

ANALIZA NAPIĘĆ INDUKOWANYCH W ŻYŁACH POWROTNYCH KABLI WYSOKIEGO NAPIĘCIA DLA ICH WYBRANYCH KONFIGURACJI

Stanisław CZAPP¹, Krzysztof DOBRZYŃSKI², Jacek KLUCZNIK³, Zbigniew LUBOŚNY⁴

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-13-98 e-mail: stanislaw.czapp@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-17-98 e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.gda.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-17-98 e-mail: jacek.klucznik@pg.gda.pl
4. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-16-41 e-mail: zbigniew.lubosny@pg.gda.pl

Streszczenie: W żyłach powrotnych kabli wysokiego napięcia mogą indukować się znaczne napięcia względem ziemi przy przepływie prądów roboczych oraz prądów zwarciovych, co zagraża porażeniem i/lub uszkodzeniem zewnętrznej powłoki kabla. Wartości tych napięć zależą od sposobu ułożenia i długości kabli, sposobu uziemienia ich żył powrotnych, wartości prądu w żyłach roboczych, a także transpozycji żył roboczych i powrotnych. W artykule przedstawiono analizę napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli dla układu z jednym kablem na fazę oraz dla układu z trzema kablami na fazę. Rozważano uziemienie jednostronne kabli, uziemienie dwustronne kabli, transpozycję żył powrotnych oraz transpozycję żył roboczych. Analiza wykazała, że powyższe czynniki mają znaczący wpływ na wartości napięć indukowanych, i w praktyce konieczne jest wykonanie zaawansowanych obliczeń, pozwalających na wybór optymalnej konfiguracji dla danej linii kablowej.

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne, napięcia indukowane, żyły powrotne.

1. WSTĘP

Zasilanie centrów miast coraz częściej realizuje się z wykorzystaniem linii kablowych o napięciu 110 kV. W przypadku gęstej zabudowy miejskiej jest to praktycznie jedyny akceptowany sposób dostarczania mocy. Przy niezaprzeczalnych wielu zaletach w stosunku do zasilania linią napowietrzną, wykorzystanie kabli ma jednak istotną wadę – napięcia indukowane w ich żyłach powrotnych [1-6].

Prąd obciążenia płynący w żyłach roboczych kabla indukuje napięcie w jego współosiowej żyłach powrotnych. Dla dowolnego układu trzech kabli jednożyłowych w systemie trójfazowym, napięcia indukowane w żyłach powrotnych poszczególnych faz można określić następująco:

$$\underline{U}_{L1p} = j\omega \cdot \underline{I} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2D_{s1-2}^2}{d \cdot m_{s1-2}} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2D_{s1-3}}{d} \right) \right] \quad (1)$$

$$\underline{U}_{L2p} = j\omega \cdot \underline{I} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4m_{s1-2} \cdot D_{s2-3}}{d^2} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{D_{s2-3}}{D_{s1-2}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\underline{U}_{L3p} = j\omega \cdot \underline{I} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2D_{s2-3}^2}{d \cdot D_{s1-3}} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2D_{s1-3}}{d} \right) \right] \quad (3)$$

gdzie: U_{L1p} , U_{L2p} , U_{L3p} – napięcia indukowane w żyłach powrotnych kabli odpowiednio fazy L1, L2, L3, I – prąd w żyłach roboczych, d – średnia średnica żyły powrotnej, D_{s1-2} , D_{s2-3} , D_{s1-3} – odległości pomiędzy osiami kabli odpowiednio w fazach L1-L2, L2-L3, L1-L3.

Dla linii kablowej o jednostkowej długości 1 kilometra zależności (1), (2), (3) można przedstawić w następującej postaci:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1p} \\ \underline{U}_{L2p} \\ \underline{U}_{L3p} \end{bmatrix} = -j\omega \cdot \underline{I} \cdot 10^{-4} \begin{bmatrix} X_{1-2} + a^2 X_{1-3} \\ aX_{1-2} + a^2 X_{2-3} \\ aX_{1-3} + X_{2-3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie: U_{L1p} , U_{L2p} , U_{L3p} – napięcia indukowane w żyłach powrotnych kabli odpowiednio fazy L1, L2, L3, I – prąd w żyłach roboczych, $X_{1-2} = 2 \ln(2D_{s1-2}/d)$, $X_{1-3} = 2 \ln(2D_{s1-3}/d)$, $X_{2-3} = 2 \ln(2D_{s2-3}/d)$, $a = -0,5 + j(\sqrt{3}/2)$, $a^2 = -0,5 - j(\sqrt{3}/2)$.

