

Piotr GAWOR
Politechnika Śląska, Gliwice

WPŁYW NAGRZEWANIA SIĘ ŻYŁ KABLI GÓRNICZYCH NA WSPÓLCZYNNIK CZUŁOŚCI ZABEZPIECZEŃ ZWARCIOWYCH

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę nagrzewania się żył kabli pod wpływem prądów zwarciovych. Na podstawie obliczonych temperatur żył kabla podczas zwarcia dwufazowego wyznaczono współczynnik poprawkowy $c(v_k)$, pozwalający uwzględnić zmniejszenie się prądu zwarciovego powodowane nagrzewaniem się żył. Zaproponowano zasady uwzględniania nagrzewania się żył kabli podczas zwarcia w obliczeniach prądów zwarciovych do doboru zabezpieczeń.

THE IMPACT OF MINING CABLES CONDUCTORS HEATING ON THE FAULT PROTECTION SENSITIVITY RATIO

Summary. The scope of the paper is the analysis of mining cables conductors heating evoked by short circuit currents. On the basis of calculated temperatures of cable conductors during two-phase fault, a correction ratio $c(v_k)$ was derived, enabling the consideration of fault current decrease caused by heated-up cable conductors. The proposed principles of including the occurrence of cable conductors heating may be used in the calculations of short-circuit currents made in order to select proper protection systems settings.

1. Wprowadzenie

W obliczeniach minimalnego prądu zwarciovego, niezbędnego do sprawdzenia czułości zabezpieczeń zwarciovych, należy uwzględnić możliwie wszystkie zjawiska, powodujące obniżenie wartości tego prądu. Część z nich uwzględnia się w sposób zastępczy, wprowadzając do wzoru na prąd zwarciovowy współczynnik c nie większy od jedności [1, 4, 5]. Zjawiskiem nie uwzględnianym za pomocą współczynnika c jest m. in. wzrost rezystancji żył kabli, spowodowany ich nagrzewaniem się pod wpływem prądów roboczych zwarciovych. W nor-

mie [5] zaleca się obliczać rezystancję z *uwzględnieniem wpływu nagrzania przewodów prądem roboczym*. Z kolei, zgodnie z normą [4], w obliczeniach rezystancji przewodów powinna być uwzględniona *temperatura przewodu w chwili wyłączenia zwarcia*. W normie [1] zaleca się uwzględniać temperaturę żył równą 80⁰C w sieciach kopalnianych do 1 kV, i 20⁰C w sieciach o napięciu powyżej 1 kV. W literaturze można znaleźć zalecenie, aby rezystancję przewodów przy obliczaniu minimalnych prądów zwarciovych w sieciach niskonapięciowych obliczać *w temperaturze, jaka występuje w czasie zwarcia* [3].

Z przedstawionych zróżnicowanych i częściowo nieprecyzyjnych zaleceń, wynika potrzeba możliwie jednoznacznego określenia zasad przyjmowania obliczeniowej temperatury żył. Celowe jest również podanie zasad, dla których przewodów wchodzących w skład zwarciovego schematu zastępczego należy uwzględniać podwyższoną temperaturę żył.

W artykule przedstawiono uproszczoną analizę nagrzewania się żył ekranowanych kabli górniczych i ocenę wpływu tego nagrzewania na wartości prądów zwarciovych do doboru zabezpieczeń zwarciovych w typowych konfiguracjach sieci kopalnianych SN i nn.

2. Nagrzewanie się żył roboczych kabli wywołane prądami roboczymi i zwarciovymi

Zjawisko nagrzewania się żył kabli pod wpływem prądu obciążenia należy do skomplikowanych procesów, których analiza wymaga uwzględnienia wielu czynników wpływających na wartości, zmienność w czasie i rozkład temperatury poszczególnych elementów konstrukcyjnych kabla. W zagadnieniach dotyczących wpływu nagrzewania się żył kabli na wartości ich rezystancji, a w jeszcze szerszym kontekście, na działanie zabezpieczeń zwarciovych, w pierwszym przybliżeniu wystarczająca może okazać się analiza uproszczona. Wynikiem takiej analizy powinno być m. in. rozważenie celowości przeprowadzenia analizy bardziej szczegółowej, a więc rezygnacji z przyjętych wstępnie założeń upraszczających.

