

Badanie wpływu ułożenia kabli na straty energii w żyłce powrotnej – symulacja w programie PowerFactory

Streszczenie. W artykule przedstawiono wzory opisujące straty w żyłce powrotnej kabla elektroenergetycznego oraz omówiono sposób wykorzystania programu PowerFactory do modelowania strat. W programie PowerFactory zbadano wpływ zmiany wybranych parametrów na prąd indukowany w żyłce powrotnej kabla elektroenergetycznego.

Abstract. Formulas describing current induced in cable sheets are presented. Moreover an instruction regarding cable sheath modeling in PowerFactory are presented. Finally an influence of chosen parameters on cable sheath losses is investigated. (**Influence of power cable laying on cable sheath losses – simulation in PowerFactory**).

Słowa kluczowe: kable, straty, PowerFactory, żyła powrotna

Keywords: cable, loss, PowerFactory, cable sheath

Wstęp

Zgodnie z wymaganiami normy [1] zakończenia kabli, metalowe powłoki, żyły powrotnej i pancerze kabli należy połączyć z uziemieniem, co ma na celu ograniczenie napięć pojawiających się na zakończeniu kabla do poziomu określonego w normie [2]. Niestety w żyłkach powrotnych kabli uziemionych obustronnie przepływa prąd, który generuje znaczące straty. Artykuł ma na celu przedstawienie zależności opisujących straty w liniach kablowych jednożyłowych uziemionych obustronnie.

Straty w liniach kablowych

Straty w liniach kablowych dzieli się na [3]:

- straty w żyłkach roboczych kabli wywołane przepływem prądu,
- straty w żyłce powrotnej kabla związane z indukcyjnością własną,
- straty związane ze sprzężeniem indukcyjnym różnych kabli,
- straty w dielektryku związane z upływnością izolacji.

Straty w żyłce roboczej opisane są wzorem (1). Na podstawie wzoru można zauważyć, że straty są proporcjonalne do kwadratu obciążenia – I^2 oraz do rezystancji – R_c przewodu. Straty w żyłce roboczej mogą być zmniejszone poprzez stosowanie przewodników o większym przekroju żyły roboczej. Istnieje również możliwość stosowania przewodników o mniejszej rezystywności – nadprzewodników. Niestety obecnie technologia ta wciąż jest w fazie rozwoju, a jej wdrożenia można się spodziewać w dalszej przyszłości [4]. Obecnie w kablach średniego napięcia stosuje się miedź lub aluminium [5].

$$(1) \quad P_{\text{strat.z.p.}} = I^2 \cdot R_c$$

W literaturze angielskojęzycznej w celu opisania strat często wymienia się wzór Arnolda (2), który jest wzorem empirycznym. Straty w żyłce powrotnej wynikające z indukcyjności własnej kabla są proporcjonalne do kwadratu prądu płynącego w żyłce roboczej – I^2 , który wymusza przepływ w żyłce powrotnej, odwrotnie proporcjonalne do rezystancji żyły powrotnej – $R_{z.p.}$ i proporcjonalne do kwadratu ilorazu średniego promienia żyły powrotnej – $r_{\text{średnie}}$ i odległości między środkami kabli poszczególnych faz – d . W Polsce powszechnie wykorzystuje się wzory opisane w [6].

$$(2) \quad P_{\text{strat.z.p.}} = 7,7 \cdot 10^{-3} \frac{I^2}{R_{z.p.}} \left(\frac{r_{\text{średnie}}}{d} \right)^2$$

Indukcyjność wzajemna między kablami poszczególnych faz opisana jest równaniem (3). W wyniku istnienia indukcyjności wzajemnej indukowane jest napięcie $E_{w.z.p.}$ (4), które z kolei wymusza przepływ prądu $I_{w.z.p.}$. Przepływ prądu generuje straty, które opisane są równaniem (6). Straty spowodowane indukcyjnością wzajemną są większe od strat wynikających z indukcyjności własnej kabli elektroenergetycznych.

$$(3) \quad M_w^2 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{d}{r} \right)$$

$$(4) \quad E_{w.z.p.} = I \cdot \omega \cdot M_w^2$$

$$(5) \quad I_{w.z.p.} = \frac{E_{w.z.p.}}{(R_{z.p.}^2 + \omega^2 M_w^2)^{0,5}}$$

$$(6) \quad P_{w.z.p.} = I_{w.z.p.}^2 \cdot R_{z.p.}$$

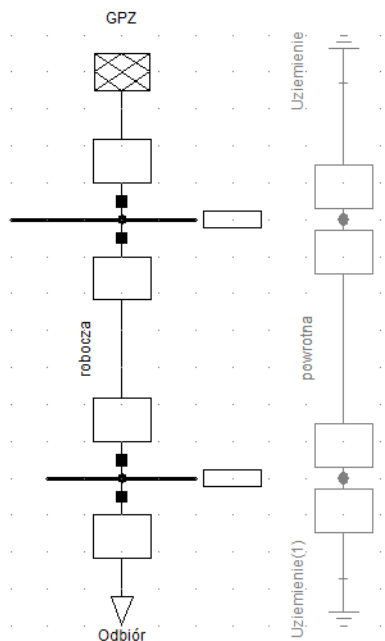
Straty dielektryczne opisane są wzorem (7). Analiza strat dielektrycznych wykracza poza zakres niniejszego referatu niemniej jednak warto podkreślić, że badanie współczynnika strat ma duże znaczenie w procesie diagnostyki kabli [7].

