,6 \text{ kA}$$

$$i_p = i_{pQ} + i_{pG} + i_{pM} = 105 + 53,6 + 53,6 + 19,6 = 231 \text{ kA}$$

Prąd zwarciovyy udarowy z metody PNE-05002 był $i_{U \text{ PNE-05002}} = 224 \text{ kA}$, czyli o 3% większy jest ten prąd. Prąd zwarciovyy udarowy bez udziału silników będzie:

$$i_{pM} = i_{pQ} + i_{pG} + i_{pM} = 105 + 53,6 + 53,6 = 211 \text{ kA}$$

31. Prąd wyłączeniowy symetryczny dla $t_{\min}=0,05 \text{ s}$

W rozpatrywanym przypadku wzór (6.52) można uprościć do postaci:

$$I_b = I''_k - 2 \cdot (1 - \mu_G) \cdot I''_{kG} - (1 - \mu_{M2} \cdot q_{M2}) \cdot I''_{kM2} \cdot \frac{Z_{M2} \cdot I''_{kM2}}{c \cdot U_n \sqrt{3}}$$

$$I_{rG} = \frac{S_{rG}}{\sqrt{3} \cdot U_{rG}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 2,291 \text{ kA}$$

$$\frac{I''_{kG}}{I_{rG}} = \frac{20,9}{2,291} = 9,12$$

$$\mu_G = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot \frac{20,9}{2,291}} = 0,743$$

$$I_{rM2} = \frac{P_{rM2}}{\sqrt{3} \cdot U_{rM2} \cdot \eta_{rM2} \cdot \cos \varphi_{rM2}} \cdot \frac{U_{rT2LV}}{U_{rT2HV}} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot 0,96 \cdot 0,92} \cdot \frac{3}{6} = 1,634 \text{ kA}$$

$$\mu_{M2} = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot \frac{I''_{kM2}}{I_{rM2}}} = 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot \frac{7,726}{1,634}} = 0,833$$

Dla $P_{rM2} = 15 \text{ MW}$ i $p=1$, czyli $\frac{P_{rM2}}{p} = 15 \text{ MW}$ z rys. 6.4 mamy, że $q_{M2} = 1$

$$I_b = 86,4 - 2 \cdot (1 - 0,743) \cdot 20,9 - (1 - 0,833 \cdot 1) \cdot 7,73 \cdot \frac{7,73 \cdot 0,3924}{1,1 \cdot 6 \sqrt{3}} = 74,7 \text{ kA}$$

Z metody PNE-05002 otrzymano $I_{ws \text{ PNE-05002}} = 73,9 \text{ kA}$, czyli różnica około 1,07%.

32. Prąd zwarciovyy cieplny dla $T_k=0,1 \text{ s}$

W oparciu o wzór (6.57) dla sieci z kilkoma źródłami można zapisać, że zastępczy prąd zwarcioowy cieplny wyraża się zależnością (taka zależność w rozpatrywanej normie nie występuje):

$$I_{th} = I_{thQ} + 2 \cdot I_{thG} + I_{thM2}$$

gdzie przykładowo mamy:

$$I_{thQ} = I''_{kQ} \cdot \sqrt{m_Q + n_Q}$$

a) Obliczenia dla sieci zastępczej.

Dla sieci zastępczej $n_Q = 1$. Przyjmuję, że $\frac{R_{Qt}}{X_{Qt}} = 0,0995$ i obliczamy współczynnik κ_Q z wzoru (6.34):

$$\kappa_Q = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot 0,0995} = 1,75$$

Współczynnik m_Q z wzoru (6.59):

$$m_Q = \frac{e^{4 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,75-1)} - 1}{2 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,75-1)} = 0,342$$

$$I_{thQ} = 37,0 \cdot \sqrt{0,342 + 1} = 42,8 \text{ kA}$$

b) Obliczenia dla generatora

$$\kappa_G = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,01275}{0,1821}} = 1,81$$

$$m_G = \frac{e^{4 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,81-1)} - 1}{2 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,81-1)} = 0,479$$

Dla $X_d = 180\%$ oraz $\frac{I''_{kG}}{I_{rG}} = \frac{20,9}{2,291} = 9,12$ z rys. 6.5b) odczytujemy, że $\lambda_{max} = 2,3$. Prąd zwarcioowy ustalony generatora wynosi:

$$I_{kG} = \lambda_{max} \cdot I_{rG} = 2,3 \cdot 2,291 = 5,27 \text{ kA}$$

Z wykresu na rys. 6.8 lub z wzorów od (6.61) do (6.63) obliczamy współczynnik n_G pamiętając, że $\frac{I''_{kG}}{I_{kG}} = \frac{20,9}{5,27} = 3,96$ oraz $T_k = 0,1 \text{ s}$ mamy:

$$n_G = 0,763$$

$$I_{thG} = 20,9 \cdot \sqrt{0,479 + 0,763} = 23,3 \text{ kA}$$

c) Obliczenia dla silnika

$$\kappa_{M2} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,03906}{0,4917}} = 1,79$$

$$m_{M2} = \frac{e^{4 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,79-1)} - 1}{2 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,79-1)} = 0,425$$

Współczynnik $n_{M2} = 0$ albowiem prąd zwarciový ustalony silnika jest równy zeru.

$$I_{thM2} = 7,73 \cdot \sqrt{0,425 + 0} = 5,04 \text{ kA}$$

d) Prąd zwarciový ciepły dla $T_k=0,1 \text{ s}$

$$I_{th} = 42,8 + 2 \cdot 23,3 + 5,04 = 94,4 \text{ kA}$$

Prąd zwarciový ciepły wyznaczony za pomocą PNE-05002 wynosił $I_{tz \text{ PNE-05002}} = 98,9 \text{ kA}$.

Prąd zwarciový ciepły możemy wyznaczyć także nie stosując metody nazwanej w literaturze polskiej "metodą indywidualnego zanikania". W tej sytuacji prąd zwarciový ciepły oblicza się z wzoru:

$$I_{th} = I_{k3}'' \cdot \sqrt{m_c + n_c}$$

Dla sieci zastępczej $n_c = 1$. Obliczamy współczynnik κ_c z wzoru (6.37):

$$\kappa_c = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,0018}{0,04407}} = 1,89$$

Współczynnik m_c z wzoru (6.59) wynosi:

$$m_c = \frac{e^{4 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,89-1)} - 1}{2 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot \ln(1,89-1)} = 0,758$$

$$I_{th} = 86,4 \cdot \sqrt{0,758 + 1} = 115 \text{ kA}$$

Otrzymana wartość wydaje się zbyt duża albowiem prąd zwarciový ciepły wyznaczony za pomocą PNE-05002 metodą ogólnego zanikania wynosił tylko $I_{tz \text{ PNE-05002}} = 103 \text{ kA}$.