

Opierając się na wyżej wyliczonych danych wyznaczono schemat zastępczy przedstawiony na rys.2.30.

Po czasie $t_z = \frac{3\pi}{4\omega}$ (rys.2.30b) napięcie między stykami wyłącznika wynosi $U_{aa'} = U_m + U_m \sin 45^\circ = 1,71 U_m$. Po zapłonie napięcie pojemności C oscyluje wokół osi oscylacji o wartości $0,71 U_m$. Maksymalne napięcie względem ziemi jakie wystąpi na pojemności wyniesie

$$U_m = 0,71 U_m + 1,71 U_m = 2,42 U_m.$$

Pulsacja drgań własnych obwodu po zapłonie wynosi

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{L(C+C)}} = \sqrt{\frac{1}{4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3,18 \cdot 10^{-6}}} = 815 \frac{1}{s},$$

$$a \quad f_o = \frac{815}{2\pi} = 132 \text{ Hz.}$$

R o z d z i a ł 3

DOBÓR APARATÓW ELEKTRYCZNYCH DO OBCIĄŻENIOWYCH ZWYKŁYCH I ZWARCIOWYCH WARUNKÓW PRACY

3.1. Uwagi ogólne

Warunkiem niezbędnym dla prawidłowej pracy aparatów elektrycznych w układach elektroenergetycznych jest ich właściwy dobór do określonych warunków pracy. Cechy techniczne aparatów określane są przy pomocy tzw. parametrów znamionowych przypisywanych określonemu typowi aparatu. Prawidłowy dobór polega na wyznaczeniu wymagań określonych w miejscu zainstalowania dobieranego aparatu i wybrania typu aparatu o parametrach znamionowych większych lub co najmniej równych tym wymaga-

niom^{x)}. Przy doborze konieczne jest uwzględnienie zarówno obciążeniowych zwykłych warunków pracy, jak i warunków zakłóceńowych. Parametry charakteryzujące poszczególne rodzaje aparatów wysokiego napięcia w obu powyższych warunkach pracy zestawiono w tablicy 10.

3.2. Zasady doboru do obciążeniowych zwykłych warunków pracy

W obciążeniowych zwykłych warunkach pracy wszystkie aparaty elektryczne charakteryzowane są przy pomocy napięcia znamionowego izolacji U_{ni} oraz znamionowego prądu ciągłego (I_n).

Dobór znamionowego napięcia izolacji ma właściwie charakter formalny, napięcie znamionowe izolacji aparatu przyjmuje się zazwyczaj równe, a czasem większe od napięcia znamionowego układu, w którym ma być on zainstalowany. Dodatkowo konieczne jest określenie pewnych wymagań specjalnych dotyczących warunków środowiskowych wywierających wpływ na pracę izolacji aparatu takich jak:

a) miejsce zainstalowania - odróżnia się tu wykonanie wewnętrzne i napowietrzne,

b) wysokość miejsca zainstalowania nad poziomem morza - wykonanie normalne obejmuje wysokości do 1000 m,

c) charakterystyka atmosfery pod względem zanieczyszczeń - odróżnia się wykonanie normalne i przeciwzabrudzeniowe.

Wartość znamionowego prądu ciągłego określa się na podstawie prądu obciążenia układu i przyjmuje się najbliższą większą wartość znormalizowaną. Prąd obciążenia określa się z mocy obciążenia w miejscu zainstalowania aparatu, lub z mocy najbliższego transformatora, albo w przypadku kiedy aparat zainstalowany jest w bezpośrednim sąsiedztwie źródła z mocy generatora zasilającego.

^{x)} Poza tym w ramach doboru ustala się również typ konstrukcji aparatu. Dobór typu konstrukcji ustalany jest zazwyczaj według bardziej ogólnych przesłanek jak np. przyjęte rozwiązania konstrukcji całego układu elektroenergetycznego, względów ekonomicznych itp. i w związku z tym nie będzie tu rozpatrywany.