Przy obciążeniu niesymetrycznym zależność (4) przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1p} \\ \underline{U}_{L2p} \\ \underline{U}_{L3p} \end{bmatrix} = -j\omega \cdot L_L \cdot 10^{-4} \begin{bmatrix} 0 & X_{1-2} & X_{1-3} \\ X_{1-2} & 0 & X_{2-3} \\ X_{1-3} & X_{2-3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} – prądy w żyłach roboczych poszczególnych faz, L_L – długość linii kablowej.

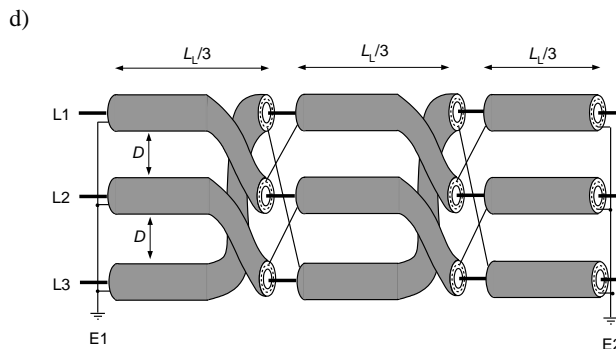
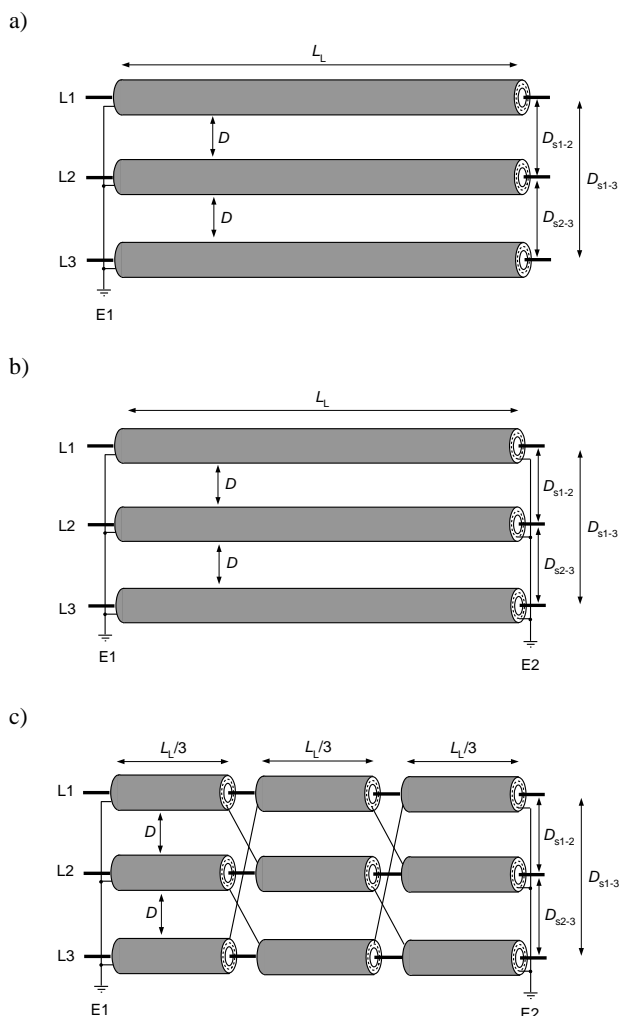
Jeżeli kabel jest uziemiony tylko na jednym końcu (rys. 1a), to podczas normalnej pracy systemu pojawia się na

końcu nieziemionym napięcie względem ziemi, które może zagrażać porażeniem, natomiast podczas zwarcia może spowodować uszkodzenie zewnętrznej nieprzewodzącej powłoki kabla. Zagrożenia te są wyeliminowane, jeżeli kabel uziemić na obu końcach (rys. 1b), jednakże znacznie ogranicza to przepustowość linii (z powodu prądów indukowanych płynących w żyłach powrotnych), która może spaść nawet poniżej 50% wartości uzyskiwanej przy uziemieniu jednostronnym. Z tego powodu stosuje się transpozycję żył powrotnych (rys. 1c), pozwalającą uzyskać przepustowość taką samą jak przy uziemieniu jednostronnym. Najbardziej zaawansowane jest rozwiązanie przedstawione na rysunku 1d. Stosuje się tu transpozycję żył powrotnych i transpozycję żył roboczych. Stopień skomplikowania tego rozwiązania wzrasta, gdy stosuje się więcej niż jeden kabel na fazę [7].