Jednym z przybliżonych sposobów obliczania temperatury żył kabli nagrzewanych prądami zwarciovymi może być wykorzystanie wzoru [2]:

$$k_d \cdot \frac{I_z^2 \cdot T_k}{s_0^2} = \frac{c \cdot \delta}{\alpha_0 \cdot \rho_0} \cdot \ln \frac{1 + \alpha_0 \cdot \vartheta_k}{1 + \alpha_0 \cdot \vartheta_{pk}}, \quad (1)$$

w którym

k_d – współczynnik strat dodatkowych, I_z – prąd zwarciovy, T_k – czas trwania zwarcia, s_0 – przekrój żył roboczych w temperaturze 0⁰C, c – ciepło właściwe materiału żył, δ – gęstość

materiału żył, α_0 – współczynnik cieplny zmian rezystywności materiału żył, ρ_0 – rezystywność materiału żył w temperaturze 0°C , v_k – temperatura żył po czasie T_k , v_{pk} – temperatura początkowa żył (w chwili wystąpienia zwarcia).

Współczynnik strat dodatkowych, wywołanych wpływem zmiennych pól magnetycznych na rozkład gęstości prądu w żyłce kabla i ew. występowanie strat w materiałach ferromagnetycznych, można w uproszczonych rozważaniach przyjąć równy jeden niezależnie od rzeczywistej temperatury przewodu [2].

Prąd zwarciový zmienia się oczywiście w czasie, a ilość ciepła, jakie wydzieli się w żyłkach kabla, zależy w znacznej mierze od czasu trwania zwarcia. Czas trwania zwarcia zależy od czasu działania zabezpieczenia oraz od czasu własnego wyłącznika przy otwieraniu i czasu łukowego. Łącznie czas trwania zwarcia w przypadku zabezpieczenia bezzwłocznego, a więc w sieciach niskonapięciowych, w sieciach przodkowych o napięciu 3,3 kV oraz w sieciach SN w pomieszczeniach niebezpiecznych pod względem wybuchowym, nie przekracza ok. 0,1 s. W przypadku zabezpieczeń zwłoczných czas T_k jest w przybliżeniu równy czasowi nastawy zabezpieczenia. W sieciach SN, w pomieszczeniach bezpiecznych pod względem wybuchowym, czasy trwania zwarcia nie przekraczają 0,6 s do 1,6 s [5]. Im dłuższy czas trwania zwarcia, tym mniejszy udział w ilości ciepła wydzielonego w przewodzie ma składowa nieokresowa prądu zwarciový, czyli tym bardziej zastępczy prąd zwarciový cieplny zbliżony jest do wartości prądu początkowego. W rozważaniach uproszczonych można zatem we wzorze (1) uwzględnić wartość prądu początkowego.

Przekrój żył, ciepło właściwe materiału żył oraz współczynnik cieplny zmian rezystywności materiału żył są w ogólnym przypadku funkcjami temperatury, ale w rozważaniach przybliżonych można przyjąć średnie wartości stałe [2].

