

# Dobór przekroju żyły powrotnej w kablach elektroenergetycznych

Franciszek Spyra, ZPBE Energopomiar – Elektryka, Gliwice  
Marian Urbańczyk, Instytut Fizyki Politechnika Śląska, Gliwice

## 1. Wstęp

Zagadnienie poprawnego doboru przekroju żyły powrotnej w kablach elektroenergetycznych jest w Polsce mało znane. W nowo wybudowanych liniach kablowych o napięciu znamionowym 110 kV można spotkać przypadki, gdzie żyły powrotne w normalnych warunkach zwarciovych nagrzewają się do temperatury wielokrotnie przekraczającej wartość dopuszczalną. W artykule przedstawiono analizę problemu adiabatycznego nagrzewania żyły powrotnej kabla prądem zwarciovym. Wyniki zilustrowano przykładami zaczerpniętymi z praktyki inżynierskiej.

## 2. Nagrzewanie żyły prądem zwarciovym

Zjawisko nagrzewania żyły powrotnej prądem zwarciovym można z dobrym przybliżeniem traktować jako zjawisko adiabatyczne, zaniedbując wymianę do otoczenia powstającego ciepła w żyły powrotnej. Jest to dopuszczalne z uwagi na krótko trwające nagrzewanie prądem zwarciovym, zwykle nie przekraczające 200 – 500 ms. Niezwykle istotną sprawą jest uwzględnienie zmiany rezystancji żyły powrotnej podczas wzrostu jej temperatury. Przy zmianach temperatury o kilkaset stopni można założyć liniową zależność rezystancji od temperatury.

### 2.1 Obliczenie temperatury końcowej żyły powrotnej

Przyjmując liniową zależność rezystancji od temperatury:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

gdzie:  $R_0$  – rezystancja żyły w temperaturze  $T_0$  (20 °C),  $\alpha$  - temperaturowy współczynnik zmian rezystancji w temperaturze 20 °C,  $R$  – rezystancja żyły w temperaturze  $T$ ,

można zapisać równanie bilansu ciepła dla zjawiska adiabatycznego w postaci:

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

gdzie:  $I$  – natężenie prądu zwarcia,  $t$  – czas trwania zwarcia,  $T_1$  – temperatura żyły w chwili  $t=0$ ,  $T$  – temperatura żyły po czasie  $t$ ,  $c$  – ciepło właściwe materiału żyły,  $m$  – masa żyły powrotnej.

Wykonując operacje całkowania w równaniu (2) oraz przyjmując  $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  otrzymamy wyrażenie określające temperaturę końcową  $T$  w  $^{\circ}\text{C}$ :

$$T = 20 + \frac{[1 + \alpha(T_1 - 20)]e^{\frac{I^2 R_0 \alpha}{c m} t} - 1}{\alpha} \quad (3)$$

Przyjmując, że:

$$R_0 = \frac{l}{\gamma S} \quad \text{oraz} \quad m = d l S \quad (4)$$

wyrażenie (3) zapiszemy w postaci:

$$T = 20 + \frac{[1 + \alpha(T_1 - 20)]e^{\frac{I^2 \alpha}{c \gamma d S^2} t} - 1}{\alpha} \quad (5)$$

gdzie:  $\gamma$  - elektryczna przewodność właściwa materiału żyły,  $d$  – gęstość materiału żyły,  $S$  – przekrój żyły powrotnej,  $I$  - natężenie ustalonego prądu zwarcowego,  $l$  – długość żyły.

Wprowadzając wielkość  $K_1$  zdefiniowaną następująco:

$$K_1 = \frac{\alpha}{c \gamma d} \cdot 10^6 \quad (6)$$

Wyrażenie (5) przyjmie postać:

$$T = 20 + \frac{[1 + \alpha(T_1 - 20)]e^{K_1 \frac{I^2}{S^2} t} - 1}{\alpha} \quad (7)$$

gdzie: natężenie prądu zwarcowego  $I$  należy podać w kA, a przekrój poprzeczny  $S$  żyły powrotnej w  $\text{mm}^2$ .