$$(7) \quad P = E^2 C \omega \tan \delta$$

Modelowanie strat w żyłce powrotnej kabla elektroenergetycznego w programie PowerFactory

Analiza strat w linii kablowej w programie PowerFactory rozpoczyna się od stworzenia modelu linii kablowej. Tworzenie modelu należy rozpocząć od wybrania symbolu szyn zbiorczych stacji z panelu edycji przedstawionego na rysunku 2. Do szyn zbiorczych dodaje się następnie urządzenia i linie elektroenergetyczne, z kolei do modelowania sieci elektroenergetycznej wykorzystuje się element „External Grid”. Po stworzeniu schematu sieci należy zdefiniować parametry poszczególnych elementów. Po dwukrotnym kliknięciu na wybrany element uruchamiane jest okno edycji, w którym definiuje się parametry. Parametry są pogrupowane w zależności od celu przeprowadzania obliczeń np. w zakładce „complete short circuit” definiuje się parametry, które są niezbędne do wykonania obliczeń zwarciovych, z kolei w zakładce „reliability” definiuje się parametry, które są konieczne do wykonania obliczeń niezawodności sieci. Parametry można definiować niezależnie dla każdego elementu, natomiast

wygodniej jest posługiwać się szablonami, dzięki którym raz zdefiniowaną linię elektroenergetyczną lub urządzenie można wykorzystać ponownie do stworzenia kolejnych modeli.



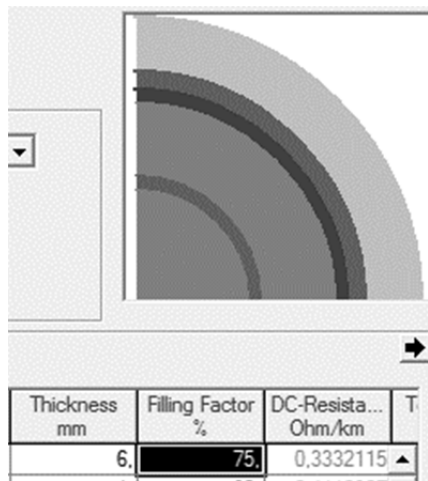
Rys.1. Model służący do badania wpływu sposobów ułożenia kabli na straty



Rys.2. Elementy wykorzystane podczas symulacji

Schemat wykorzystany do badania wpływu ułożenia kabla na straty został przedstawiony na rysunku 1. Z kolei na rysunku 2 przedstawiono symbole, które wykorzystano do budowy modelu. Żyłę powrotną kabla należy

zamodelować jako niezależną linię elektroenergetyczną, która nie jest przyłączona do żadnego źródła. Następnie należy zdefiniować sprzężenie między linią kablową, a żyłami powrotnymi – w tym celu zaznacza się linię kablową oraz żyłę powrotną, po czym z menu dostępnego po wybraniu prawego przycisku myszy wybiera się „Define” oraz „Cable System”. Po wybraniu polecenia uruchamiany jest konfigurator, który prowadzi użytkownika przez proces konfiguracji. Należy stworzyć model kabla oraz określić odstęp między poszczególnymi kablami. Następnie należy określić grubości poszczególnych warstw kabla i wskazać materiały wykorzystane do ich budowy. Ponadto należy również określić współczynnik wypełnienia (ang. filling factor). Fragment okna służącego do modelowania kabla został przedstawiony na rysunku 3.



Rys.3. Fragment okna służący do stworzenia modelu kabla elektroenergetycznego

Zależność rezystancji przewodu od współczynnika wypełnienia – c_f opisuje wzór (8). Proces modelowania można kontrolować porównując średnicę zewnętrzną kabla podaną w katalogu producenta z średnicą zewnętrzną kabla wyświetlaną w konfiguratorze programu [8, 9].

$$(8) \quad R_{DC} = \rho \cdot \frac{1}{\pi(r^2 \cdot q^2) \cdot c_f}$$

W programie można również zdefiniować współczynnik temperaturowy – α , który pozwala na uwzględnienie zmian rezystancji w zależności od temperatury przewodnika – T .

$$(9) \quad \rho_T = \rho_{20^\circ C} \cdot [1 + \alpha(T - 20)]$$

Badanie wpływu ułożenia kabli na straty

Kable elektroenergetyczne SN najczęściej są układane w konfiguracji płaskiej lub trójkąta na styk. Zaletą konfiguracji płaskiej jest większa obciążalność prądowa, natomiast konfiguracja trójkątna jest korzystniejsza z punktu widzenia strat w żyłach powrotnych uziemionych obustronnie – przykładowo dla kabla o przekroju żyły roboczej 120 mm² z izolacją z polietylenu usieciowanego obciążalność kabla w układzie płaskim wynosi 405 A z kolei w układzie trójkątnym obciążalność tego samego kabla wynosi 370 A [8].

