

Zwarcia niesymetryczne dwufazowe i jednofazowe

Wzory do obliczania prądu początkowego w przypadkach zwarć różnego rodzaju zestawiono w tabeli na następnej stronie.

Występujące we wzorach wielkości Z_1 , Z_2 , Z_0 to impedancje odpowiednio składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej obwodu zwarciovego.

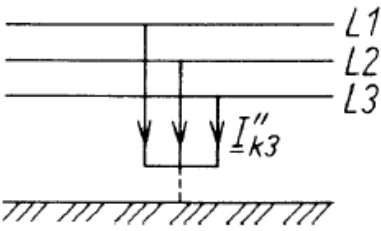
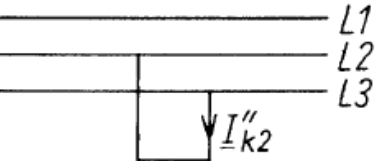
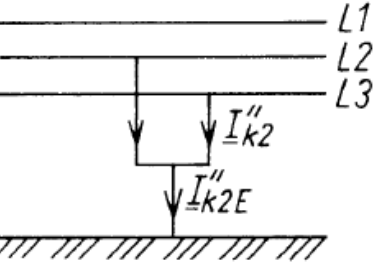
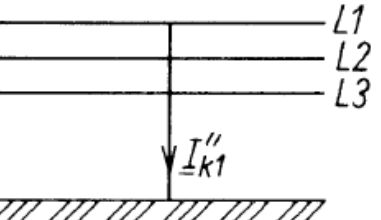
Prądy udarowe wyznacza się z zależności:

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

przy czym do wzoru należy wstawić wartość prądu początkowego I_k'' właściwą dla danego rodzaju zwarcia.

Wartość współczynnika udaru κ można przyjąć taką samą jak dla zwarcia trójfazowego.

Wzory do obliczania prądu początkowego I_k'' przy zwarceniu symetrycznym i przy zwarciach niesymetrycznych

Rodzaj zwarcia	Szkic miejsca zwarcia	Prąd początkowy
Trójfazowe bez udziału ziemi lub z udziałem ziemi		$I_{k3}'' = \frac{cU_N}{\sqrt{3} Z_1 }$
Dwufazowe		$I_{k2}'' = \frac{cU_N}{ Z_1 + Z_2 }$
Dwufazowe doziemne		$I_{k2E}'' = \frac{\sqrt{3}cU_N}{\left Z_1 + Z_0 + Z_0 \frac{Z_1}{Z_2} \right }$
Jednofazowe doziemne lub do przewodu ochronnego (PE, PEN) w sieciach niskiego napięcia		$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_N}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$

Z_1, Z_2, Z_0 – impedancje zwarciove: zgodna (Z_1), przeciwna (Z_2) i zerowa (Z_0).

Jeżeli dysponujemy dokładnymi danymi dotyczącymi rezystancji i reaktancji poszczególnych składowych, to współczynnik udaru κ dla zwarcia jednofazowego może być wyznaczony z wykresu $\kappa = f(R_k/X_k)$ dla R/X wyrażonego zależnością:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0}$$

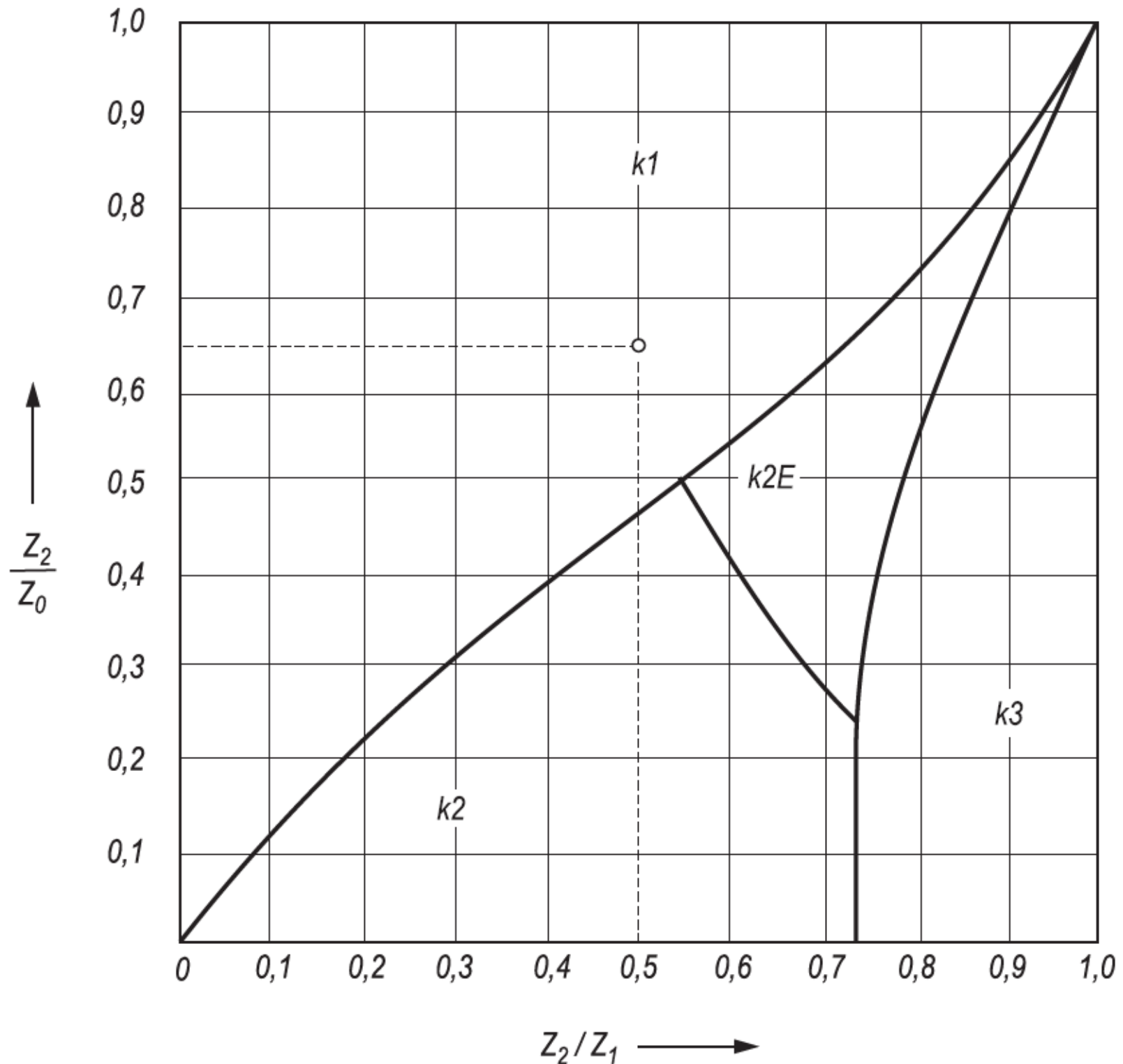
Impedancje składowej zgodnej Z_1 i przeciwnej Z_2 poszczególnych elementów systemu elektroenergetycznego są przeważnie jednakowe, natomiast impedancje Z_0 są najczęściej większe od Z_1 .