Tablica 10

Zestawienie parametrów znamionowych aparatów

Rodzaj aparatu	Odłączniki	Wyłączniki	Bezpieczniki	Przekładniki prądowe
Warunki pracy obciążeniowej zwykłej	1. Znamionowe napięcie izolacji 2. Znamionowy prąd ciągły	1. Znamionowe napięcie izolacji 2. Znamionowy prąd ciągły	1. Znamionowe napięcie izolacji 2. Znamionowy prąd ciągły	1. Znamionowe napięcie izolacji 2. Znamionowy prąd ciągły
Warunki pracy zwarciowej	3. Znamionowy prąd udarowy 4. Znamionowy prąd krótkotrwały	3. Znamionowy prąd załączalny 4. Znamionowy prąd krótkotrwały 5. Znamionowy prąd wyłączalny 6. Znamionowa moc wyłączalna 7. Znamionowe napięcie łączeniowe	3. Znamionowy prąd wyłączalny 4. Znamionowa moc wyłączalna 5. Znamionowe napięcie łączeniowe	3. Znamionowy prąd udarowy 4. Znamionowy prąd krótkotrwały

Wartość prądu obciążenia wyraża się wzorem

$$I_{ob} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n}, \quad (3.1)$$

gdzie S_n - trójfazowa znamionowa moc (pozorna) transformatora, generatora lub obciążenia,

U_n - napięcie znamionowe układu,

lub w przypadku kiedy podana jest moc czynna obciążenia P_n

$$I_{ob} = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi}, \quad (3.2)$$

gdzie $\cos \varphi$ - współczynnik mocy obciążenia.

Warunkiem prawidłowego doboru na prąd ciągły jest aby

$$I_n > I_{ob}, \quad (3.3)$$

gdzie I_n - znamionowy prąd ciągły aparatu.

3.3. Zasady doboru do zwarciovych warunków pracy

W ramach doboru aparatu na warunki zwarciovie kolejność postępowania jest następująca:

- 1) ustalenie najtrudniejszych zwarciovych warunków pracy w miejscu zainstalowania aparatu w układzie elektroenergetycznym,
- 2) wyznaczenie parametrów zwarciovych układu dla warunków ustalonych w punkcie 1,
- 3) dobór aparatu o znamionowych parametrach zwarciovych większych (lub co najmniej równych) od parametrów zwarciovych układu wyznaczonych w punkcie 2.

Ad.1. W celu ustalenia najcięższych warunków zwarciovych układu należy:

- a) opierając się na schemacie elektrycznym układu wyznaczyć oporności zwarciovie poszczególnych jego elementów,
- b) zestawień opornościowy schemat zastępczy, a następnie zakładając miejsce zwarcia bezpośrednio na zaciskach dobieranego aparatu uprościć schemat zastępczy do obwodu zwarciovego zasilanego jedno- lub dwustronnie (przy większej liczbie źródeł),
- c) ustalić położenie punktu zwarcia (przy zasilaniu dwustronnym) w miejscu, dla którego przez aparat przepływa większy prąd zwarciovym. Wyznaczoną na tej drodze oporność zwarciovą obwodu przyjąć do dalszych obliczeń.

Oporności zwarciovie i impedancje poszczególnych elementów układu w obwodach w.n. wyznacza się na ogół przy pominięciu

ich oporności czynnych. Początkową impedancję zwarciovą generatora wyznacza się ze wzoru

$$x_G = \frac{x_d'' \% U_{nG}^2}{100 S_{nG}}, \quad (3.4)$$

gdzie $x_d'' \%$ - oporność przejściowa wstępna generatora w %,

U_{nG} - napięcie znamionowe generatora w kV,

S_{nG} - moc znamionowa generatora w MVA.

Impedancja zwarciovą transformatora wynosi

$$x_T = \frac{\Delta u_z \% U_{nT}^2}{100 S_{nT}}, \quad (3.5)$$

przy czym $\Delta u_z \%$ - napięcie zwarcia transformatora w %,

U_{nT} - napięcie znamionowe transformatora w kV,

S_{nT} - moc znamionowa transformatora w MVA.

Niekiedy celem uproszczenia obliczeń, złożone części układów sieciowych zawierających źródła, zastępuje się przez podanie w określonym punkcie sieci mocy zwarcioviej, jaką do tego punktu dostarcza zastępowana część układu. Pozwala to na wyznaczenie zastępczej impedancji pomiędzy punktem przyłączenia układu zastępowanego, a zastępczym źródłem napięcia tego układu. Oporność ta wyraża się wzorem

$$x_z = \frac{U_n^2}{S_z}, \quad (3.6)$$

gdzie U_n - napięcie znamionowe w miejscu przyłączenia zastępowanego układu sieciowego w kV,

S_z - moc zwarciovą dostarczona z zastępowanego układu w MVA.

