

## DOBÓR PRZEKROJU ŻYŁ POWROTNYCH W KABŁACH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Marek OLESZ<sup>1</sup>, Radosław SAWICZ<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,  
tel: 583471820 e-mail: [marek.olesz@pg.gda.pl](mailto:marek.olesz@pg.gda.pl)
2. Energa - Operator SA, Sekcja ds. Standardów Technicznych, Biuro Zarządzania Eksploatacją  
tel: +48 605 720 265 e-mail: [radoslaw.sawicz@energa.pl](mailto:radoslaw.sawicz@energa.pl)

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono zasady doboru przekroju żył powrotnych w kablach średniego napięcia (SN) z uwzględnieniem zwarć jednofazowych i dwufazowych z udziałem ziemi. Przeprowadzona analiza wskazuje na możliwość zmniejszenia obowiązującego dotychczas przekroju żyły powrotnej 50 mm<sup>2</sup>, co wprowadzono do stosowania w sieci rozdzielczej w Energa Operator SA.

**Słowa kluczowe:** kable średniego napięcia, prądy zwarciowe, przekrój żyły powrotnej

### 1. WSTĘP

Żyła powrotna stanowi istotny element składowy kabla służący osiągnięciu dwóch podstawowych celów:

- wyrównaniu potencjału do wartości bliskiej zera od strony powłoki kabla,
- prawidłowego przewodzenia prądów zakłóceń powstających w czasie normalnej pracy (prądy indukowane), warunków przeciążeniowych, a przede wszystkim zwarciowych, tak aby temperatura żyły powrotnej, jak i izolacji nie przekroczyła wartości dopuszczalnych.

Ze względu na ostatni warunek, żyła powrotna musi mieć odpowiedni przekrój, tak, aby przy określonej gęstości prądu i wymiarach kabla nie powodować nadmiernego wzrostu temperatury izolacji. W kablach średniego napięcia w izolacji polietylenowej z żyłami powrotnymi miedzianymi przyjęto w normalizacji w warunkach zwarciowych wartości krytyczne temperatury na poziomie 250°C na żyłę roboczej i 350°C na żyłę powrotnej. Podane poziomy dopuszczalne są sprawdzane w badaniach typu podczas prób zwarciowych odcinków kabla. Na podstawie pozytywnych wyników tego rodzaju badań producent może uzyskać certyfikat zgodności z wymaganiami odpowiedniej normy przedmiotowej [1].

W sieciach SN stosuje się różne układy pracy, przy których uzyskuje się inne poziomy prądów zwarciowych [2]. W sieciach eksploatowanych w Energa Operator S.A. spotyka się następujące rozwiązania:

- uziemienie punktu neutralnego przez dławik Petersena (bez lub z układem automatycznego wymuszenia składowej czynnej – AWSC),
- uziemienie punktu neutralnego przez rezystor,
- uziemienie punktu neutralnego przez dławik połączony na stałe z rezystorem.

W podanych przypadkach w celu określenia wystarczającego przekroju żyły powrotnej kabla w warunkach zwarciowych należy obliczyć:

- prądy zwarć jednofazowych w przypadku uziemienia punktu neutralnego przez rezystor,
- prąd zwarcia dwufazowego z udziałem ziemi dla sieci skompensowanych.

Powyższa procedura wynika z krótkich czasów wyłączenia zwarć jednofazowych w sieciach uziemionych przez rezystor związanych ze znacznym prądem zwarciowym rzędu kilkuset amperów, co w praktyce wyklucza powstanie drugiego zwarcia z ziemią w innym miejscu linii.

Z kolei, ze względu na znaczne prądy zwarć dwufazowych z udziałem ziemi w sieciach skompensowanych na poziomie kilku kA oraz stosunkowo długie czasy ich wyłączenia, przyjęto w polskich spółkach dystrybucyjnych przekrój żył powrotnych wynoszący 50 mm<sup>2</sup>. Ze względu na małe prawdopodobieństwo powstawania zwarć dwufazowych z udziałem ziemi oraz radykalne poprawienie powtarzalności czasów ich wyłączenia (stosowanie zabezpieczeń cyfrowych nowej generacji), w referacie dokonano analizy możliwości zastosowania mniejszych przekrojów żył powrotnych kierując się zasadą nie przekroczenia temperatury dopuszczalnej 350°C w czasie stanów zwarciowych sieci kablowej.

### 2. DOBÓR ŻYŁ POWROTNYCH KABLI SN

Obliczanie prądów zwarciowych przepływających żyłami powrotnymi kabli SN wymaga rozważenia następujących przypadków:

- zwarcia jednofazowe,
- zwarcia dwufazowe z udziałem ziemi.

Wartości prądu zwarciowego w przypadku zwarć 1 – fazowych z ziemią w sieciach SN dla sieci skompensowanej są rzędu 40 A lub 20 A, natomiast przy uziemieniu przez rezystor osiągają wartości około 500 A. W związku z powyższym, ze względu na znaczne wartości 1 – sekundowego prądu zwarciowego dla żyły powrotnej  $I_{th1s}$  (np. dla  $S=16$  mm<sup>2</sup> prąd  $I_{th1s} = 2,8$  kA) stosowanie nawet 16 mm<sup>2</sup> przekroju, nie powoduje niebezpieczeństwa

przekroczenia temperatury dopuszczalnej 350°C w stanie zwarcia.