Z tego względu prądy zwarciove przy zwarciach trójfazowych są z reguły największe.

Są jednak przypadki, gdy $Z_1 \neq Z_2$ oraz $Z_0 < Z_1$, co powoduje, że prądy przy zwarciach niesymetrycznych mogą być większe niż przy zwarciu trójfazowym.

Relacje między poszczególnymi impedancjami obwodu zwarciovego (Z_2/Z_1 oraz Z_2/Z_0), przy których występują największe wartości prądów zwarcioveych przy różnych rodzajach zwarć przedstawiono na wykresie.

Diagram określający rodzaj zwarcia, przy którym wartość prądu zwarciovego jest największa, w zależności od ilorazu impedancji składowej przeciwnej Z_2 i zgodnej Z_1 oraz przeciwnej Z_2 i zerowej Z_0



Impedancje zwarciove urządzeń elektrycznych

sieć zasilająca

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \quad Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \frac{1}{g^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \frac{1}{g^2}$$

gdzie:

U_{nQ} - napięcie sieci elektroenergetycznej w miejscu Q,

S_{kQ}'' - moc zwarciova obliczeniowa początkowa sieci w miejscu Q,

I_{kQ}'' - prąd zwarciovy obliczeniowy początkowy w miejscu Q,

c - współczynnik napięciowy,

g - przekładnia znamionowa transformatora.

$$\text{dla } U_n > 35 \text{ kV : } \underline{Z}_Q = 0 + jX_Q$$

$$\text{dla } U_n \leq 35 \text{ kV : } R_Q = 0,1X_Q \quad X_Q = 0,995Z_Q$$

transformatory

Parametry podłużne w schemacie zastępczym transformatora

Dane znamionowe:

napięcia znamionowe U_{n1} i U_{n2} ,

przekładnia znamionowa \mathcal{G} ,

moc znamionowa S_{nT} ,

znamionowe napięcie zwarcia $\Delta U_{Z(\%)}$,

straty mocy w uzwojeniach ΔP_{Cu} .

$$R_T = R_1 + R_2 \mathcal{G}^2 \quad R_1 \cong R_2 \mathcal{G}^2$$

$$X_T = X_1 + X_2 \mathcal{G}^2 \quad X_1 \cong X_2 \mathcal{G}^2$$

R_1, R_2 i X_1, X_2 – rezystancje i reaktancje uzwojeń górnego i dolnego napięcia transformatora

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu} U_{nT}^2}{10^3 S_{nT}^2} \quad R_T = \frac{\Delta P_{Cu(\%)} U_{nT}^2}{100 S_{nT}} \quad Z_T = \frac{\Delta U_{Z(\%)} U_{nT}^2}{100 S_{nT}}$$

$$\Delta P_{cu} [\text{kW}], \quad U_{nT} [\text{kV}], \quad S_{nT} [\text{MVA}]$$

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

Współczynniki korygujące wartości impedancji transformatorów
Transformatory dwuuzwojeniowe z wyjątkiem transf. blokowych

Impedancja zwarciova transformatora skorygowana:

$$Z_{TK} = K_T Z_T \quad R_{TK} = K_T R_T \quad X_{TK} = K_T X_T$$

Współczynnik korygujący impedancję transformatora:

$$K_T = 0,95 \frac{C_{\max}}{1 + 0,6 x_T} \quad x_T = \frac{X_T}{Z_{nT}} \quad x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}}$$

gdzie:

x_T – względna reaktancja zwarciova transformatora

Z_{nT} – impedancja znamionowa transformatora

Współczynnik korygujący impedancję transformatora w przypadku znanych warunków jego pracy przed zwarcie:

$$K_T = \frac{U_n}{U_m} \frac{C_{\max}}{1 + x_T \frac{I_{Tm}}{I_{nT}} \sin \varphi_{Tm}}$$

gdzie:

U_n – napięcie znamionowe sieci,

U_m – najwyższe napięcie sieci przed zwarcie,

I_{Tm} – maksymalny prąd obciążenia przed zwarcie,

I_{nT} – prąd znamionowy transformatora,

φ_{Tm} – kąt obciążenia transformatora przed zwarcie.

linie napowietrzne i kablowe

Impedancje wzdłużne linii napowietrznych i kablowych dla składowych symetrycznych zgodnych i przeciwnych są jednakowe.

Rezystancję linii (wyrażoną w omach) oblicza się według zależności:

$$R_L = \frac{l}{\gamma S}$$

w której:

S – rzeczywisty przekrój przewodów, mm^2 ;

γ – konduktywność materiału, z którego są wykonane przewody, $\text{m}/(\Omega\text{mm}^2)$, (MS/m);

l – długość linii, m.