U w a g a Przy ustalaniu opornościowego schematu zastępczego należy pamiętać, że oporności poszczególnych elementów muszą być odniesione do jednego poziomu napięcia. Przeliczenie oporności na inny poziom napięcia wymaga pomnożenia wartości przez kwadrat przekładni napięciowej [np. $Z_2 = Z_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2$].

Ad 2. Obliczenia parametrów zwarciovych będą przeprowadzone według zasad podanych w PN/E-05021 przy przyjęciu jednego zastępczego źródła napięcia. Dla bardziej dokładnych obliczeń stosowana jest metoda tzw. indywidualnego zanikania, uwzględniająca indywidualne warunki zanikania składowej okresowej prądu w poszczególnych generatorach zasilających zwarcie. Z uwagi na wymaganą dokładność obliczeń, stosowanie metody generatora zastępczego jest w zupełności wystarczające.

Punktem wyjściowym do obliczeń zwarciovych jest wyznaczenie początkowej wartości składowej okresowej prądu zwarciovego I_p . Wartość I_p wyznacza się opierając się na wzorach podanych w p.1.3. przy przyjęciu do obliczeń rodzaju zwarcia, dla którego w układzie występują najcięższe warunki pracy. Dla krajowych warunków sieciowych jest to zazwyczaj zwarcie trójfazowe. Dla układów sieciowych z uziemionym punktem zerowym, przy spełnionym warunku skuteczności uziemienia punktu zerowego ($x_1 < x_0 < 3x_1$), istnieje również konieczność wyznaczania zwarciovych obciążalności cieplnej (prąd krótkotrwały) dla przypadku zwarcia jednofazowego. Przy zwarciu jednofazowym wobec zmniejszonego oddziaływania twornika zanikanie składowej okresowej prądu zwarciovego jest wolniejsze niż przy zwarciu trójfazowym, a współczynnik k_g osiąga również większe wartości. Różnica w warunkach tłumienia składowej okresowej przy zwarciu jedno- i trójfazowym staje się wyraźna dopiero przy dłuższych czasach trwania zwarcia. Dlatego też przy obliczaniu prądów wyłączeniowych (kiedy czas zwarcia określony czasem własnym wyłącznika jest znacznie krótszy) różnice w zanikaniu są pomijalne, a jako obliczeniowe przyjmuje się jedynie zwarcie trójfazowe.

Przy przyjęciu obliczeniowego zwarcia trójfazowego

$$I_p = \frac{1,1 U_n}{\sqrt{3}x}, \quad (3.7)$$

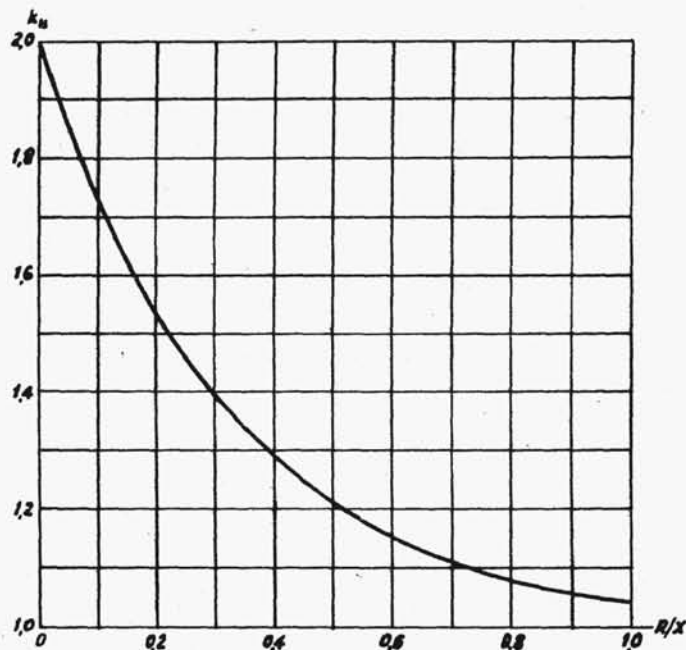
gdzie U_n - międzyprzewodowe znamionowe napięcie układu występujące w miejscu zainstalowania aparatu,
 x - impedancja zwarciova układu wyznaczona wg zasad podanych w punkcie p. przednim.