Wartości stałych materiałowych  $K_1$  dla żyły miedzianej i aluminiowej podano w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości materiałów przewodowych w temp.  $20^{\circ}\text{C}$  [1]

	Miedź	Aluminium
$\alpha [K^{-1}]$	0,0039	0,0040
$c [J g^{-1} K^{-1}]$	0,384	0,920
$d [g cm^{-3}]$	8,93	2,70
$\gamma [m\Omega^{-1} mm^{-2}]$	57,0	34,8
$K_1 [mm^4 A^{-2} s^{-1}]$	<b>19,95</b>	<b>46,27</b>
$K_2 [mm^2 A s^{-1/2}]$	<b>4,47</b>	<b>6,80</b>

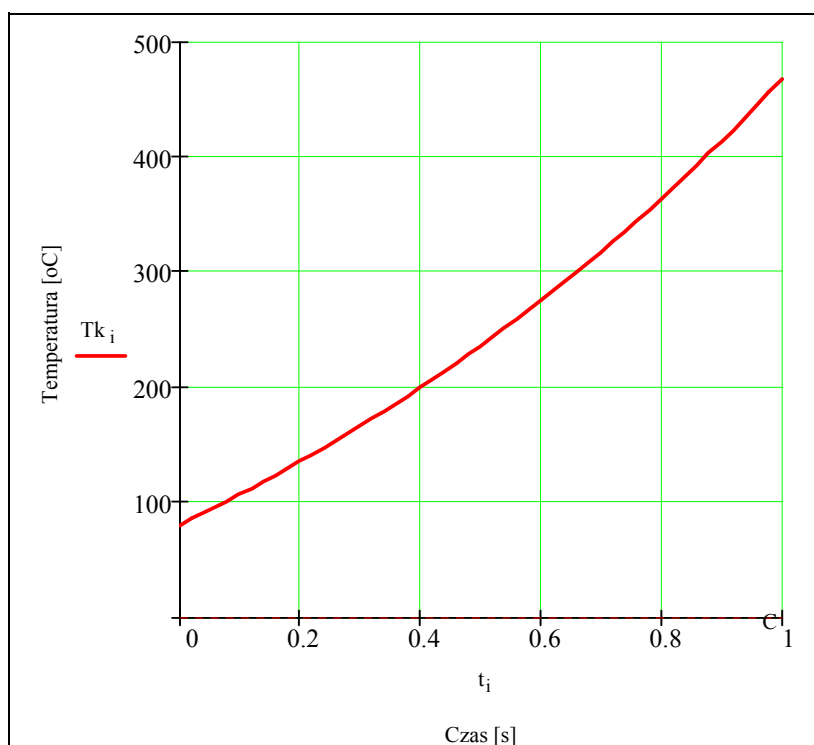
Przykład 1:

Założmy, że wartość prądu zwarcowego  $I=10$  kA, przekrój miedzianej żyły powrotnej  $S=50\text{ mm}^2$ , temperatura kabla w chwili zwarcia  $T_1=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Obliczone temperatury żyły zestawiono w tabeli 2 i na rys.1 i 2.