W obliczeniach można przyjmować γ równe $54 \text{ m}/(\Omega\text{mm}^2)$ dla miedzi oraz $34 \text{ m}/(\Omega\text{mm}^2)$ dla aluminium i $31 \text{ m}/(\Omega\text{mm}^2)$ dla stopów aluminiowych.

Reaktancje linii napowietrznych dla składowej symetrycznej zgodnej zależą od materiału i przekroju przewodów, układu przewodów na słupie oraz odstępu między nimi, zależnych od napięcia znamionowego linii.

Reaktancja linii X_L wyrażona w omach może być obliczona według wzoru:

$$X_L = 0,0628 \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) l$$

w którym:

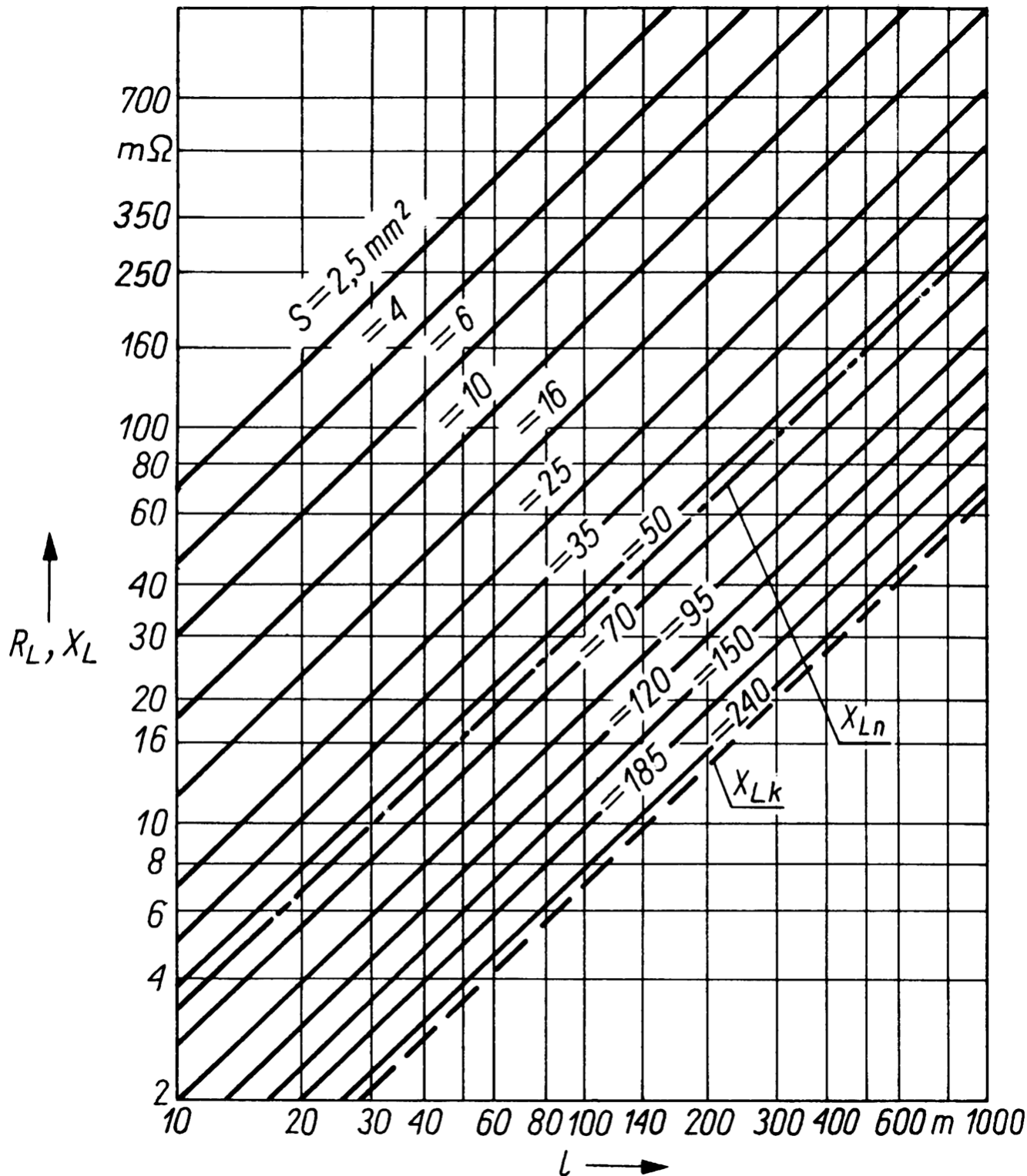
$$d = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$$

gdzie: d – średnia geometryczna odległość między przewodami lub osiami wiązek przewodów, l – długość linii, r – promień pojedynczego przewodu, a w wiązce – zastępczy promień wiązki przewodów równy:

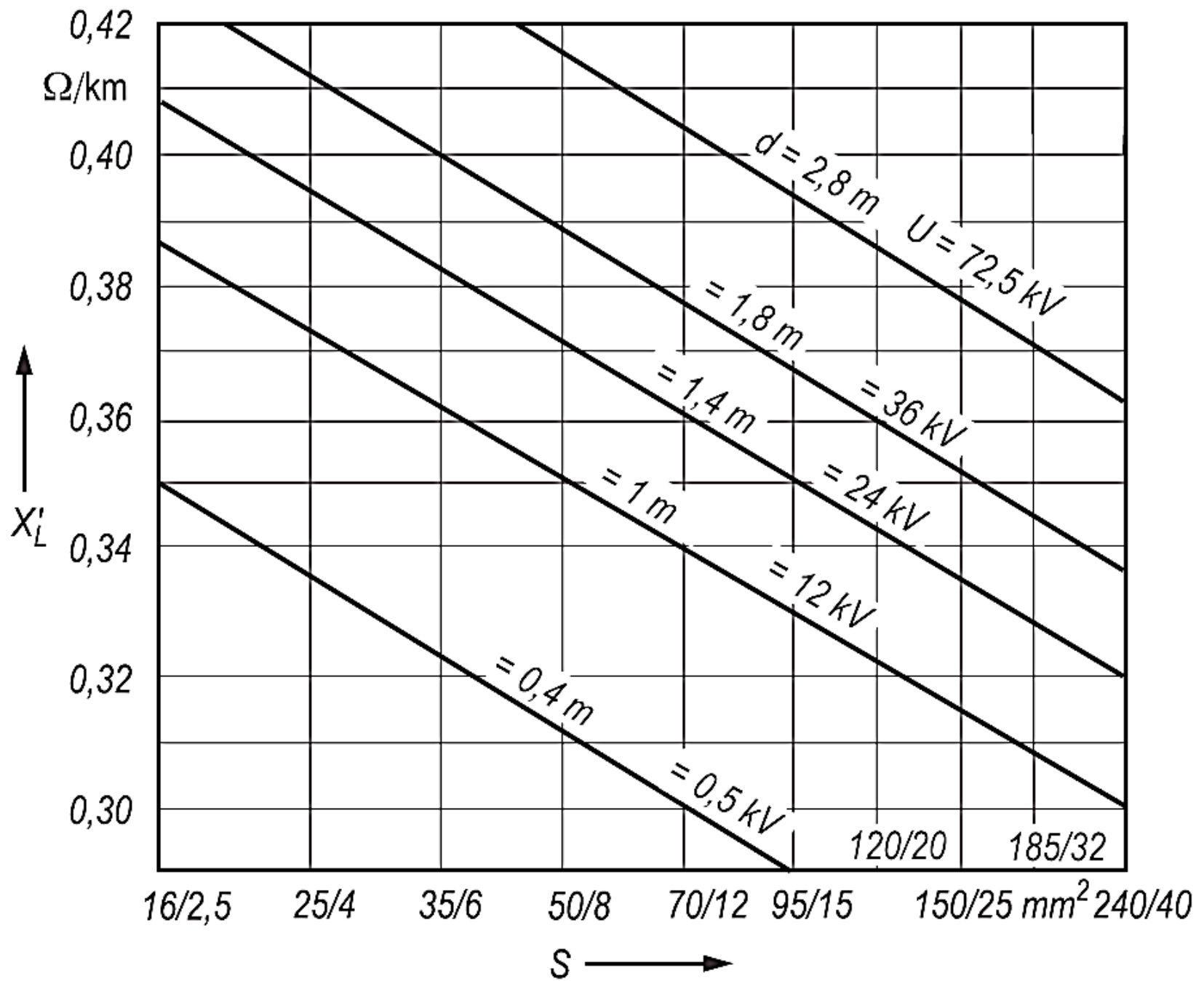
$$\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$$

przy czym: R – promieniem wiązki, n – liczba przewodów w wiązce (dla pojedynczego przewodu $n = 1$).

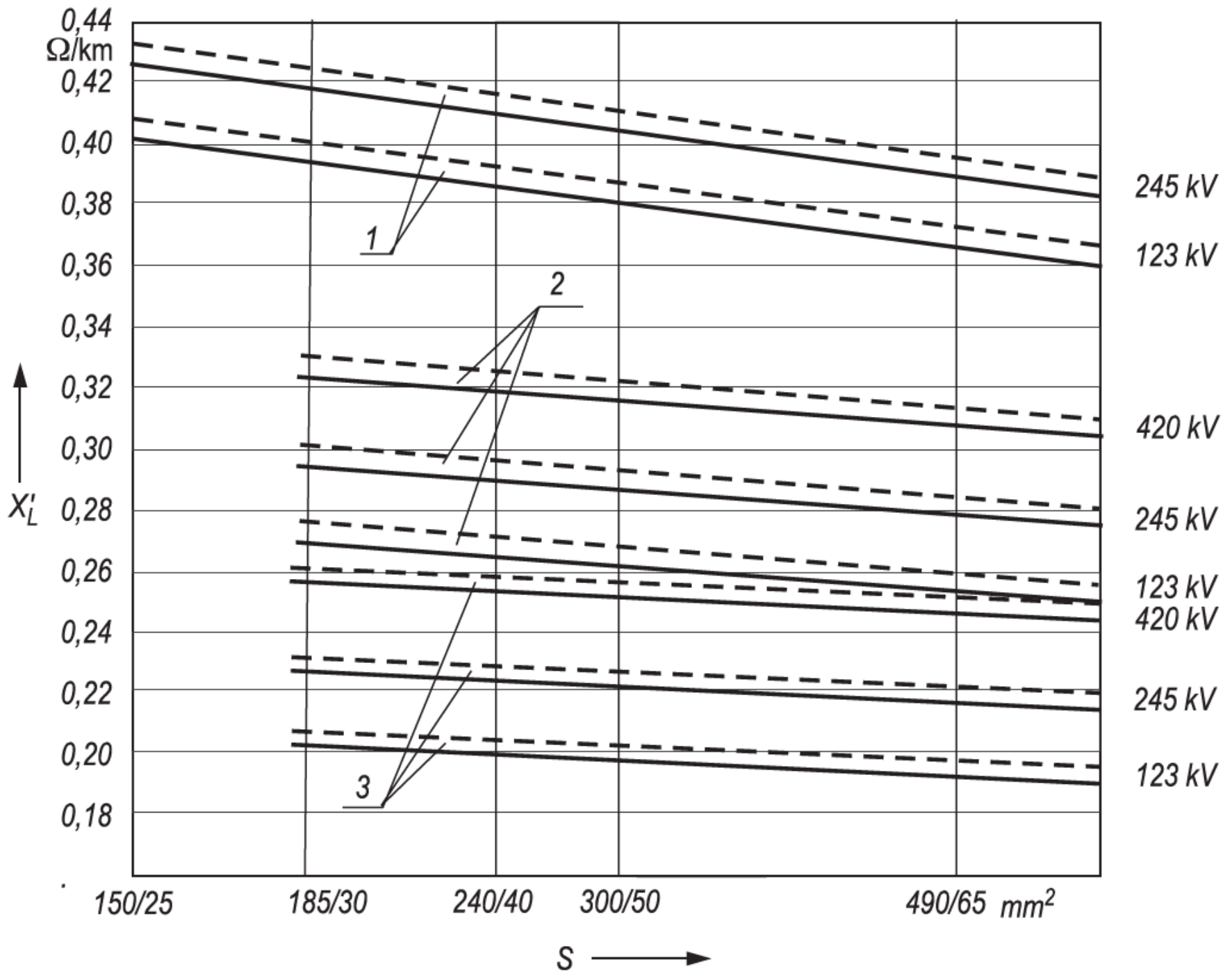
W obliczeniach praktycznych reaktancje linii napowietrznych mogą być wyznaczone według podanych zależności oraz na podstawie danych zawartych na poniższych wykresach.