Opierając się na wartości początkowej składowej okresowej prądu wyznacza się udarowy prąd zwarciaowy wg wzoru

$$i_u = k_u \sqrt{2} I_p, \quad (3.8)$$

gdzie k_u - współczynnik udaru.

Współczynnik udaru uwzględnia zanikanie składowej nieokresowej prądu zwarciaowego w czasie 0,01 s. Wartość współczynnika udaru w funkcji tłumienia $k_u = f\left(\frac{R}{X}\right)$ przedstawiono na rys.3.1. Często występują duże trudności w wyznaczaniu stosunku $\frac{R}{X}$ z uwagi na brak znajomości oporności czynnej obwodu.



Rys.3.1. Przebieg zależności $k_u = f(R/X)$

W tych przypadkach całkowite pominięcie oporności czynnej byłoby zbyt dużym zastrzeżeniem warunków pracy, dlatego też dla sieci w.n. można przyjmować bez obliczeń $k_u = 1,8$, co odpowiada warunkom tłumienia w obwodzie z $\cos \varphi = 0,07$. Jedynie w przypadkach zwarć bezpośrednio za dławikami należy przyjmować $k_u = 2,0$. W sieciach niskiego napięcia współczynnik udaru ma wartości mniejsze i dlatego konieczne jest możliwie do-

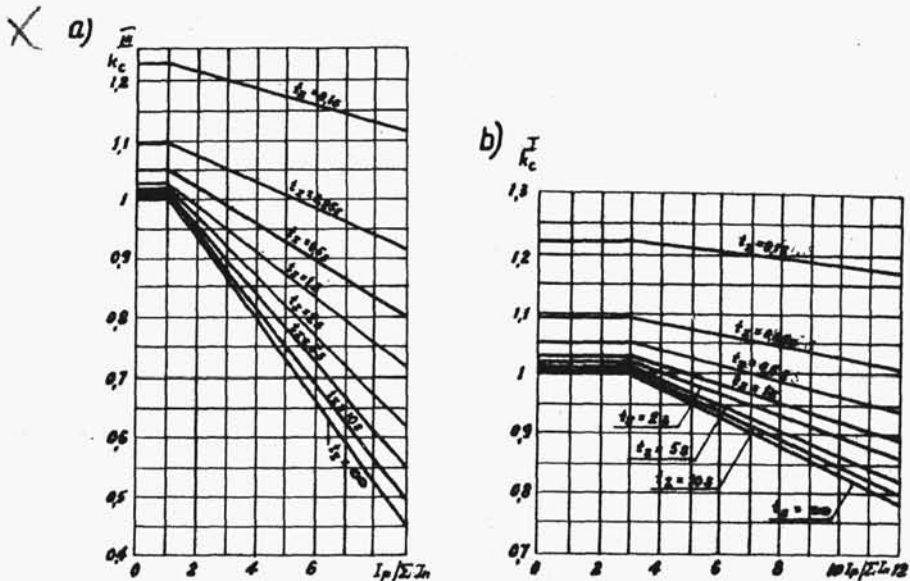
kładne wyznaczanie oporności czynnej obwodu; orientacyjnie dla sieci niskiego napięcia można przyjmować $k_u \leq 1,6$.
- krótkotrwały prąd zwarciovowy n-sek

$$I_{cn} = k_c I_p \sqrt{\frac{t_z}{n}}, \quad (3.9)$$

gdzie t_z - czas trwania zwarcia,

n - czas, do którego odniesiona jest wartość I_{cn} -
zwykle $n = 1$ lub $3s$,

k_c - współczynnik uwzględniający zanikanie składowej
okresowej prądu w czasie trwania zwarcia.