Po przekształceniu wzoru (1) i uwzględnieniu, że $I_z = I_k$, otrzymamy uproszczoną postać, z której wyznaczyć można temperaturę żył przewodu po czasie T_k :

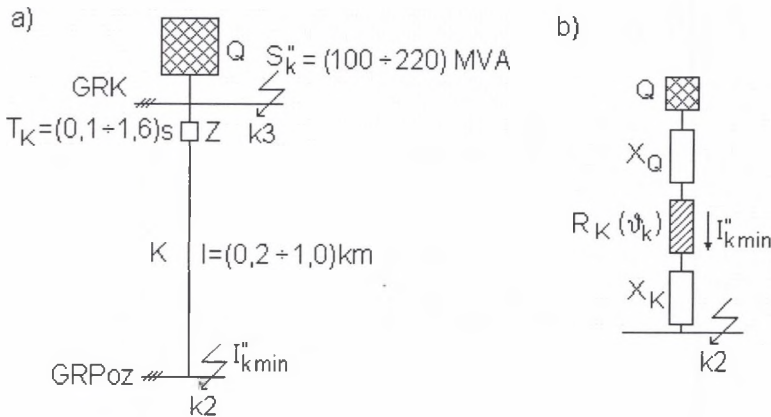
$$\vartheta_k = \left(\frac{1}{\alpha_0} + \vartheta_{pk} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{\alpha_0 \cdot \rho_0 \cdot (I_k'')^2}{c \cdot \delta \cdot s^2} \cdot T_k - 1 \right) \right] - \vartheta_{pk} \quad (2)$$

Przyjmując dla kabli z żyłami miedzianymi: $\alpha_0 = 0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\rho_0 = 0,0185 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, $\delta = 8,89 \text{ g/cm}^3$, $c = 0,39 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$, wprowadzając gęstość prądu zwarciový, wyrażoną w kA/mm^2 wzór (2) można napisać w postaci:

$$\vartheta_k = (250 + \vartheta_{pk}) \cdot \left[\exp \left(21,343 \cdot (J_k'')^2 \cdot T_k - 1 \right) \right] - \vartheta_{pk} \quad (3)$$

Korzystając ze wzoru (3), przeprowadzono obliczenia temperatury żył górniczych kabli szybowych ekranowanych przyłączonych do szyn głównej rozdzielniczy kopalnianej GRK (rys. 1a), przyjmując następujące założenia:

- moc zwarciowa na szynach GRK – $S_k'' = (100 \div 220) \text{ MVA}$,
- czas trwania zwarcia – $T_k = (0,1 \div 1,6) \text{ s}$,
- przekroje żył kabli szybowych: 120 mm^2 , 150 mm^2 , 185 mm^2 i 240 mm^2 , przy czym przy poszczególnych mocach zwarciowych uwzględniano tylko te przekroje, dla których zachowana jest wytrzymałość cieplna zwarciowa przy zwarciu trójfazowym na początku kabla,
- temperatura żył w chwili wystąpienia zwarcia równa jest temperaturze dopuszczalnej długotrwale (dla izolacji z polietylenu usieciowanego – $v_{pk} = 90^\circ\text{C}$),
- prąd zwarciowy równy jest minimalnemu prądowi zwarcioowemu do sprawdzania czułości zabezpieczeń zwarciowych, obliczonemu wg normy [5].



Rys. 1. Fragment sieci zakładu górniczego zawierający kabel szybowy (a) i odpowiadający mu schemat zastępczy obwodu zwartego przy zwarciu dwufazowym (b)

Fig. 1. Part of coal mine power supply network containing a shaft cable (a) and the equivalent circuit diagram of a short circuit under two-phase fault (b)