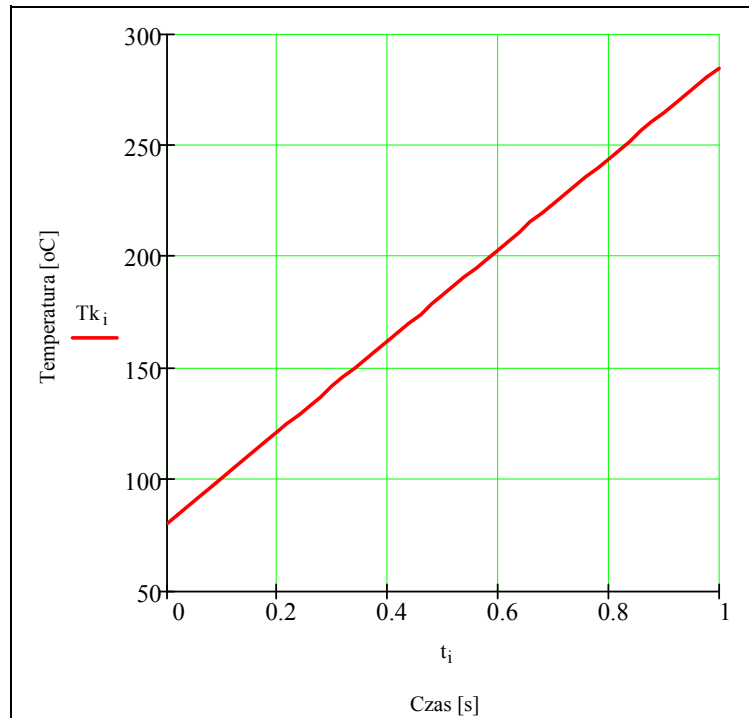
Tabela 2. Temperatura żyły powrotnej

t sek	T °C	t sek	T °C	t sek	T °C
0	80	0.36	185	0.72	326
0.02	85	0.38	192	0.74	335
0.04	90	0.40	199	0.76	344
0.06	96	0.42	206	0.78	353
0.08	101	0.44	213	0.8	363
0.10	106	0.46	220	0.82	372
0.12	112	0.48	228	0.84	382
0.14	117	0.50	235	0.86	392
0.16	123	0.52	243	0.88	402
0.18	129	0.54	250	0.9	413
0.20	135	0.56	258	0.92	423
0.22	141	0.58	266	0.94	434
0.24	147	0.60	274	0.96	444
0.26	153	0.62	283	0.98	455
0.28	159	0.64	291	1	466
0.30	166	0.66	299		
0.32	172	0.68	308		
0.34	179	0.7	317		



Rys. 1 Temperatura żyły powrotnej

W przypadku nieuwzględnienia zmian rezystancji żyły z temperaturą, temperatura żyły będzie niższa, co przedstawiono na rys.2.



Rys. 2 Temperatura żyły powrotnej przy stałej rezystancji

## 2.2 Obliczenie dopuszczalnego prądu zwarcowego dla danego przekroju żyły i czasu trwania zwarcia

Z wyrażenia (5) obliczymy wartość dopuszczalnego prądu zwarcowego  $I$ , nagrzewającego żyłę powrotną od temperatury  $T_1$  do temperatury  $T_k$  (zwykle przyjmuje się od 80 °C do 350 °C dla kabla o izolacji XLPE) i czasu trwania zwarcia  $t$ :

$$I = \sqrt{\frac{c \gamma d S^2}{\alpha t} \ln \frac{1 + \alpha(T_k - 20)}{1 + \alpha(T_1 - 20)}} \quad (8)$$

lub

$$I = \frac{S}{K_2} \sqrt{\frac{1}{t} \ln \frac{1 + \alpha(T_k - 20)}{1 + \alpha(T_1 - 20)}} \quad (9)$$

gdzie:

$$K_2 = \sqrt{K_1} \quad (10)$$

oraz  $t$  – czas trwania zwarcia w sek.,  $S$  – przekrój żyły powrotnej w mm<sup>2</sup>,  $T_k$  – temperatura końcowa (350°C dla izolacji XLPE),  $T_1$  – temperatura początkowa żyły w chwili  $t = 0$  (zwykle 80°C),  $I$  – dopuszczalny prąd zwarcowy w kA.

Wartości  $K_1$  i  $K_2$  dla żyły wykonanej z miedzi i aluminium podano w tabeli 1.

#### Przykład 2:

Obliczmy dopuszczalną wartość prądu zwarciovego o czasie trwania  $t = 0,4$  sek. dla miedzianej żyły powrotnej, o przekroju  $S = 50 \text{ mm}^2$ . Korzystając z wyrażenia (9) i danych zawartych w tabeli 1 oraz zakładając temperaturę początkową w chwili zwarcia  $T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  i temperaturę końcową  $T_k = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  otrzymamy:  $I = 13,9 \text{ kA}$ .