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli w stanie ustalonym dla odcinka linii kablowej 110 kV o długości 3 kilometrów. Obliczenia wykonano dla dwóch głównych rozwiązań: pierwszego – zastosowano jeden kabel na fazę, drugiego – zastosowano trzy kable na fazę. Dla każdego z dwóch wymienionych rozwiązań rozważano:

- uziemienie jednostronne żył powrotnych kabli,
- uziemienie dwustronne żył powrotnych kabli,
- transpozycję żył powrotnych,
- transpozycję żył roboczych.

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu DIGSILENT PowerFactory®. Głównym celem obliczeń jest wskazanie najkorzystniejszego układu połączeń kabli z punktu widzenia zagrożenia porażeniowego.



Rys. 1. Sposoby uziemienia i połączeń żył powrotnych kabli wysokiego napięcia: a) uziemienie jednostronne, b) uziemienie dwustronne, c) uziemienie dwustronne i transpozycja żył powrotnych, d) uziemienie dwustronne, transpozycja żył powrotnych i transpozycja żył roboczych. L_L – długość linii kablowej, D_{s1-2} , D_{s2-3} , D_{s1-3} – odległości pomiędzy osiami odpowiednich kabli, D – odległość w świetle pomiędzy sąsiadującymi kablami, E1, E2 – uziemienia

2. MODEL ANALIZOWANEGO SYSTEMU I WYNIKI OBLICZEŃ

2.1. Wprowadzenie

Analizie poddano linię kablową o napięciu nominalnym 110 kV i długości $L_L = 3$ km. Założono, że linia ta ma zapewniać przesył mocy czynnej o wartości 322 MW. Jeżeli linia ma zawierać jeden kabel na fazę, to przekrój miedzianych żył roboczych powinien wynosić 2000 mm². Alternatywnie można zastosować trzy kable na fazę – do zapewnienia przesyłu mocy czynnej na wskazanym wyżej poziomie należy wtedy zastosować kable o przekroju żył miedzianych co najmniej 500 mm². W każdym z rozwiązań kable są ułożone płasko z odstępem w świetle pomiędzy sąsiadującymi kablami równym średnicy zewnętrznej kabla. W układzie z trzema kablami na fazę odstęp w świetle pomiędzy sąsiednimi torami jest równy podwójnej średnicy zewnętrznej kabla.

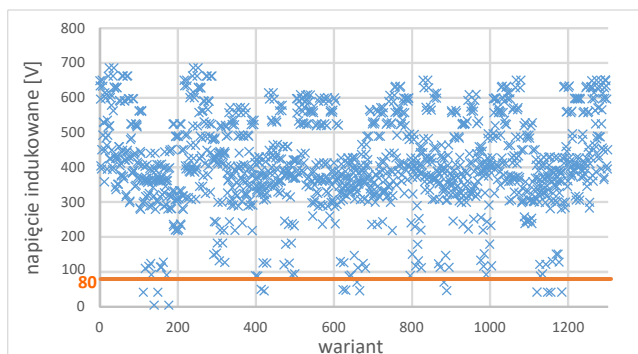
W stanie ustalonym napięcia indukowane w żyłach powrotnych mogą powodować zagrożenie porażeniowe. Zgodnie z normą [8] napięcie dotykowe rażeniowe dopuszczalne długotrwale wynosi 80 V. Celem obliczeń jest wyznaczenie takich wariantów uziemienia żył powrotnych kabli oraz ich transpozycji (także transpozycji żył roboczych), dla których napięcie na nieziemionym końcu żyły powrotnej (lub w punktach transpozycji) nie przekracza 80 V. Wyniki obliczeń zawarte na wykresach przedstawiają napięcie żyły powrotnej tej fazy, dla której uzyskano wartość największą. Napięcia indukowane są obliczane dla wartości prądu w żyłach roboczych wynikających z przesyłanej mocy czynnej 322 MW.