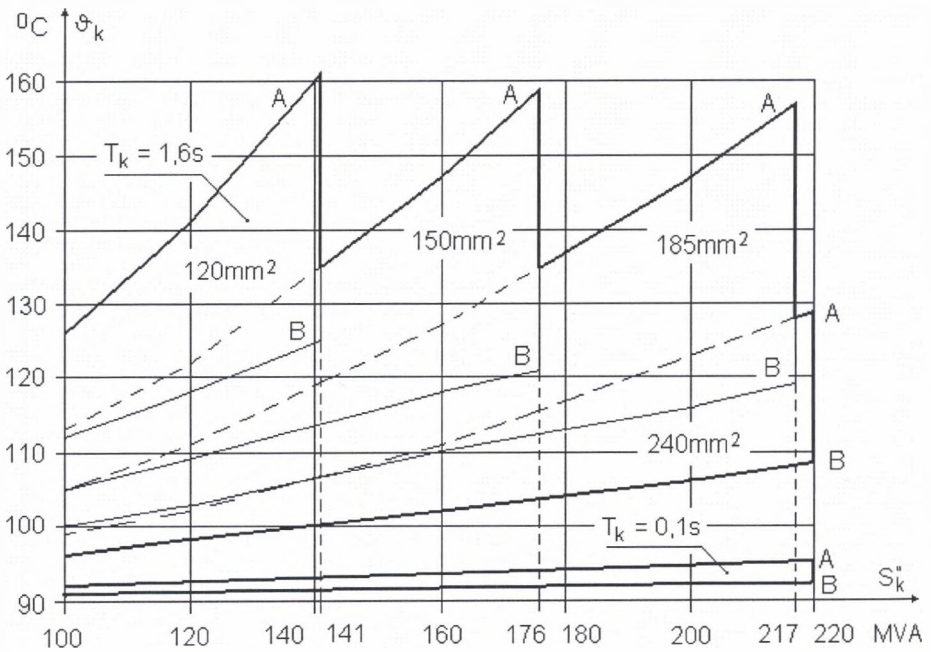
Wybrane wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2, ograniczając się do dwóch czasów trwania zwarcia: $T_k = 1,6 \text{ s}$ i $T_k = 0,1 \text{ s}$.

Z obliczeń wynikają następujące ważniejsze wnioski:

- a) najwyższe spodziewane temperatury żył kabli szybowych nie przekroczą 161°C (kabel o przekroju żył 120 mm^2 , długości 200 m , przy czasie trwania zwarcia $1,6 \text{ s}$),
- b) w dłuższych kablach temperatura żył podczas zwarcia będzie znacząco niższa niż w kablach krótkich,

c) w przypadku bezzwłocznego działania zabezpieczeń zwarciovych ($T_k \leq 0,1s$) przyrosty temperatur żył będą znikome ($\Delta v_k \leq 5^{\circ}C$).

Podobne obliczenia wykonano dla kabli zasilających przewoźne stacje transformatorowe (rys.3a) i dla kabli niskonapięciowych oraz o napięciu 3,3 kV, zasilających odbiorniki przodkowe (rys.4a). W obliczeniach uwzględniono typowe stacje transformatorowe o mocach 1000 kVA (zasilające sieci o napięciu 1 kV) i 1500 kVA (zasilające sieci o napięciu 3,3 kV) oraz kable w izolacji z polietylenu usieciowanego o przekrojach od 70 mm^2 do 185 mm^2 i długościach od 200m do 1000 m.

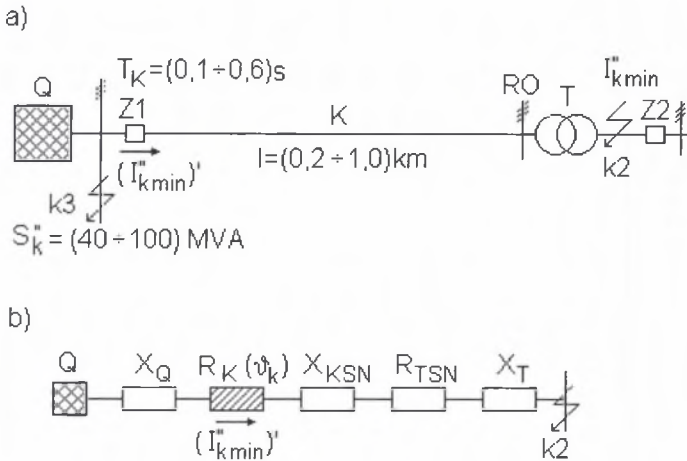


Rys. 2. Obliczeniowe wartości temperatury żył kabli szybowych nagrzanych minimalnym prądem zwarciovym. A - dla kabli o długości 200 m, B - dla kabli o długości 1000 m