Natomiast najgroźniejsze ciepłnie dla izolacji kabla zwarcie 2 - fazowe z ziemią występuje dość rzadko. Statystyki zestawione w tablicy 1 mówią tylko o 10% zwarć dwufazowych ze wszystkich zarejestrowanych zwarć [3].

Założone moce zwarciove podane przez Energa Operator SA wynikające z koncepcji rozwoju sieci dystrybucyjnej SN w perspektywie lat 2015 i 2020 w poszczególnych oddziałach nie przekraczają 230 MVA. Stosownie do podanych mocy można w poszczególnych punktach systemu elektroenergetycznego obliczyć prądy zwarciove według poniżej podanych wzorów.

Tablica 1. Prawdopodobieństwo występowania zwarć w liniach kablowych [3]

rodzaj zwarcia	udział minimalny	udział maksymalny
jednofazowe	65%	97%
podwójne doziemne	20%	45%
zwarcia dwufazowe	10%	55%
zwarcia trójfazowe	5%	35%

Największy spodziewany prąd składowej początkowej zwarcia 3 - fazowego  $I_{k3}''$  wylicza się według zasad podanych w normie [4] z zależności (1).

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} z_k} = \frac{S_{zw}}{\sqrt{3} U_n} \quad (1)$$

gdzie:  $z_k$  – impedancja równa impedancji dla składowej zgodnej  $z_l$  i przeciwnej  $z_2$ ,

$U_n$  – napięcia znamionowe sieci w [kV],

$c_{\max}$  – współczynnik zależny od napięcia sieci,

$S_{zw}$  – moc zwarciova.

Według metody składowych symetrycznych początkowy prąd zwarcia 2 - fazowego z ziemią przy pominięciu sumy impedancji wzdłużnych kabli, przez które przepływa prąd zwarciova wynosi (2):

$$I_{k2\max}'' = \frac{c_{\max} U_n}{2 z_k} \quad (2)$$

Tak obliczona wartość prądu dotyczy największej ilości generowanego ciepła, występującego przy podwójnym zwarciu z ziemią na szynach rozdzielni SN. Po przekształceniu wzoru (1) otrzymujemy (3):

$$z_k = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} I_{k3}''} \quad (3)$$

Podstawienie zależności (3) do (2) pozwala obliczyć prąd zwarcia 2 – fazowego z udziałem ziemi według (4):

$$I_{k2}'' = \frac{1,1 U_n}{2 z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3}'' = 0,886 I_{k3}'' \quad (4)$$

Początkowy prąd zwarcia 1 - fazowego obliczamy z zależności (5) uwzględniając dodatkowo impedancję  $z_{k(0)}$  dla składowej zerowej:

$$I_{k1\max}'' \approx \frac{c_{\max} \sqrt{3} U_n}{2 z_k + z_{k(0)}} \quad (5)$$

gdzie:

$$z_k = z_s + z_l = \frac{1,1 U_n^2}{S_{zw}} + z_{ikm} I_x \quad (6)$$

$z_s$  – impedancja systemu elektroenergetycznego,

$z_l$  – impedancja linii kablowej.

Ponieważ zazwyczaj  $z_{k(0)} > z_k$  można uwzględnić w obliczeniach tylko impedancję  $z_{k(0)}$ , co pozwala wyznaczyć według (7) początkowy prąd zwarcia 1 - fazowego:

$$I_{k1\max}'' \approx \frac{c_{\max} \sqrt{3} U_n}{z_n + \frac{1}{\omega C_0}} \quad (7)$$

gdzie:  $z_n$  – impedancja w punkcie neutralnym sieci,

$\omega C_0$  – susceptancja doziemna sieci.

W przypadku izolowanego punktu neutralnego transformatora wartość maksymalna prądu zwarciove przy pominięciu impedancji w punkcie neutralnym sieci wynosi (8):

$$I_{k1\max}'' \approx c_{\max} \sqrt{3} U_n \omega C_0 \quad (8)$$

Przykładowo dla 10 km kabla o napięciu znamionowym 15 kV, o przekroju żyły roboczej 70 mm<sup>2</sup> prąd pojemnościowy podczas zwarcia jednofazowego wynosi 22,5 A. Prąd ten można obliczyć z danych katalogowych producentów kabli, które zazwyczaj podają wartości pojemnościowego prądu zwarcia dla linii kablowej o długości 1 km.

W opracowaniu [5] wskazano, że w przypadku sieci kablowych SN o wartości napięcia z zakresu 6 ÷ 30 kV prąd zwarcia jednofazowego nie powinien przekraczać 50 A. W przypadku przekroczenia tej wartości np. w czasie rozbudowy linii kablowej należy wykonać odpowiednią kompensację za pomocą wprowadzenia dławika przyłączonego pomiędzy punkt zerowy transformatora, a ziemię.