Rezystancje i reaktancje linii napowietrznych i kablowych niskiego napięcia o długości l i przekroju S żył miedzianych (dla przewodów aluminiowych rezystancję R_L należy pomnożyć przez 1,7)
 X_{Lk} – reaktancja linii kablowej,
 X_{Ln} – reaktancja linii napowietrznej



Zależności reaktancji jednostkowych X'_L linii napowietrznych o przewodach aluminiowo-stalowych (AFL) od przekroju przewodów S i odległości między przewodami d



Reaktancje jednostkowe X'_L linii napowietrznych WN, — linia 1-torowa, - - - - linia 2-torowa; odstępy między przewodami fazowymi: 4 m (123 kV), 6 m (245 kV), 9,4 m (420 kV), krzywe: 1 - pojedyncze przewody fazowe, 2 - dwa przewody w wiązce, 3 - cztery przewody w wiązce; odstęp między przewodami w wiązce 0,4 m; przewody AFL o przekroju S

Rezystancja linii napowietrznych jednotorowych dla składowej symetrycznej zerowej (wyrażona w Ω/km), w skład której wchodzi również rezystancja ziemi, jest w przybliżeniu określona wzorem:

$$R'_0 = R' + 0,15$$

gdzie R' – rezystancja 1 km linii w $[\Omega]$.

Reaktancje linii napowietrznych dla składowej symetrycznej zerowej zależą od materiału i przekroju przewodów, odstępów między przewodami, układu przewodów na słupie oraz liczby przewodów odgromowych.

Dokładne wartości tej reaktancji mogą być ustalone na podstawie analizy warunków pracy linii i zależności określających związek między reaktancją a parametrami linii.

Reaktancje dla składowej symetrycznej zerowej linii dwutorowej są w przybliżeniu 1,5-rza większe niż linii jednotorowych.

Wartości średnie reaktancji dla składowej symetrycznej zerowej jednej fazy linii napowietrznej jednotorowej podano niżej.

Wartości względne reaktancji indukcyjnych dla składowej symetrycznej zerowej jednej fazy linii napowietrznych jednotorowych

Rodzaj linii	Napięcie linii, kV	$\frac{X_0}{X_1}$
Bez przewodów odgromowych	60	3,6
	110	3,4
Z jednym przewodem odgromowym	60	3,4
	110	3,2
Z dwoma przewodami odgromowymi	60	3,2
	110	3,0
	220	2,7

X_0, X_1 – reaktancje dla składowej symetrycznej zerowej i zgodnej.

Reaktancje indukcyjne kabli dla składowej symetrycznej zgodnej zależą od rodzaju kabla, zastosowanego opancerzenia, przekroju żył oraz odstępu między żyłami (napięcia znamionowego kabla).

Niżej podano wartości reaktancji jednostkowej kabli dla składowej zgodnej.

Reaktancje jednostkowe X_L (Ω/km) kabli elektroenergetycznych trójżyłowych o izolacji rdzeniowej średniego napięcia*

Liczba kabli i przekrój żyły mm^2	Napięcie znamionowe, kV				
	3,6	7,2	12	17,5	36
3 × 6	0,120	0,144	—	—	—
3 × 10	0,112	0,133	0,142	—	—
3 × 16	0,105	0,123	0,132	0,152	—
3 × 25	0,096	0,111	0,122	0,141	0,151
3 × 35	0,092	0,106	0,112	0,135	0,142
3 × 50	0,089	0,10	0,106	0,122	0,129
3 × 70	0,085	0,096	0,101	0,115	0,122
3 × 95	0,084	0,093	0,098	0,110	0,117
3 × 120	0,082	0,091	0,095	0,107	0,112
3 × 150	0,081	0,088	0,092	0,104	0,109
3 × 185	0,080	0,087	0,09	0,10	0,105
3 × 240	0,079	0,085	0,089	0,097	0,102
3 × 300	0,077	0,083	0,086	—	—
3 × 400	0,076	0,082	—	—	—

* Reaktancje kabli nieopancerzonych są o 15% mniejsze, a kabli czterożyłowych opancerzonych o 10% większe od podanych wartości.

Reaktancje jednostkowe X_L (Ω/km) kabli elektroenergetycznych jednożyłowych o izolacji polietylenowej (PE) ułożonych w trójkąt

Liczba kabli i przekrój żyły mm^2	Napięcie znamionowe, kV				
	12	24	36	72,5	123
$3 \times 1 \times 35$	0,135	–	–	–	–
$3 \times 1 \times 50$	0,129	0,138	0,148	–	–
$3 \times 1 \times 70$	0,123	0,129	0,138	–	–
$3 \times 1 \times 95$	0,116	0,123	0,132	–	–
$3 \times 1 \times 120$	0,110	0,119	0,126	0,151	0,163
$3 \times 1 \times 150$	0,107	0,116	0,123	0,148	0,160
$3 \times 1 \times 185$	0,104	0,110	0,119	0,141	0,154
$3 \times 1 \times 240$	0,101	0,107	0,113	0,138	0,148
$3 \times 1 \times 300$	0,098	0,104	0,110	0,132	0,145
$3 \times 1 \times 400$	0,094	0,101	0,107	0,129	0,138
$3 \times 1 \times 500$	0,091	0,097	0,104	0,126	0,132
$3 \times 1 \times 630$	–	–	–	0,119	0,129

Impedancje kabli dla składowej zerowej zależą od materiału, przekroju i liczby żył kabla oraz drogi powrotnej prądu przy zwarcu jednofazowym.