Fig. 2. The calculated values of the temperature of shaft cable conductors heated up by minimal fault current. A - for cables with the length up to 200 m, B - for 1000 m cables

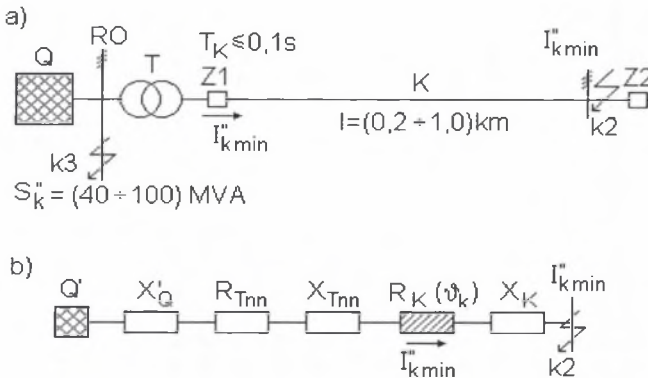
Czasy trwania zwarcie przyjęto 0,1s i 0,6s dla kabli zasilających przewoźne stacje transformatorowe oraz 0,1s w sieciach zasilających maszyny przodkowe. W żadnym z rozpatrywanych przypadków temperatura żył zabezpieczanego kabla nie przekroczyła $92^{\circ}C$ (przy temperaturze początkowej równej $90^{\circ}C$).

Na rysunkach przedstawiających schematy zastępcze obwodów zwartych przy zwarceniu dwufazowym zakreślono rezystancję, dla której uwzględniano zmianę wartości spowodowaną nagrzewaniem się pod wpływem prądu zwarciovego.



Rys. 3. Fragment sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego zawierający kabel zasilający przewoźną stację transformatorową (a) i odpowiadający mu schemat zastępczy obwodu zwartego przy zwarceniu dwufazowym (b)

Fig. 3. Part of power supply network in a coal mine containing a cable supplying a movable transformer station (a) and the equivalent circuit diagram of a short circuit under two-phase fault (b)



Rys. 4. Fragment sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego zawierający kabel zasilający maszyny przodkowe (a) i odpowiadający mu schemat zastępczy obwodu zwartego przy zwarceniu dwufazowym (b)

Fig. 4. Part of power supply network in a coal mine containing a cable supplying face machines (a) and the equivalent circuit diagram of a short circuit under two-phase fault (b)

3. Wpływ nagrzania przewodu na wartość prądu zwarciovego i wartość współczynnika czułości zabezpieczenia zwarciovego

Nagrzanie żył roboczych zabezpieczanych kabli przyczynia się do wzrostu impedancji zastępczej obwodu zwartego, a więc i zmniejszenia prądu zwarciovego. W celu dokonania wstępnej oceny zakresu przewidywanych zmian prądu zwarciovego przyjęto założenia upraszczające:

- żyły kabla w chwili wystąpienia zwarcia dwufazowego na końcu strefy zabezpieczanej mają temperaturę równą temperaturze dopuszczalnej długotrwale,
- prąd zwarciovowy w czasie trwania zwarcia ma wartość skuteczną stałą, równą prądowi początkowemu obliczonemu zgodnie z normą [5],
- rezystancja żył kabli ma podczas trwania zwarcia wartość stałą, wynikającą z temperatury w chwili wyłączenia zwarcia (v_k).