W przypadku uziemienia transformatora przez rezystor lub zastosowania układu AWSC wartość  $R_{pN}$  w punkcie neutralnym, wylicza się według zależności:

$$R_{pN} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{RN}} \quad (9)$$

gdzie:  $I_{RN}$  – znamionowy prąd ziemnozwarciowy przepływający przez rezystor.

Zastosowanie tak dobranego rezystora ogranicza wartość prądu zwarcia jednofazowego w żył powrotnej kabla do zadanej wartości 400 A. Poziom ten wynika z wprowadzenia prądu w miejscu zwarcia do ziemi rzędu 20% wartości całkowitej. Podana wartość wynika z tzw. współczynnika redukcyjnego  $r$ , który definiuje poziom prądu  $r I_k''$  wprowadzanego do ziemi w czasie trwania zwarcia. Nieobowiązująca już norma PN – E – 05115:2002, Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego powyżej 1 kV podaje w załączniku J następujące wartości współczynnika  $r$  uzależnione od konstrukcji kabla:

- kable SN o żyłce roboczej 95 mm<sup>2</sup> (Cu) z izolacją papierową i powłoką ołowianą  $r = 0,2 - 0,6$ ,
- kable SN o żyłce roboczej 95 mm<sup>2</sup> (Al) z izolacją papierową i powłoką aluminiową  $r = 0,2 - 0,3$ ,
- kable SN o żyłce roboczej 95 mm<sup>2</sup> (Cu) z izolacją XLPE i żyłką powrotną 16 mm<sup>2</sup>,  $r = 0,5 - 0,6$ .

Ze względu na różną konstrukcję linii kablowych, założono najmniejszą wartość współczynnika  $r = 0,2$  powodującą wprowadzenie do żyły powrotnej prądu  $(1 - r) rI_k$  na poziomie 80% wartości całkowitej.

Podsumowując w przypadku uziemienia punktu neutralnego transformatora przez cewkę Petersena podczas zwarcia dwufazowego z ziemią prądy zwarciove osiągają wartości wynikające bezpośrednio z mocy zwarciovej i mogą osiągać wartości od kilku do kilkunastu kA. Natomiast w przypadku zwarcia jednofazowego największy prąd zwarciovej w żyłce powrotnej, zazwyczaj o wartości do 400 A, popłynie przy wymuszeniu składowej czynnej przez rezystancję przyłączoną do punktu neutralnego transformatora.

W obu przypadkach przy założeniu zwarć odległych, czyli nie w sąsiedztwie generatorów oraz czasów trwania zwarcia przekraczających wartość  $t_z > 10T$  ( $T$  - stała czasowa obwodu zwarciovej) można założyć z błędem mniejszym od 5% prąd zwarciovej cieplny  $I_{th}$  jako składową początkową prądu zwarciovej pod warunkiem występowania współczynnika udaru  $\kappa$  z zakresu 1,2 - 1,5 oraz czasów trwania zwarcia  $t_z$  dłuższych od 0,215 s.

W przypadku zwarć jednofazowych wyłączanych w czasie do 1 s obliczona wartość prądu na poziomie 400 A jest wielokrotnie mniejsza od podawanych w katalogach wartości prądu zwarciovej - 1 sekundowego kabla  $I_{th1s}$ .

Natomiast dla zwarć dwufazowych z ziemią w sieciach o napięciu znamionowym  $U_n$  początkowy prąd zwarcia dwufazowego wynosi po podstawieniu wyrażenia (1) do (4):

$$I_{k2}^* = \frac{S_{zw}}{2U_n} \quad (10)$$

W związku z wzorem (10), minimalny, wymagany prąd zwarciovej zastępczy cieplny 1 sekundowy  $I_{th1s}$  dla żyłki powrotnej przy założeniu zwarcia odległego, o czasie zwarcia  $t_z$  przekraczającym 10 - krotność stałej czasowej obwodu zwarciovej można obliczyć według zależności:

$$I_{th1s} = \frac{S_{zw}}{2U_n} \sqrt{t_z} \quad (11)$$

Po podstawieniu napięć znamionowych sieci do wzoru (11) otrzymuje się dwie następujące zależności:

- w przypadku sieci 15 kV,

$$I_{th1s} = 0,033 S_{zw} \sqrt{t_z} \quad (12)$$

- w przypadku sieci 30 kV;

$$I_{th1s} = 0,017 S_{zw} \sqrt{t_z} \quad (13)$$

Ze względu na występujące zmiany w napięciu można dla lepszego oszacowania wartości końcowej otrzymany wynik pomnożyć przez współczynnik 1,05. Wyliczona minimalna wartość prądu zwarciovej 1 - sekundowego  $I_{th1s}$  dla żyłki powrotnej musi być mniejsza od danych

katalogowych podawanych przez producentów kabli dla czasu trwania zwarcia  $t_z = 1$  s.

Zależności (4) i (11) wskazują na powstawanie znacznych wartości prądu w żyłkach powrotnych w przypadku zwarć dwufazowych z ziemią powodujących duże obciążenia cieplne izolacji kabli. Poziom tych prądów jest więc podstawowym kryterium doboru przekroju żył powrotnych.