2.2. Układ z jednym kablem na fazę

Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie jednostronnego uziemienia żył powrotnych kabli i rezygnacja z transpozycji żył powrotnych (ew. transpozycji żył roboczych). Rozwiązanie takie jest przedstawione na rysunku 1a. Niestety, uzyskuje się wtedy bardzo wysokie wartości napięć indukowanych – na końcu trzykilometrowego odcinka wynosi nawet około 650 V (kabel skrajny), co znacznie przekracza wartość dopuszczalną wynoszącą 80 V.

Podział rozważanej linii kablowej (uziemionej na jednym końcu) na trzy odcinki o długości $L_L/3 = 1$ km, wykonanie transpozycji żył roboczych oraz transpozycji żył powrotnych pozwala na znaczne zmniejszenie napięć

indukowanych. W układzie z jednym kablem na fazę są 1302 warianty połączeń kabli z punktu widzenia transpozycji żył roboczych i powrotnych. Aby wykonać obliczenia dla wszystkich wariantów, przygotowano odpowiedni skrypt obliczeniowy w wewnętrznym języku programowania programu PowerFactory®. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obliczeń dla wszystkich 1302 wariantów.



Rys. 2. Napięcia indukowane w żyłach powrotnych na nieziemionym końcu rozważanej linii kablowej o długości $L_L = 3$ km – jeden kabel na fazę

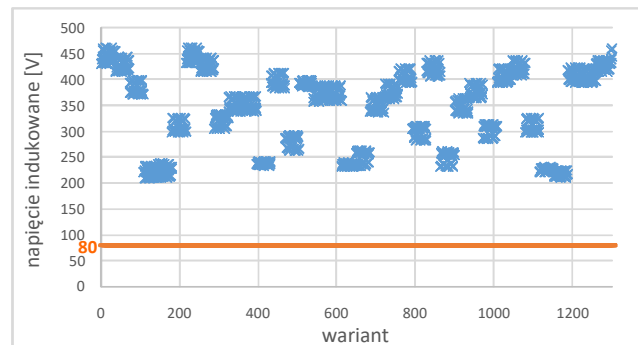
W zależności od konfiguracji, napięcia indukowane mogą przyjmować wartości od nieco powyżej 0 V do niemal 700 V. Wartości napięć indukowanych niewiele większe od 0 V osiąga się dla wariantów konfiguracji przedstawionych w tabelicy 1.

Tablica 1. Transpozycja żył powrotnych (ZP) i transpozycja żył roboczych (ZR) w wariantach 140 i 177, pozwalająca osiągnąć napięcia indukowane bliskie 0 na końcu linii – jeden kabel na fazę

Wariant	Wymagana transpozycja na końcu pierwszego odcinka o długości $L_L/3 = 1$ km					
	ZP1	ZP2	ZP3	ZR1	ZR2	ZR3
140	→ZP1	→ZP2	→ZP3	→ZR2	→ZR3	→ZR1
177	→ZP1	→ZP2	→ZP3	→ZR3	→ZR1	→ZR2
Wariant	Wymagana transpozycja na końcu drugiego odcinka o długości $L_L/3 = 1$ km					
	ZP1	ZP2	ZP3	ZR1	ZR2	ZR3
140	→ZP3	→ZP2	→ZP1	→ZR1	→ZR3	→ZR2
177	→ZP3	→ZP2	→ZP1	→ZR2	→ZR1	→ZR3

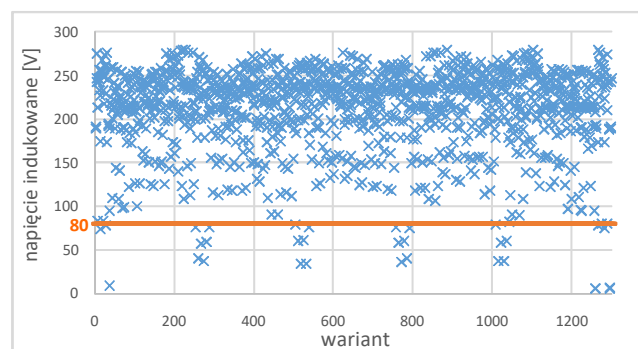
Należy podkreślić, że napięcia indukowane niższe niż 80 V (a nawet bliskie 0), można osiągnąć tylko na końcu linii kablowej. W punktach, w których wykonuje się transpozycję, napięcia te będą zawsze wyższe niż 80 V (rys. 3). Zatem w szczególności w tych punktach należy zadbać o bezpieczeństwo obsługi.