Wpływ nagrzania żył kabla pod wpływem prądu zwarciovego uwzględnić można zastępczo wprowadzając do wzoru, wg którego oblicza się minimalny prąd zwarciovowy do doboru zabezpieczeń dodatkowy współczynnik $c(v_k)$:

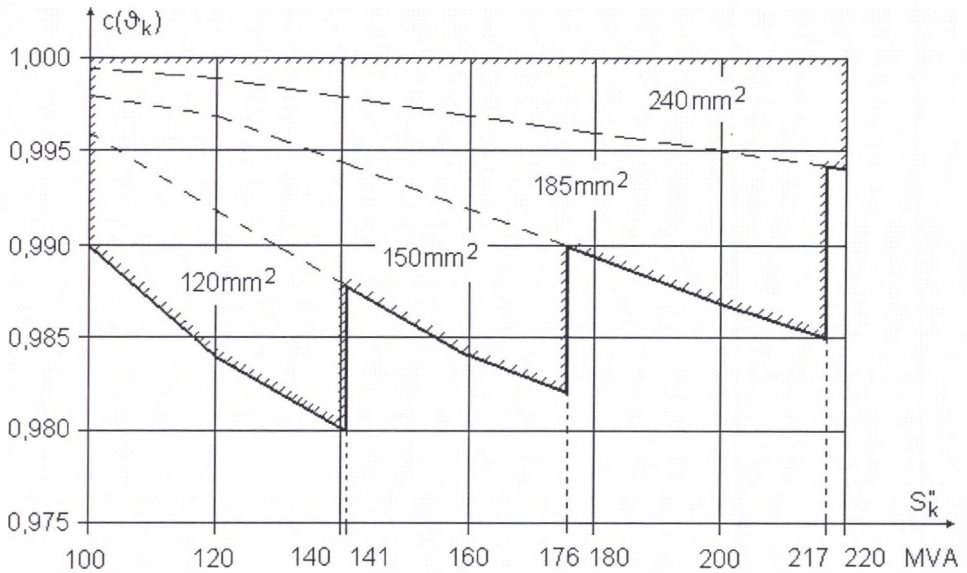
$$I_{\min} = \frac{c(\vartheta_k) \cdot c \cdot U_n}{2 \cdot \sqrt{(R_z + R)^2 + (X_z + X)^2}} \quad (4)$$

Wartość tego współczynnika zależała będzie od temperatury żył kabli oraz od udziału rezystancji w impedancji zastępczej obwodu zwartego. Zakładając, że wzrost rezystancji żył uwzględnia się tylko dla kabla zabezpieczanego, wartości współczynnika poprawkowego, przykładowo dla kabli szybowych (rys.1b), obliczyć można wg wzoru:

$$c(\vartheta_k) = \frac{I_{\min}(\vartheta_k)}{I_{\min}(\vartheta_{pk})} = \sqrt{\frac{[R_K(\vartheta_{pk})]^2 + (X_Q + X_K)^2}{[R_K(\vartheta_k)]^2 + (X_Q + X_K)^2}}, \quad (5)$$

Przyjmując wyznaczone wcześniej temperatury żył kabli obliczono wartości współczynnika poprawkowego. Dla kabli szybowych wartości tego współczynnika przedstawiono na rys.5, ograniczając się do wartości najmniejszych, odpowiadających czasowi trwania zwarcia $T_k = 1,6$ s i długości kabla 1000m. Przy krótszych czasach trwania zwarcia współczynnik poprawkowy przyjmuje wartości:

- dla $T_k = 1,0$ s $\rightarrow c(v_k) \geq 0,988$,
- dla $T_k = 0,6$ s $\rightarrow c(v_k) \geq 0,993$,
- dla $T_k = 0,1$ s $\rightarrow c(v_k) \geq 0,999$.



Rys. 5. Obszar występowania obliczeniowych wartości współczynnika $c(v_k)$ uwzględniającego wpływ nagrzania prądem zwarciovym żył kabli szybowych na wartość minimalnego prądu zwarciovego do doboru zabezpieczeń

Fig. 5. Zone of the occurrence of the calculated values of $c(v_k)$ ratio considering the impact of conductors in shaft cables heated by fault current on the value of minimal fault current required for the selection of proper protection systems

Dla kabli zasilających przewoźne stacje transformatorowe oraz kabli zasilających maszyny przodkowe (napięciem 1 kV lub 3,3 kV), współczynnik uwzględniający wpływ nagrzewania prądem zwarciovym jest praktycznie równy jeden.