### 3. NAGRZEWANIE ŻYŁ POWROTNYCH KABLI SN

Podstawą obliczenia przebiegu temperatury  $T$  w czasie  $t$  na żyłce powrotnej przy przepływie prądu zwarciovej o natężeniu  $I$  jest równanie bilansu ciepła przy założeniu braku wymiany ciepła z otoczeniem według zależności (14) [6]:

$$\int_0^t I^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] dt = \int_{T_1}^T cm dT \quad (14)$$

gdzie:

$R_0$  - rezystancja żyłki powrotnej w temperaturze odniesienia  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,

$\alpha$  - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji,

$T_1$  - ustalona temperatura żyłki powrotnej w chwili powstania zwarcia wynikająca z przepływu prądu obciążenia,

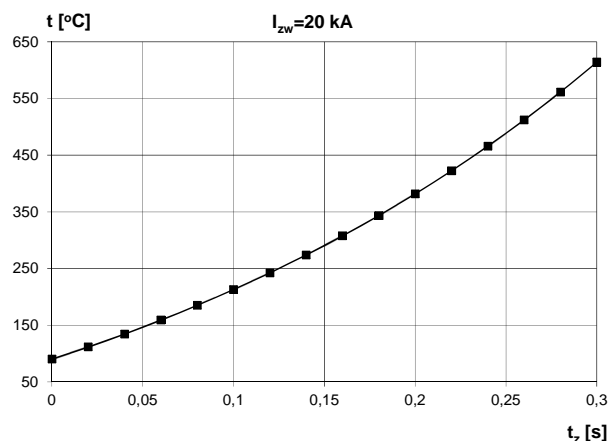
$c$  - ciepło właściwe materiału, z którego wykonano żyłkę powrotną,

$m$  - masa żyłki powrotnej.

Zmiana temperatury żyłki powrotnej w czasie  $t$  jest wyrażona przez stałe materiałowe i warunki początkowe w chwili wystąpienia zwarcia określone temperaturą początkową i wartością prądu zwarciovej wzorem (15):

$$T = T_0 + \frac{[1 + \alpha(T_1 - T_0)] e^{\frac{I^2 R_0 \alpha t}{cm}} - 1}{\alpha} \quad (15)$$

Na podstawie wzoru (15) można obliczyć temperatury żyłki powrotnej dla przykładowych poziomów prądów zwarciovej i czasów wyłączania zwarcia. Obliczenia te wykonano dla przekrojów miedzianej żyłki powrotnej - 16, 25, 35, 50 mm<sup>2</sup> przy prądach 5, 10 i 20 kA dla czasów wyłączania zwarcia  $t_z < 0,3$  s (rys. 1 ÷ 3).

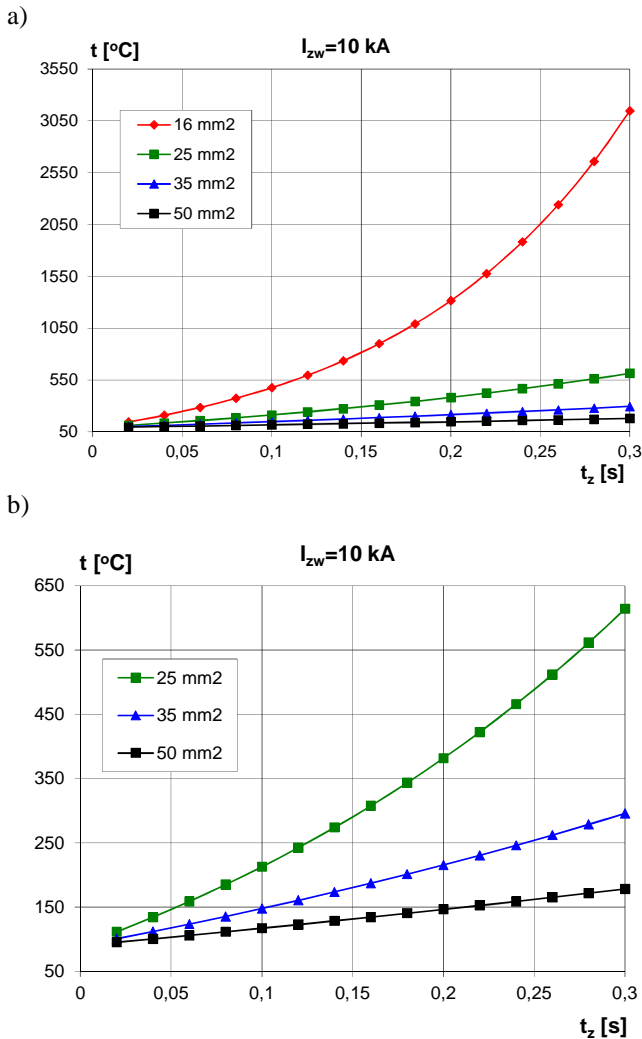


Rys. 1. Przebieg temperatury żyłki powrotnej o przekroju  $S=50$  mm<sup>2</sup> dla przepływu prądu zwarciovej o wartości 20 kA

Według rysunku 1 dla prądu 20 kA uzyskuje się nawet przy przekroju 50 mm<sup>2</sup> przekroczenie temperatury dopuszczalnej już przy czasie  $t_z = 0,2$  s.