Rys.3.2. Przebieg zależności $k_c = f(I_p / \Sigma I_n)$ dla różnych czasów trwania zwarcia; a-dla zwarcia trójfazowego, b-dla zwarcia jednofazowego

Wartość współczynnika k_c określa się z przedstawionej na rys.3.2 zależności $k_c = f\left(\frac{I_p}{\Sigma I_n}\right)$ wyznaczonej dla różnych czasów trwania zwarcia oraz różnych rodzajów zwarc. Prąd ΣI_n jest sumą prądów znamionowych generatorów współpracujących na rozpatrywane zwarcie wyznaczonych przy takiej samej wartości napięcia jak I_p . Zależności te zostały wyznaczone w założeniu

występowania w obwodzie największej możliwej składowej nieokresowej, dlatego też dla krótkich czasów trwania zwarcia oraz małych wartości stosunku $\frac{I_p}{\sum I_n}$, udział składowej nieokresowej prądu mimo jej zanikania jest znaczny; wówczas współczynnik k_c może osiągać wartości > 1 .

Dla układów sieciowych z izolowanym punktem zerowym współczynnik k_c wyznacza się dla przypadku zwarcia trójfazowego, jako stwarzającego najcięższe warunki pracy. Dla układów ze skutecznie uziemionym punktem zerowym (sieci o napięciu ≥ 110 kV), w przypadku kiedy nie podana jest wartość stosunku $\frac{x_0}{x_1}$ należy przyjmować do obliczeń dolną granicę tego sto-

sunku tj. $\frac{x_0}{x_1} = 1$. Początkowe wartości składowej okresowej prądu zwarciego, przy zwarcu jedno- i trójfazowym są wtedy równe. Do obliczeń krótkotrwałego prądu zwarciego należy zatem przyjmować współczynnik k_c dla zwarcia jednofazowego, który w wyniku zmniejszania oddziaływania twornika przy zwarcu jednofazowym osiąga wartości większe niż przy zwarcu trójfazowym.

- symetryczny zwarciový prąd wyłączeniowy^{x)} zawiera jedynie składową okresową prądu i odniesiony jest do chwili utraty styczności styków wyłącznika

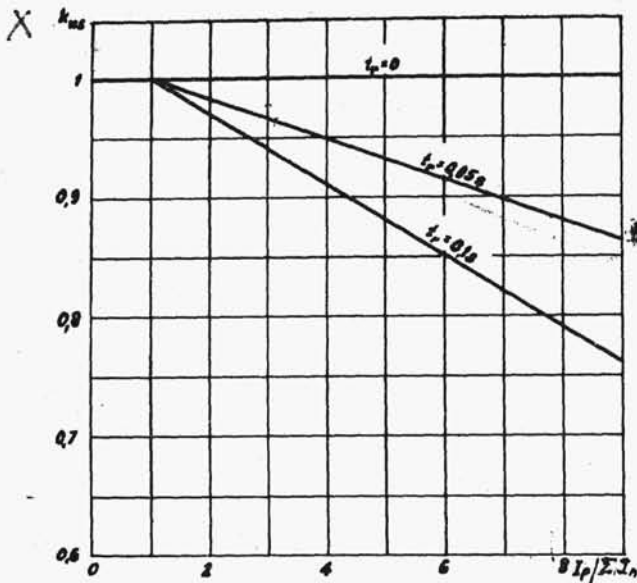
$$I_{ws} = k_{ws} I_p, \quad (3.10)$$

gdzie k_{ws} - współczynnik uwzględniający zanikanie składowej okresowej prądu do chwili utraty styczności styków.

Na rys.3.3 przedstawiono zależności $k_{ws} = f\left(\frac{I_p}{\sum I_n}\right)$ dla różnych czasów do chwili utraty styczności styków wyłącznika, przy czym $\sum I_n$ jest jak poprzednio sumą prądów znamionowych generatorów zasilających zwarcie wyznaczonych przy takiej sa-

^{x)} Wartość zwarciový prądu wyłączeniowego określana jest jedynie dla łączników przeznaczonych do łączenia obwodów zwarciových, a więc wyłączników i bezpieczników.

mej wartości napięcia jak I_p . Jako czas do chwili utraty styczności styków przyjmuje się zwykle czas własny otwierania dobieranego wyłącznika. Dla bezpieczników, które w zakresie



Rys.3.3. Przebieg zależności $k_{ws} = f(I_p/I_n)$ dla różnych czasów do chwili utraty styczności styków wyłącznika

prądów zwarciovych działają bardzo szybko przyjmuje się

$$k_{ws} = 1,0.$$

W niektórych przypadkach, gdy czasy własne otwierania wyłączników są na tyle krótkie, że składowa nieokresowa prądu zwarciovego nie zdąży się wytłumić, wyznacza się również niesymetryczny prąd wyłączeniowy. Sprawą tą nie będziemy się jednak bliżej zajmować.