Przeciętnie dla kabli czterożyłowych można korzystać z zależności:

$$R_{0L} = R + 3R_N$$

$$X_{0L} = (3,5 \div 4,0)X_L$$

w których R_N – rezystancja przewodu neutralnego N.

Dławiki zwarciove

Impedancje dławików zgodne, przeciwne i zerowe są jednakowe. Reaktancję dławików wyznacza się według zależności:

$$X_d = \frac{X_{d\%} \cdot U_{Nd}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{Nd}} = \frac{X_{d\%} \cdot U_{Nd}^2}{100 \cdot S_{Nd}}$$

gdzie: $X_{d\%}$ – reaktancja dławika, %;

I_{Nd} , U_{Nd} – prąd znamionowy i napięcie znamionowe dławika;

S_{Nd} – moc znamionowa (przepustowa) dławika.

Rezystancje pomija się. Są 15...20 razy mniejsze od reaktancji.

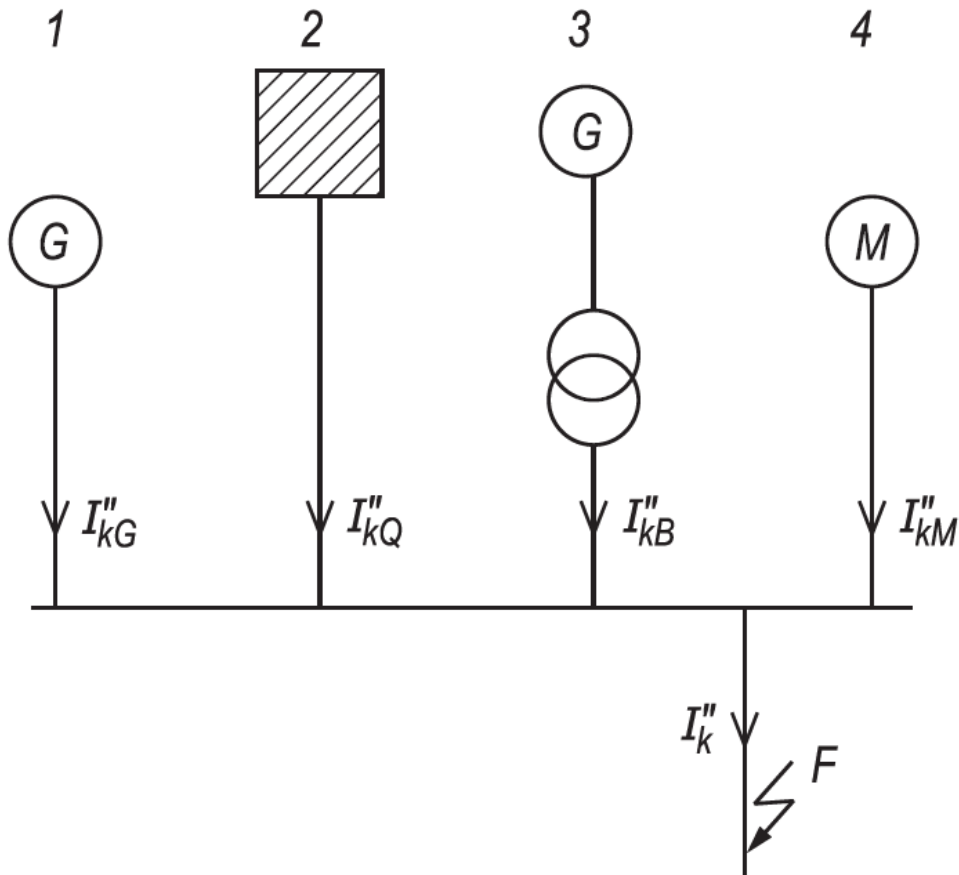
Zwarcia w pobliżu generatora

Zwarcie charakteryzujące się malejącą amplitudą składowej okresowej prądu przyjęto nazywać zwarcie w pobliżu generatora.

W rozważaniach należy uwzględnić wpływ silników synchronicznych i indukcyjnych, jeżeli ich udział w prądzie zwarciovym przekracza 5% prądu początkowego I''_{kQ} obliczonego bez udziału silników.

Zmiana składowej okresowej prądu w czasie trwania zwarcia przy zwarciach pobliskich wynika z tego, że reaktancje maszyn nie mają wartości stałej i zwiększają się w miarę upływu czasu trwania zwarcia.

We fragmentach sieci, w których mogą wystąpić zwarcia określane jako pobliskie, do celów doboru urządzeń, w szczególności łączników, należy wyznaczyć również znamionowy prąd wyłączeniowy symetryczny i niesymetryczny oraz ustalony prąd zwarciovym I_k .