Dla prądu 10 kA możliwości osiągnięcia temperatury poniżej 350°C przy dość krótkim czasie wyłączenia zwarcia występują jedynie dla przekroju żyły powrotnej 35 mm<sup>2</sup> i dotychczas stosowanym 50 mm<sup>2</sup> (rys. 2a, 2b).

Natomiast według rysunku 3 przy prądzie zwarciovym 5 kA przy utrzymaniu czasu  $t_z = 0,3$  s można użyć wszystkich przekrojów żył powrotnych 16 – 50 mm<sup>2</sup>. W praktyce uzyskanie czasów wyłączenia poniżej 0,3 sekundy może być problematyczne szczególnie w sieciach z izolowanym punktem neutralnym oraz uziemionym przez cewkę Petersena.

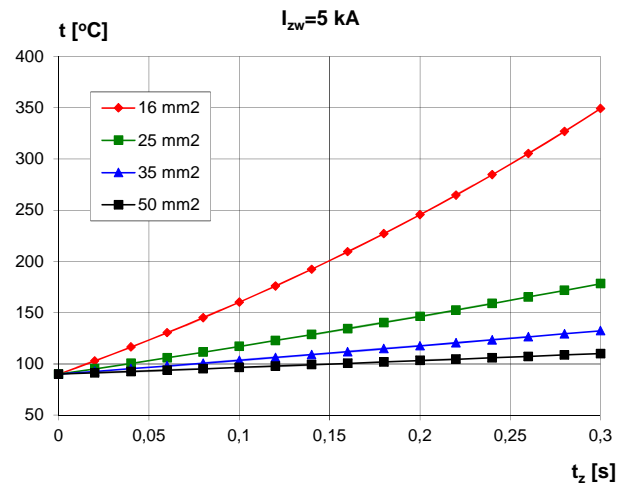


Rys. 2. Przebieg temperatury żyły powrotnej o przekroju z zakresu a)  $S=16 \div 50$  mm<sup>2</sup> oraz b)  $S=25 \div 50$  mm<sup>2</sup> podczas przepływu prądu zwarciovego o wartości 10 kA w czasie 0,3 s

Otrzymane wyniki obliczeń wykazują dużą zgodność z danymi podawanymi w katalogach producentów oraz uproszczonymi wzorami empirycznymi stosowanymi w praktyce projektowej. Przykładowo firma Twenpower w katalogu kabli [7] proponuje według holenderskiej normy NEN3620 zależność (16) na dopuszczalny prąd zwarciovym zastępczy ciepły dla miedzianych, wielodrutowych żył powrotnych dla maksymalnej temperatury żyły powrotnej 350°C. Wzór (16) uzależniono od przekroju żyły powrotnej  $S$  i czasu trwania zwarcia  $t_z$ . Podane na rysunku 4 wartości są nieznacznie wyższe w stosunku do otrzymanych wcześniej

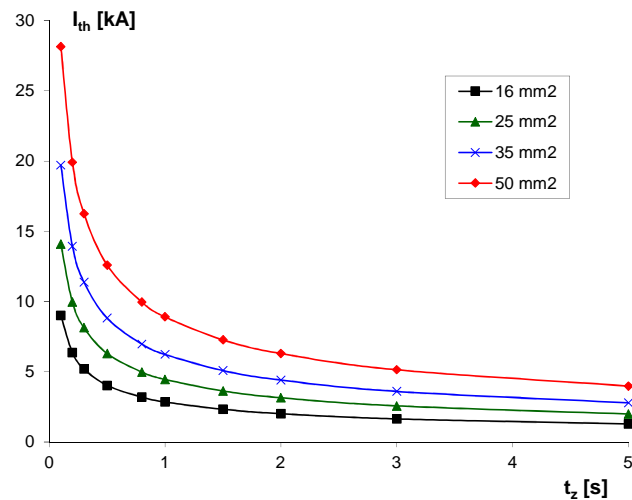
wyników obliczeń (rys. 1 ÷ 3) i stąd powinny być stosowane z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa.

$$I_{th} = 0,178 \frac{S}{\sqrt{t_z}} \quad (16)$$



Rys. 3. Przebieg temperatury żyły powrotnej o przekroju z zakresu  $S=16 \div 50$  mm<sup>2</sup> podczas przepływu prądu zwarciovego o wartości 5 kA w czasie 0,3 s

Uzyskane na podstawie wzoru (16) wyniki, zestawione na rysunku 4, wskazują na możliwości uzyskiwania znacznej zmienności wytrzymywanych prądów zwarciovych w zależności od czasu wyłączenia zwarcia.