Konsekwencją nagrzewania się żył kabli prądem zwarciovym jest obniżenie wartości prądu zwarciovego, a więc i możliwość obniżenia współczynnika czułości zabezpieczenia. Uwzględniając, że we wzorze (4) współczynnik c dla kabli średniego napięcia ma wartość 0,9, iloczyn $c \cdot c(v_k)$, będzie miał wartości przedstawione w tabelicy 1.

Tablica 1

Obliczeniowe wartości iloczynu $c \cdot c(v_k)$
dla różnych czasów trwania zwarcia (kable szybowe)

T_k	1,6s	1,0s	0,6s	0,1s
$c \cdot c(v_k)$ – por. wzór (5)	$\geq 0,887$	$\geq 0,889$	$\geq 0,894$	$\geq 0,899$

Praktycznie zatem, biorąc pod uwagę dokładność obliczeń prądów zwarciovych, współczynnik czułości zmieni się w sposób nieistotny.

4. Proponowane zasady uwzględniania nagrzewania się przewodów w obliczeniach prądów zwarciovych do doboru zabezpieczeń

Przedstawione wyniki obliczeń oparte są na analizie przeprowadzonej w sposób uproszczony. Jednym z celów tej analizy było sprawdzenie, czy potrzebna jest analiza bardziej szczegółowa. Większość przyjętych dotąd założeń upraszczających powoduje zawyżenie spodziewanych temperatur żył kabla podczas zwarcia, a więc i obniżenie obliczeniowych wartości współczynnika poprawkowego $c(u_k)$. Skutku odwrotnego należy upatrywać tylko w odniesieniu do dwóch założeń:

- 1) przyjęcie, że prąd zwarciovych powodujący nagrzewanie żył kabla jest równy prądowi zwarciovemu początkowemu ($I_{th} = I_k''$),
- 2) założenie, że jedynym kablem, którego rezystancja żył wzrasta pod wpływem prądu zwarciovego, jest kabel zabezpieczany (por. rys. 1b, 3b, 4b i wzór (6)).

Za dopuszczalnością pierwszego założenia przemawia fakt, że przy stosunkowo długich czasach trwania zwarcia ($T_k > 1,0s$), wartość współczynnika m uwzględniającego udział składowej nieokresowej w skutkach cieplnych jest, dla realnych wartości stosunku R/X w schemacie zastępczym, bliska zeru [4]. Z kolei, dla krótkich czasów trwania zwarcia efekt nagrzewania się żył jest znacznie mniejszy i nawet przy uwzględnieniu wzrostu obliczeniowego prądu zwarciovego ($I_{th} > I_k''$) wpływ na obniżenie współczynnika poprawkowego $c(u_k)$ będzie pomijalny.

Założenie drugie jest słuszne, gdy w schemacie zastępczym obwodu zwartego sieci, z której zasilany jest zabezpieczany kabel, nie zawiera innych przewodów, których żyły nagrzewane są prądami zwarciovymi. W rzeczywistości takie kable są i ich rezystancja również ulega zwiększeniu. W efekcie wartość obliczeniowego prądu zwarciovego może okazać się większa niż w rzeczywistości i w celu obliczenia współczynnika uwzględniającego wpływ nagrzewania trzeba będzie zastosować zmodyfikowany wzór (5), dostosowany każdorazowo do konkretnej sytuacji. Uwzględniając jednak fakt, że ze względu na rozptył prądów zwarciovych w sieci (nieraz trudny do określenia) efekt nagrzewania się będzie mniejszy niż w kablu zabezpieczanym, należy się spodziewać nieznacznych tylko różnic w ostatecznym wyniku.