Rozwiązaniem eliminującym zagrożenie porażeniowe na końcu linii kablowej jest zastosowanie uzziemienia dwustronnego (rys. 1b). Niestety, w takim przypadku napięcia indukowane powodują przepływ prądów indukowanych w żyłach powrotnych, a te z kolei są źródłem znacznych strat mocy czynnej w tych żyłach. Straty mocy czynnej przyczyniają się do wyraźnego zmniejszenia obciążalności linii, co w większości przypadków jest nieakceptowalne. W rozważanym układzie moc przesyłana linią kablową wynosi nie więcej niż 155 MW i jest znacząco mniejsza ($155/322 = 0,48$) niż w układzie z uzziemieniem jednostronnym. Z tego powodu konieczna jest transpozycja żył powrotnych (rys. 1c), a nawet transpozycja żył roboczych (rys. 1d).



Rys. 3. Napięcia indukowane w żyłach powrotnych na końcach odcinków o długości $L_L/3 = 1$ km (w punktach transpozycji) – uzziemienie jednostronne, jeden kabel na fazę

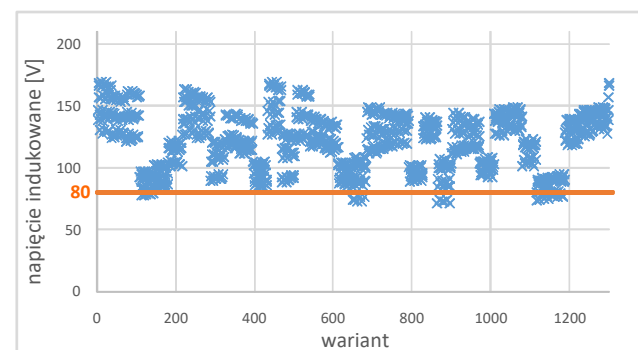
Na rysunku 4 przedstawiono wartości napięć indukowanych przy zastosowaniu tych transpozycji. Napięcia indukowane nie przekraczają 280 V i są wyraźnie niższe niż w przypadku uzziemienia jednostronnego (rys. 3). Jak wynika z rysunku 4, jest wiele wariantów połączeń żył powrotnych i żył roboczych, dla których napięcia indukowane są niższe niż 80 V.



Rys. 4. Napięcia indukowane w żyłach powrotnych na końcach odcinków o długości $L_L/3 = 1$ km (w punktach transpozycji) – uzziemienie dwustronne z transpozycją żył roboczych (powrotnych), jeden kabel na fazę

2.3. Układ z trzema kablami na fazę

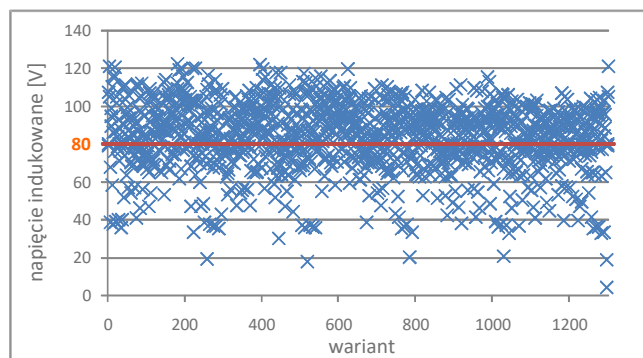
Dzięki zastosowaniu trzech kabli na fazę maleje prąd obciążenia każdego kabla (maksymalna przesyłana moc to nadal 322 MW) i można zastosować mniejszy przekrój żył roboczych. Mniejszy prąd w żyłach roboczych pozwala uzyskać mniejsze napięcia indukowane w żyłach powrotnych.