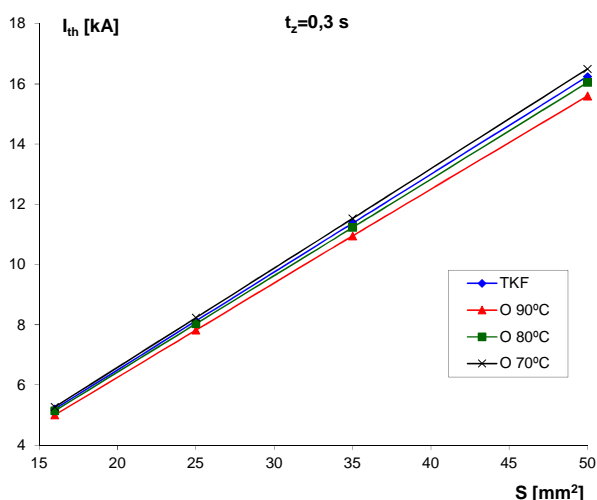
Rys. 4. Dopuszczalna wartość prądu zwarciovego cieplnego dla żył powrotnych o przekroju  $S$  z zakresu  $16 \div 50$  mm<sup>2</sup> przy czasie trwania zwarcia  $t_z$  do 5 s według [7], założona temperatura dopuszczalna na żyłę powrotnej wynosi 350°C

W katalogu [7] podano także zależność (17) na obliczanie dopuszczalnych prądów zwarciovych (jedno, dwu i trójfazowych) przy założeniu maksymalnej temperatury 250°C na miedzianych żyłach roboczych.

$$I_{th} = 0,143 \frac{S}{\sqrt{t_z}} \quad (17)$$

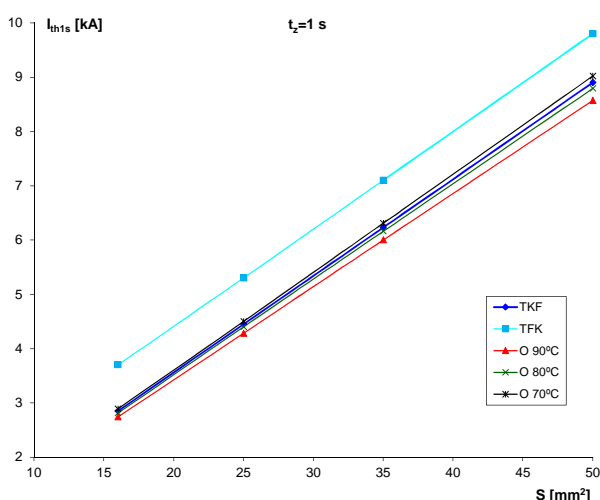
Na rysunku 5 pokazano zależność wyników obliczeń prądu  $I_{th}$  według wzoru (16) oraz procedury [6] dla czasu wyłączenia 0,3 s. Niestety, nie są dokładnie znane warunki wykonywania tego rodzaju badań oraz szczegóły konstrukcyjne kabli. Nieznaczne różnice mogą być

wynikiem cech materiałowych – np. rezystywności żył miedzianych i ich temperaturowego współczynnika rezystancji. Również w podanych wzorach (16), (17) nie wiadomo, jaka została przyjęta temperatura początkowa, którą można uwzględnić w procedurze [6]. Porównanie wyników obliczeń wskazuje na znaczną zgodność danych otrzymanych z [6] nieznacznie obostrzonych w stosunku do wyników uzyskanych z wzoru (17).



Rys. 5. Porównanie danych katalogowych firmy TKF (Twenpower) (16) z obliczonymi wartościami prądu zwarciovego dla założonej temperatury początkowej żyły powrotnej z zakresu 70 ÷ 90°C (oznaczenia w legendzie O 70°C, O 80°C, O 90°C) i czasu trwania zwarcia  $t_z = 0,3$  s według [6]

Wydaje się słusznym stosować podany według (15) sposób obliczeń w praktyce projektowej, ponieważ dopuszczalny prąd zwarciovym ciepłym  $I_{th}$  w żyłce występuje z pewnym współczynnikiem bezpieczeństwa zapewniając uzyskanie nieznacznie niższej temperatury oczekiwanej, tym bardziej, że obliczenia wykonano dla założonej wysokiej temperatury początkowej żyły powrotnej (90°C). W praktyce ze względu na rozkład temperatury w kablu należy przyjąć wartość maksymalną 80°C. Uwzględnienie temperatury początkowej żyły powrotnej w zakresie 70 – 90°C powoduje niewielkie zwiększenie obciążalności zwarciovym. Uzyskane wyniki są praktycznie tożsame z wzorem podanym w katalogu [7].

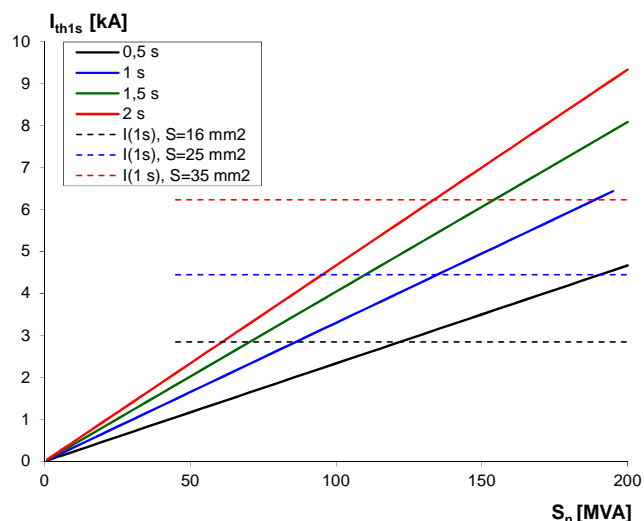


Rys. 6. Porównanie danych katalogowych firmy TKF (Twenpower) [7] z danymi firmy TFK (TELE – FONICA Kable) oraz obliczonymi wartościami prądu zwarciovego  $I_{th1s}$  dla założonej temperatury początkowej żyły powrotnej z zakresu 70 ÷ 90°C (oznaczenia w legendzie O 70°C, O 80°C, O 90°C) i czasu trwania zwarcia  $t_z = 1$  s według [6]