Podsumowując, zaproponować można następujące zasady uwzględniania nagrzewania się żył kabli przy obliczeniach minimalnych prądów zwarciovych do doboru zabezpieczeń:

- a) wzrost rezystancji żył kabli należy uwzględniać zasadniczo tylko w odniesieniu do kabla zabezpieczanego; w szczególnych przypadkach sieci promieniowych, gdy możliwe jest

jednoznaczne obliczenie wartości prądów zwarciovych płynących przez kable bliższe źródła zasilania, należy uwzględnić efekt nagrzewania również dla tych kabli,

- b) wystarczająco dokładnym sposobem uwzględnienia nagrzewania się żył kabla podczas zwarcia jest przyjęcie w obliczeniach ich rezystancji temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale dla materiału izolacji; spodziewany błąd nie przekroczy wówczas ok. 1,5%.

5. Wnioski

1. Przeprowadzona uproszczona analiza nagrzewania się żył kabli pod wpływem prądu zwarciovego umożliwia sformułowanie zasad obliczania rezystancji kabli przy obliczaniu minimalnych prądów zwarciovych do sprawdzania czułości zabezpieczeń.
2. Największych efektów wzrostu rezystancji żył należy się spodziewać w odniesieniu do kabli szybowych posiadających zabezpieczenia zwarciove zwłoczne.
3. Przy doborze zabezpieczeń zwarciovych kabli zasilających przewoźne stacje transformatorowe oraz zasilających odbiorniki przodkowe napięciem do 1 kV lub 3,3 kV, przyrost temperatury żył wywołany prądem zwarciovym jest pomijalny.
4. Najprostszym i wystarczająco dokładnym sposobem uwzględnienia nagrzewania się żył kabli pod wpływem prądu zwarciovego, jest przyjęcie w obliczeniach rezystancji kabli temperatury równej temperaturze granicznej dopuszczalnej długotrwale.
5. Przedstawione w artykule wyniki obliczeń dotyczą górniczych kabli ekranowanych, pracujących w typowych warunkach sieci kopalnianych. Należy się spodziewać, że dla innych typów kabli wyniki będą bardzo podobne.

LITERATURA

1. DIN VDE 0118 Teil 2/09.90 Errichten elektrischer Anlagen in Bergbau unter Tage. Zusatzfestlegungen für Starkstromanlagen.
2. Kurdziel R.: Działania cieplne i dynamiczne prądów zwarciovych. PWT, Warszawa 1957.
3. Markiewicz H.: Urządzenia elektroenergetyczne. WNT, Warszawa 2001.
4. PN-EN 60909-0:2002 (U) Prądy zwarciove w sieciach trójfazowych prądu przemiennego – Część 0: Obliczanie prądów.

5. PN-G-42042:1998 Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej-Zabezpieczenia zwarciove i przeciążeniowe-Wymagania i zasady doboru.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

Abstract

The scope of the paper is a simplified analysis of mining cables conductors heating evoked by minimal short-circuit currents calculated to test the sensitivity of fault protection systems. On the basis of calculated temperatures of cable conductors during two-phase fault, correction ratio $c(v_k)$ was derived, enabling the consideration of fault current decrease caused by heated-up cable conductors. The value of this ratio for typical shaft cables is not lower than 0.985; whereas it practically equals 1 for medium-voltage cables supplying movable transformer stations and cables supplying face machines with the voltage up to 3.3 kV. The following principles were proposed for considering heated-up cable conductors in the calculations of short-circuit currents made in order to select proper protection systems settings:

- a) the rise of the resistance of cable conductors should in fact be considered only in the case of the protected cable,
- b) the assumption of boundary long-term acceptable temperature on basis for the insulation material used in the calculations of the resistance of conductors is a sufficient method of considering the heating up of conductors during faults; the expected error does not exceed 1,5 %.