Rys. 5. Napięcia indukowane w żyłach powrotnych na końcach odcinków o długości $L_L/3 = 1$ km (w punktach transpozycji) – uzziemienie jednostronne, trzy kable na fazę

Na rysunku 5 przedstawiono wartości napięć na końcach odcinków kabli o długości $L_1/3 = 1$ km (w punktach transpozycji), przy zastosowaniu uziemienia jednostronnego. Liczba wariantów nie zmienia się, ponieważ transpozycję żył roboczych i transpozycję żył powrotnych zakłada się tylko w ramach jednego toru. Porównując wyniki z tego rysunku z wynikami zamieszczonymi na rysunku 3 widać, że wartości napięć indukowanych zmniejszyły się i w wielu wariantach uzyskuje się mniej niż 80 V, co nie jest możliwe przy zastosowaniu jednego kabla na fazę.

Zastosowanie uziemienia dwustronnego, transpozycji żył powrotnych i transpozycji żył roboczych pozwala na dalsze zmniejszenie napięć indukowanych (rys. 6).



Rys. 6. Napięcia indukowane w żyłach powrotnych na końcach odcinków o długości $L_1/3 = 1$ km (w punktach transpozycji) przy uziemieniu dwustronnym kabli – trzy kable na fazę

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Sposób uziemienia żył powrotnych kabli wysokiego napięcia, transpozycja żył powrotnych oraz transpozycja żył roboczych znacząco wpływa na wartości napięć indukowanych w żyłach powrotnych tych kabli. Szczegółowa analiza wszelkich możliwych wariantów połączeń kabli jest skomplikowana i czasochłonna, ale pozwala na wskazanie rozwiązania, przy którym można uzyskać stosunkowo małe

wartości tych napięć. Wykonanie takiej analizy może być konieczne przy znacznej długości linii kablowej.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Coates M., Ware J.: Voltages induced in the non-magnetic, metallic sheaths and/or armour of single-core cables. IEE Wiring Matters, Autumn 2006, s. 8-9.
2. Jung C. K., Lee J. B., Kang J. W., Wang Xinheng: Sheath circulating current analysis of a crossbonded power cable systems. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2007, vol. 2, no. 3, pp. 320-328, DOI: 10.2202/1553-779X.1008.
3. Shaban M., Salam M. A., Ang S. P., Sidik M. A. B.: Assessing induced sheath voltage in multi-circuit cables: Revising the methodology. 2015 IEEE Conf. on Energy Conversion (CENCON), 19-20 Oct. 2015, DOI: 10.1109/CENCON.2015.7409553.
4. Sobral A., Moura A., Carvalho M.: Technical implementation of cross bonding on underground high voltage lines projects. 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6-9 June 2011.
5. Czapp S., Dobrzynski K., Klucznik J., Lubosny Z.: Induced sheath voltages in 110 kV power cables – case study. Archives of Electrical Engineering, 2015, vol. 64, iss. 3, pp. 361-370, DOI: 0.2478/aee-2015-0028.
6. Czapp S., Dobrzynski K., Klucznik J., Lubosny Z.: Computer-aided analysis of induced sheath voltages in high voltage power cable system. The 10th International Conference on Digital Technologies, 9-11 July 2014, DOI: 10.1109/DT.2014.6868689.
7. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. IEEE Std 575™-2014.
8. PN-EN 50522:2011 (wersja angielska) Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.

ANALYSIS OF INDUCED VOLTAGES IN SHEATHS OF HIGH VOLTAGE POWER CABLES FOR THEIR SELECTED CONFIGURATIONS

In metallic sheaths of high voltage power cables induced voltages-to-earth may occur due to load current and short-circuit current flow. These voltages may be the cause of electric shock hazard and/or damage to the outer non-metallic sheath of the cable. The values of these voltages depend on the length of cables, earthing arrangements, configurations of cables and their metallic sheaths. The paper presents an analysis of induced sheath voltages for a system with one cable per phase and for a system with three cables per phase. Single-point bonding, both-ends bonding, cross-bonding and cables transposition are considered. The analysis results show that the above mentioned factors have a significant impact on the induced voltages, and in practice it is necessary to perform advanced calculations allowing the selection of the optimal configuration of cables for a given power cable system.

Keywords: power cables, induced voltages, sheaths of power cables.