Natomiast trudno z powodu braku metodyki badań ocenić, dlaczego kable TFK (TELE – FONICA Kable) uzyskują z pomiarów znacznie wyższe wartości prądów zwarciovych (rys. 6).

Z kolei podane przez firmę Nexans w [8] poziomy dopuszczalny prąd zwarciovym  $I_{th1s}$  dla  $t_z = 1$  s dla  $S = 35$  mm<sup>2</sup> wynoszą 4,8 kA co jest wartością znacznie niższą wobec wyliczonej - 6,2 kA (80°C). Dla przekroju  $S = 50$  mm<sup>2</sup> mamy prąd dopuszczalny  $I_{th1s} = 8,2$  kA nieznacznie niższy w stosunku do obliczonej na podstawie (16) wartości 8,79 kA. W przypadku zwarć dwufazowych z ziemią minimalny, wymagany prąd zwarciovym 1-sekundowy  $I_{th1s}$  można obliczyć dla sieci 15 kV i 30 kV odpowiednio z zależności (12) lub (13).

Podana metoda pozwala na szybkie i dość dokładne oszacowanie wymaganej wartości prądu 1-sekundowego dla zastosowanego kabla. Wyniki obliczeń prądu 1-sekundowego  $I_{th1s}$  dla żyły powrotnej w funkcji mocy zwarciovym w miejscu zwarcia przy założeniu różnych czasów trwania zwarcia z zakresu 0,5 – 2 s przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Zestawienie prądu zwarciovego ciepłego  $I_{th1s}$  w funkcji mocy zwarciovym pozwalające odczytać maksymalne dopuszczalne moce zwarciovym przy zadanych wartościach – czasu trwania zwarcia i przekroju żyły powrotnej

Na rysunku tym naniesiono również prądy 1 – sekundowe kable wyliczone na podstawie zależności (15) [6] przy założeniu zwarć odległych oraz dla czasów trwania zwarcia przekraczających wartość  $t_z > 10T$  ( $T$  – stała czasowa obwodu zwarciovym). Otrzymane wartości minimalnego prądu zwarciovym 1-sekundowego -  $I_{th1s}$ , pozwalają stwierdzić, że:

- przy czasach wyłączenia zwarcia 0,5 s można stosować żyłę powrotną o przekroju  $S = 16$  mm<sup>2</sup> do mocy zwarciovym  $S_{zw} = 120$  MVA,
- przy czasach wyłączenia zwarcia 1 s można stosować żyłę powrotną o przekroju  $S = 16$  mm<sup>2</sup> do mocy zwarciovym  $S_{zw} = 90$  MVA, a 25 mm<sup>2</sup> do 140 MVA,
- przy czasach wyłączenia zwarcia 1,5 s można stosować żyłę powrotną o przekroju  $S = 16$  mm<sup>2</sup> do mocy zwarciovym  $S_{zw} = 70$  MVA, 25 mm<sup>2</sup> do 110 MVA, oraz 35 mm<sup>2</sup> do 150 MVA,
- przy czasach wyłączenia zwarcia 2 s można stosować żyłę powrotną o przekroju  $S = 16$  mm<sup>2</sup> do mocy zwarciovym  $S_{zw} = 60$  MVA, 25 mm<sup>2</sup> do 90 MVA, a 35 mm<sup>2</sup> do 130 MVA,

- przy dłuższych czasach wyłączenia zwarć lub większych mocach zwarciovych należy stosować żyłę powrotną przynajmniej o przekroju 50 mm<sup>2</sup>.

Na podstawie przedstawionej analizy zmiany temperatury żyły powrotnej podczas występowania zwarć dwufazowych z ziemią zmieniono obowiązującą w Energa-Operator SA specyfikację techniczną dotyczącą kabli i przewodów elektroenergetycznych SN i nn. W nowej edycji dokumentu [9] dopuszczono stosowanie kabli z żyłami powrotnymi o przekroju mniejszym niż 50 mm<sup>2</sup>. W budowie linii średniego napięcia stosuje się wyłącznie kable jednofazowe na napięcie znamionowe  $U_0/U=12/20$  kV uszczelnione wzdłużnie i promieniowo z żyłami powrotnymi miedzianymi. Dla przekroju żyły roboczej aluminiowej wielodrutowej do 70 mm<sup>2</sup> zaleca się przekroje żyły powrotnej 16 lub 25 mm<sup>2</sup>. Dla żyły roboczej o przekroju 120 lub 240 mm<sup>2</sup> żyła powrotna może mieć przekrój 25, 35 lub 50 mm<sup>2</sup>. W eksploatacji mogą być również stosowane kable o żyłach roboczych miedzianych o przekroju 240 mm<sup>2</sup> (żyły powrotne 25, 35 lub 50 mm<sup>2</sup>) i 300 mm<sup>2</sup> (żyły powrotne 35 lub 50 mm<sup>2</sup>).