- symetryczna moc wyłączeniowa wg wzoru

$$S_{ws} = \sqrt{3} I_{ws} U_w, \quad (3.11)$$

gdzie U_w - napięcie wyłączeniowe (międzyprzewodowe) przyjmowane zwykle jako równe napięciu znamionowemu sieci.

Pojęcie zwarciovej mocy wyłączeniowej nie ma sensu fizycznego, kojarzy bowiem wielkości fizyczne (prąd i napięcie) odniesione do różnych chwil czasowych - prąd wyłączeniowy wstępuje w chwili utraty styczności styków wyłącznika (napięcie międzystykowe wyłącznika jest zazwyczaj bliskie zeru), a napięcie wyłączeniowe wyznacza się po zgaszeniu łuku, kiedy prąd równa się zeru. Tym niemniej przyjęło się powszechnie (również w normalizacji) stosować pojęcie zwarciovej mocy wyłączeniowej jako formalny iloczyn prądu wyłączeniowego, napięcia

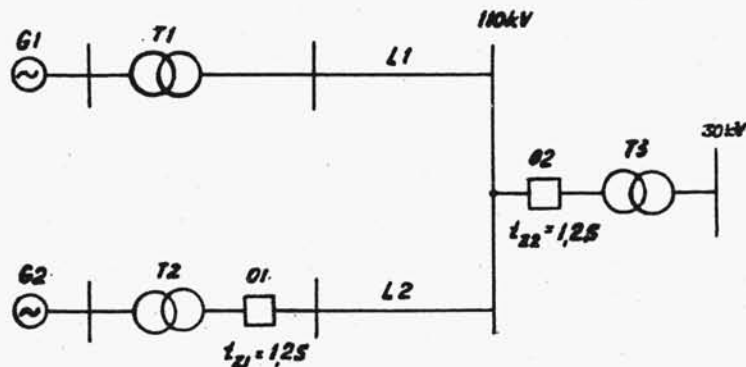
wyłączeniowego oraz współczynnika skojarzenia, charakteryzującej zdolność łączeniową w warunkach zwarciovych.

Ad 3. W ostatniej fazie doboru, na podstawie materiałów katalogowych wybiera się typ aparatu, którego znamionowe parametry zwarciove są większe lub co najmniej równe parametrom zwarciovym wyznaczonym dla miejsca przyszłego zainstalowania aparatu. Np. dla wyłącznika znamionowy prąd załączalny, znamionowa moc wyłączalna, znamionowy prąd n-sek muszą być większe od parametrów wyznaczonych dla miejsca zainstalowania - prądu załączeniowego, mocy wyłączeniowej, prądu n-sek.

3.4. Przykłady liczbowe

Przykład 3.1

Wyznaczyć dane charakterystyczne dla doboru do obciążeniowych zwykłych i zwarciovych warunków pracy dla odłączników O1 i O2 pracujących w układzie jak na rys.3.4.



Rys. 3.4. Schemat układu do przykładu 3.1:
G1 ($S_n = 50$ MVA, $U_n = 10,5$ kV, $X_d' = 12\%$);
G2 ($S_n = 30$ MVA, $U_n = 6,3$ kV, $X_d' = 12\%$);
T1 ($S_n = 50$ MVA, 10,5/110 kV/kV, $\Delta U_z = 11\%$);
T2 ($S_n = 30$ MVA, 6,3/110 kV/kV, $\Delta U_z = 10\%$);
T3 ($S_n = 60$ MVA, 110/30 kV/kV, $\Delta U_z = 11\%$);
L1 ($X_L' = 0,4 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 20$ km);
L2 ($X_L' = 0,4 \Omega/\text{km}$, $l_2 = 25$ km);

Uwaga: Punkt zerowy układu 110 kV jest skutecznie uziemiony.