### **2.3. Obliczenie wymaganego minimalnego przekroju żyły powrotnej dla danego prądu zwarciovego i czasu trwania zwarcia**

Z wyrażenia (5) obliczymy wartość wymaganego minimalnego przekroju żyły powrotnej dla prądu zwarciovego  $I$ , nagrzewającego żyłę powrotną od temperatury  $T_1$  do temperatury  $T_k$  (zwykle przyjmuje się od  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  dla kabla o izolacji XLPE) i czasu trwania zwarcia  $t$ :

$$S = \sqrt{\frac{I^2 \alpha t}{c \gamma d \ln \frac{1 + \alpha(T_k - 20)}{1 + \alpha(T_1 - 20)}}} \quad (11)$$

lub

$$S = I K_2 \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{1 + \alpha(T_k - 20)}{1 + \alpha(T_1 - 20)}}} \quad (12)$$

W równaniu (12) prąd zwarciovowy  $I$  wyrażony jest w kA, przekrój żyły powrotnej  $S$  w  $\text{mm}^2$ , a czas trwania zwarcia  $t$  w sek.

Korzystając z podanych zależności można poprawnie dobrać przekrój żyły powrotnej dla zadanych warunków zwarciovych. Jedynym założeniem jest przyjęcie zjawiska nagrzewania jako adiabatycznego, co w praktyce oznacza brak wymiany z otoczeniem ciepła wydzielonego w żyłę. Jest to dopuszczalne w warunkach zwarciovych, gdy czas działania prądu zwarciovego jest krótki. Niedopuszczalne jest natomiast założenie stałej wartości rezystancji żyły podczas nagrzewania (por. rys. 1 i 2). Efekty cieplne w obydwu przypadkach są znacząco różne.

### Przykład 3:

Dobrać przekrój miedzianej żyły powrotnej dla warunków zwarciovych: ustalony prąd zwarcia  $I = 40$  kA, czas trwania zwarcia  $t = 0,6$  sek., temperatura żyły w chwili wystąpienia zwarcia  $T_1 = 80$  °C, maksymalna dopuszczalna temperatura żyły  $T_k = 350$  °C.

Korzystając z wyrażenia (12) i danych zawartych w tabeli 1 wyznaczmy minimalny przekrój żyły powrotnej  $S = 176,2$  mm<sup>2</sup>. Po zaokrągleniu obliczonego wyniku wymagany przekrój żyły powrotnej wynosi 177 mm<sup>2</sup>.

### Przykład 4:

Dobrać przekrój miedzianej żyły powrotnej dla warunków zwarciovych: ustalony prąd zwarcia  $I = 26,969$  kA, czas trwania zwarcia  $t = 0,1$  sek., temperatura żyły w chwili wystąpienia zwarcia  $T_1 = 80$  °C, maksymalna dopuszczalna temperatura żyły  $T_k = 350$  °C.

Korzystając z wyrażenia (12) i danych zawartych w tabeli 1 wyznaczmy minimalny przekrój żyły powrotnej  $S = 48,5$  mm<sup>2</sup>. Po zaokrągleniu obliczonego wyniku wymagany przekrój żyły powrotnej wynosi 50 mm<sup>2</sup>.

## **3. Podsumowanie**

Podane zależności teoretyczne umożliwiają łatwe i szybkie obliczenie podstawowych parametrów: temperatury żyły powrotnej podczas zwarcia, dopuszczalnego prądu zwarcia dla danego przekroju żyły i czasu trwania zwarcia oraz wymaganego przekroju żyły dla danego prądu zwarciovego i czasu trwania zwarcia.

Przykłady podane wyżej zostały zaczerpnięte z praktyki inżynierskiej.

## **Literatura**

[1] Poradnik inżyniera elektryka, WNT Warszawa 1968, Wyd. II, Praca zbiorowa pod. kier. B. Konarskiego, str.196.