Uogólniono także zasady doboru przekroju żyły powrotnej kabli przy założeniu napięcia nominalnego sieci 15 kV i czasu wyłączenia zwarcia dwufazowego na maksymalnym poziomie 1,5 s według tablicy 2.

Tablica 2. Proponowane w [9] minimalne przekroje żyły powrotnej S kabli w instalacjach elektroenergetycznych charakteryzujących się mocą zwarciovą  $S_{zw}$

moc zwarciovą $S_{zw}$ [MVA]	przekrój żyły powrotnej S [mm <sup>2</sup> ]
do 70	16
70-110	25
110 - 150	35
150 - 220	50

Podczas podejmowania ostatecznej decyzji o doborze przekroju żyły powrotnej analizuje się zastosowanie kabla w konkretnych warunkach określonych przede wszystkim parametrami aparatury zabezpieczeniowej mającej wpływ na realne czasy wyłączenia zwarć w sieci elektroenergetycznej. W większości przypadków projektanci mimo możliwości wprowadzenia mniejszego przekroju żyły powrotnej preferują dotychczas stosowane rozwiązanie z żyłą powrotną 50 mm<sup>2</sup>.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń można wskazać następujące zasady doboru przekroju żyły powrotnej kabli przy założeniu napięcia znamionowego linii

kablowej 15 kV i czasu wyłączenia zwarcia 2 – fazowego na poziomie 1,5 s:

- dla przekroju 16 mm<sup>2</sup> – moc zwarciovą do 70 MVA,
- dla przekroju 25 mm<sup>2</sup> – moc zwarciovą do 110 MVA,
- dla przekroju 35 mm<sup>2</sup> – moc zwarciovą do 150 MVA,
- dla przekroju 50 mm<sup>2</sup> – moc zwarciovą do 220 MVA.

W przypadku krótszych czasów reakcji automatyki zabezpieczeniowej należy przyjmować inne przekroje dopuszczalne zgodnie z rys. 7. Zaznacza się, że podane wartości obowiązują dla zwarć odległych (nie w pobliżu generatorów) oraz dla czasów trwania zwarcia przekraczających wartość  $t_z > 10T$ .

W przypadku krótkich odstępów czasowych pomiędzy działaniem automatyki SPZ należy rozważyć kumulację skutków cieplnych w czasie przepływu prądu zwarciovego w poszczególnych okresach wyłączenia zwarcia.

Podane w artykule wytyczne wdrożono w Energa-Operator SA dokumentem [9] dopuszczając w uzasadnionych przypadkach stosowanie przekrojów żyły powrotnej mniejszych niż 50 mm<sup>2</sup>.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. PN - HD 620 S2:2010, Kable elektroenergetyczne o izolacji wytłaczanej na napięcia znamionowe od 3,6/6 (7,2) kV do 20,8/36 (42) kV włącznie.
2. Musiał E., Ochrona od porażenia w układach IT, TT i TN. Współdziałanie dwóch różnych układów w jednej instalacji, INPE nr 162 – 163, 2013.
3. Kujszczyk Sz., Brociek St., Flisowski Z., Gryko J., Nazarko J., Zdun Z.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe. WNT Warszawa 1997.
4. PN-EN 60909-0:2016 (U) Prądy zwarciovowe w sieciach trójfazowych prądu przemiennego - Część 0: Obliczanie prądów.
5. Zasady ochrony od przepięć i koordynacja izolacji sieci elektroenergetycznych. Specyfikacje Techniczne PO-TE-1-P, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Warszawa 2001.
6. Spyra F., Dobór przekroju żyły powrotnej w kablach elektroenergetycznych, Energetyka, nr 4, 2008, str. 276 – 278.
7. Katalog firmy BV Twentsche Kabelfabriek, Twenpower, Medium – voltage XLPE Cables.
8. Katalog firmy Nexans, 6-36 kV Medium Voltage, Underground Power Cables XLPE insulated cables.
9. Załącznik nr 3 do Procedury „Standardy techniczne w ENERGA-OPERATOR SA”, w ramach procesu „Standaryzacja i prekwalfikacja materiałów i urządzeń elektroenergetycznych” w megaprocesie „Zarządzanie pracami w sieci”, Specyfikacja techniczna. Kable i przewody elektroenergetyczne SN i nn, wydanie siódme z dnia 2 sierpnia 2017.

### DETERMINING RETURN CONDUCTOR CROSS-SECTIONAL AREA IN MV CABLES

The paper presents principles of selection of the return conductor cross section in medium voltage (MV) cables with regard to single phase and two phase phases with ground short-circuits. The conducted analysis indicates the possibility of reducing the 50 mm<sup>2</sup> return conductor cross-sectional area, which was introduced for use in the distribution network in Energa Operator SA.

**Keywords:** medium voltage cables, short circuit currents, cross section of the return conductor