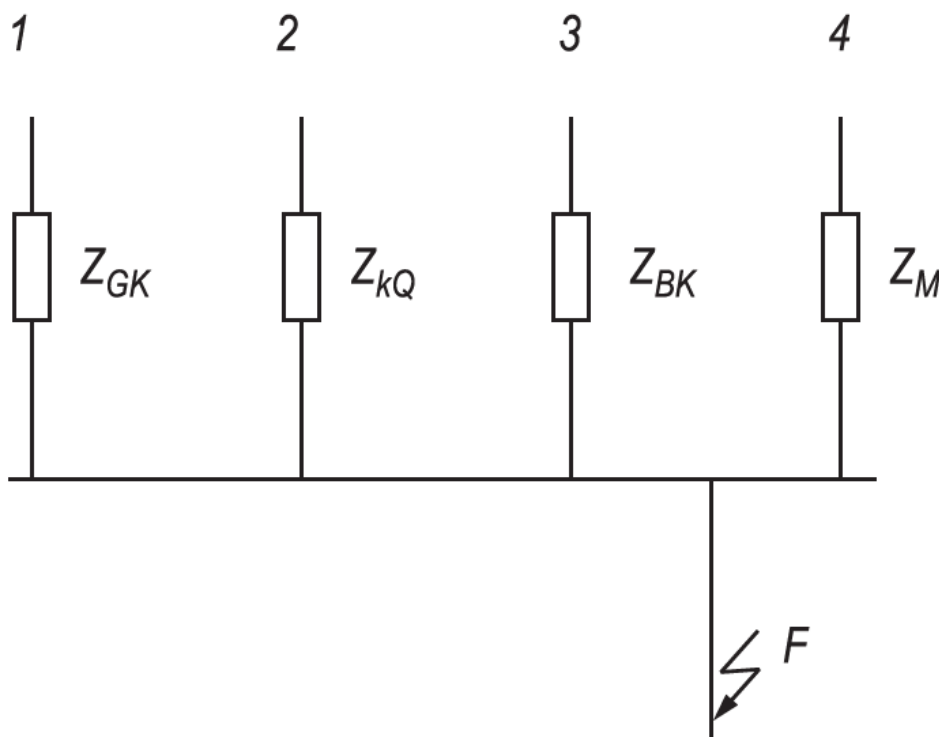
Różne możliwe źródła prądu zwarciovego i odpowiadające im skorygowane impedancje:

1 – generator przy zwarciu na jego zaciskach,

2 – zastępczy system elektroenergetyczny (zwarcie odległe),

3 – generator przy zwarciu po stronie WN bloku generator-transformator,

4 – silnik



Prąd początkowy I_k'' przy zwarciach pobliskich wyznacza się z zależności:

$$I_k'' = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Skorygowaną impedancję zgodną generatora oblicza się według wzoru:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G (R_G + jX_d'')$$

w którym

$$K_G = \frac{c_{\max} U_N}{U_{NG} (1 + x_d'' \sin \varphi_{NG})} \quad X_d'' = \frac{x_{d\%}'' \cdot U_{NG}^2}{100 \cdot S_{NG}} \quad x_d'' = \frac{X_d''}{\frac{U_{NG}^2}{S_{NG}}}$$

gdzie: K_G – współczynnik korekcyjny,

x_d'' – reaktancja podprześciowa generatora (wartość względna),

U_N – napięcie znamionowe sieci,

U_{NG} – napięcie znamionowe generatora,

φ_{NG} – kąt przesunięcia fazowego między prądem i napięciem znamionowym generatora,

S_{NG} – moc znamionowa generatora.

Reaktancje względne maszyn synchronicznych (w procentach)

Reaktancja względna	Turbogeneratory	Generatory z biegunami wydatnymi	
		z uzwojeniami tłumiącymi	bez uzwojeń tłumiących
Podprzejściowa $x''_d\%$ *	9÷22 **	12÷30 ***	20÷40 ***
Przejściowa $x'_d\%$ **	14÷35 ****	20÷45	20÷40
Synchroniczna $x_d\%$	140÷300	80÷180	80÷180
Dla składowej przeciwnej $x_2\%$	9÷22	10÷25	30÷50
Dla składowej zerowej $x_0\%$	3÷10	5÷20	5÷25

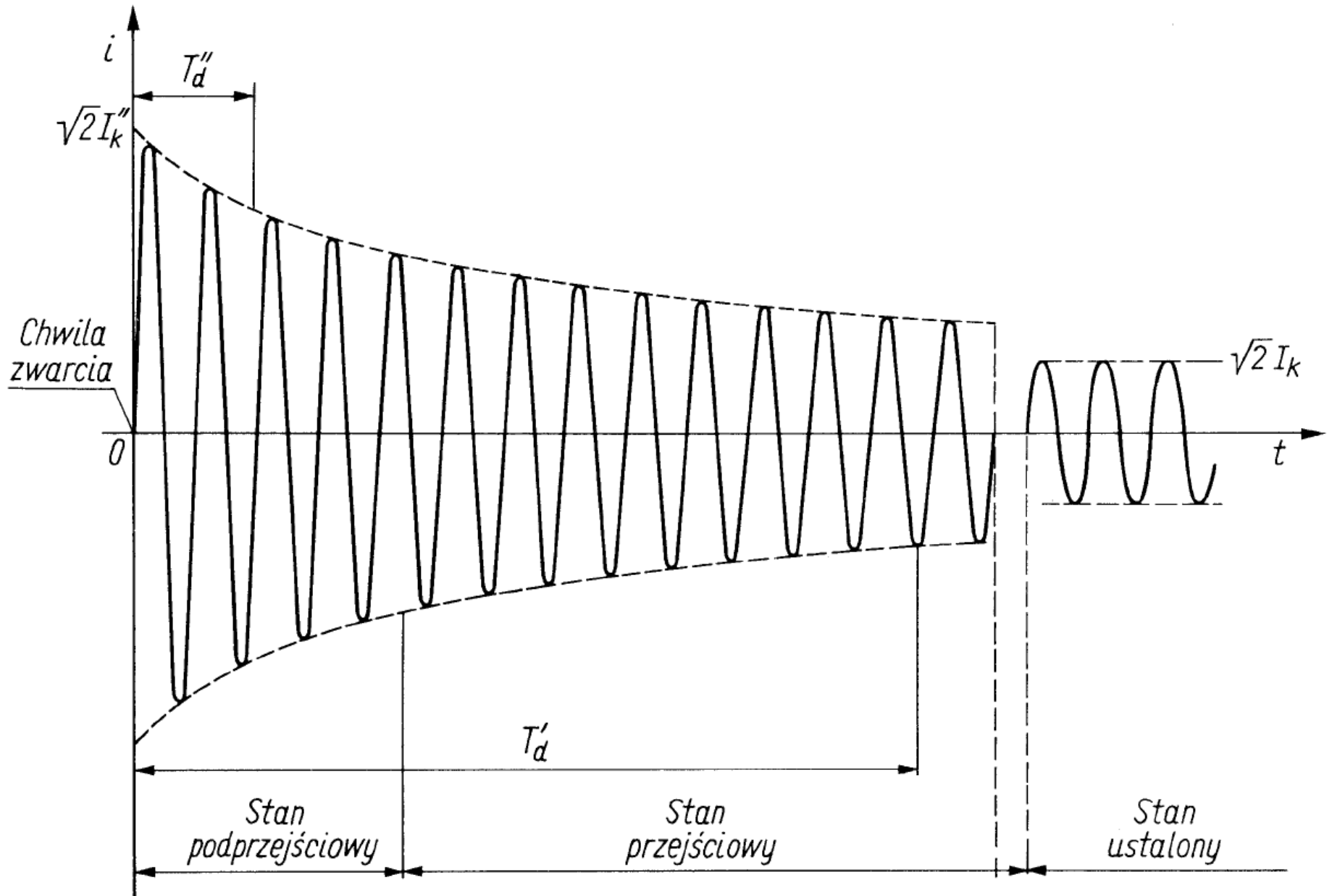
* W stanie nasycenia.

** Większe wartości dotyczą maszyn o większych mocach znamionowych; wartości najmniejsze dotyczą generatorów niskiego napięcia.

*** Większe wartości dotyczą maszyn wolnoobrotowych ($n < 375$ obr/min).

**** Maszyny o mocach znamionowych większych od 1000 MVA mogą osiągać wartości 40÷45%.

O wartości prądu zwarciovego generatora w stanie podprzejściowym decyduje reaktancja podprzejściowa X''_d , w stanie przejściowym reaktancja przejściowa X'_d , a w stanie ustalonym reaktancja X_d .



Przebieg składowej okresowej prądu zwarciovego w fazie stojana generatora w stanie nieustalonym:

T_d'' – stała czasowa tłumienia obwodu klatki tłumiącej,

T_d' – stała czasowa tłumienia uzwojeń wzbudzenia,

I_k – prąd ustalony

W obliczeniach praktycznych rezystancje generatorów R_G można przyjmować jako:

$0,05 X_d''$ – dla generatorów o mocy $S_{NG} \geq 100$ MVA,

$0,07 X_d''$ – dla generatorów o mocy $S_{NG} < 100$ MVA,

$0,15 X_d''$ – dla generatorów o napięciu znamionowym $U_{NG} \leq 1$ kV.

Reaktancje dla składowej przeciwnej maszyn z biegunami utajonymi i maszyn z biegunami jawnymi mających uzwojenia tłumiące można przyjąć jako równe reaktancji dla składowej symetrycznej zgodnej.

Dla maszyn z biegunami jawnymi bez uzwojeń tłumiących:

$$X_2 \approx 1,45 X_1$$

Reaktancja generatora dla składowej zerowej zależy od konstrukcji maszyny i może zawierać się w granicach $(0,1 \dots 1) X_1$, przeciętnie

$$X_0 \approx 0,4 X_1$$

Przy obliczaniu prądów zwarciovych, po stronie górnego napięcia bloku generator-transformator (rysunek powyżej), skorygowaną impedancję wypadkową bloku oblicza się według wzoru:

w którym
$$\underline{Z}_{BK} = K_B \left(\vartheta_N^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_T \right)$$

$$K_B = \left(\frac{U_N}{U_{NG}} \right)^2 \left(\frac{U_{TL}}{U_{TH}} \right)^2 \frac{C_{\max}}{1 + (x_d'' - \Delta u_x) \sin \varphi_{NG}}$$

przy czym:

K_B – współczynnik korekcyjny bloku generator-transformator,

$\vartheta_T = U_{TH}/U_{TL}$ – rzeczywista przekładnia transformatora blokowego,

$\vartheta_N = U_{NG}/U_N$ – znamionowa przekładnia transformatora,
odpowiadająca podstawowemu położeniu
przełącznika zaczeów,

Z_T – impedancja transformatora blokowego odniesiona do strony
górnego napięcia,

Δu_x – reaktancja względna transformatora (względne napięcie
rozproszenia), $\Delta u_x = \Delta U_{x\%}/100$.

Impedancję silników synchronicznych (rysunek powyżej) oraz kompensatorów synchronicznych oblicza się tak samo jak generatorów. Impedancję silników indukcyjnych dla składowej zgodnej i przeciwnej wyznacza się według wzoru:

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

w którym

$$S_{NM} = \frac{P_{NM}}{\eta \cos \varphi_N}$$

gdzie:

U_{NM} – napięcie znamionowe silnika,

I_{NM} – prąd znamionowy silnika,

k_r – współczynnik rozruchu, równy ilorazowi prądu rozruchowego i prądu znamionowego silnika,

P_{NM} – moc znamionowa silnika,

$\cos \varphi_N$ – znamionowy współczynnik mocy,

η – sprawność znamionowa.

W przypadkach zwarcia na zaciskach silnika lub w sieci, w miejscu nieodległym od silnika, można pomiąć impedancję przewodów łączących, jako wielokrotnie mniejszą od impedancji Z_M .

Wówczas prąd początkowy I''_{kM} jest wyrażony wzorem:

$$I''_{kM} = ck_r I_{NM}$$

Prąd udarowy od silników i_{pM} należy wyznaczyć zgodnie z zależnością:

$$i_{pM} = \sqrt{2} \kappa_M I''_{kM}$$

Przy czym współczynnik udaru κ_M należy odczytać z wykresu.

Przy braku dokładnych danych dotyczących R_M/X_M w obliczeniach praktycznych można przyjmować:

$\kappa_M = 1,75$ dla silników wysokiego napięcia o mocy odniesionej do jednej pary biegunów ≥ 1 MW, co odpowiada $R_M/X_M = 0,10$;

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

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