Wyniki symulacji potwierdzają, że straty w linii kablowej są proporcjonalne do obciążenia. Ponadto można zauważyć, że w kablach z żyłami powrotnymi o większym przekroju przepływają większe prądy. Wynika to ze zmniejszenia rezystancji przewodu przy zachowaniu tej samej siły elektromotorycznej. Zależność ta obowiązuje dla

obu sposobów ułożenia kabli, przy czym prąd płynący w żyłach powrotnych kabli ułożonych w formacji trójkąta jest około dwukrotnie mniejszy niż dla analizowanej konfiguracji płaskiej z odstępem między kablami równym średnicy kabla. Graficzną interpretację wyników przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 1. Wpływ zmiany przekroju żyły roboczej kabla na prąd indukowany w żyłę powrotną

Konfiguracja	Średnia wartość prądu w żyłę powrotną				Obciążenie [MVA]; (cosφ=0,9)
	120/16	120/25	120/35	120/50	
Płaska (odstęp równy średnicy kabla)	4,3	6,5	8,8	12,0	1
	6,3	9,6	13,1	17,9	1,5
	8,3	12,8	20,7	23,8	2
Trójkątna	2,3	3,5	4,7	6,5	1
	3,3	5,1	6,9	9,7	1,5
	4,4	6,7	9,1	12,8	2



Rys.4. Prąd indukowany w żyłę powrotną w funkcji przekroju żyły powrotnej

Ponadto potwierdzono zależność podawaną w literaturze zgodnie, z którą prąd przepływający przez żyłę powrotną kabli ułożonych w konfiguracji płaskiej rośnie wraz ze wzrostem odległości między kablami [9]. Budowa kabla tylko w nieznacznym stopniu wpływa na wartość prądu płynącego w żyłę powrotną – zwiększenie przekroju żyły roboczej ze 120 mm² do 240 mm² powoduje wzrost prądu w żyłę powrotną o około 3,5%. Z kolei wzrost wartości prądu płynącego w żyłę powrotną powodowany zwiększaniem grubości izolacji można uznać za pomijalnie mały.

Tabela 2. Straty w kablach 120/50 w zależności od sposobu ułożenia kabla

Średnia wartość prądu w żyłę powrotną [A]				Obciążenie [MVA]
układ trójkątny, bez odstępów	układ płaski, bez odstępów	układ płaski, odstęp d	układ płaski, odstęp 2d	
6,5	7,9	12,0	14,5	1,0
9,7	11,7	17,9	21,6	1,5
12,8	15,6	23,8	28,7	2,0

Dotychczas posługiwano się średnimi wartościami prądu płynącego w żyłę powrotną. Należy jednak podkreślić, że nawet w przypadku symetrycznego obciążenia prądy indukowane w żyłach powrotnych kabli będą miały różną wartość, za co odpowiedzialna jest asymetria pojemności między poszczególnymi kablami oraz ziemią. Norma IEC określa następujące wzory do obliczenia strat w żyłach powrotnych kabli ułożonych w konfiguracji płaskiej, bez połączeń cross-bondingowych oraz uziemionych dwustronnie [10]:

$$(10) \lambda'_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

$$(11) \lambda'_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

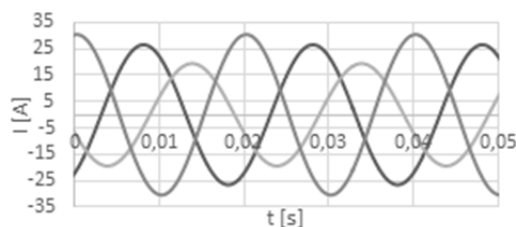
$$(12) \lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

gdzie: R_s – rezystancja żyły powrotnej dla największej temperatury pracy, R – rezystancja żyły roboczej, X_m – reaktancja wzajemna (między żyłą powrotną, a żyłami roboczymi kabli); X – reaktancja żyły powrotnej, λ'_{11} – opisuje straty w kablu, w którym płynie największy prąd, λ'_{12} – określa straty w kablu, w którym przepływa najmniejszy prąd, λ'_{1m} – określa straty w kablu położonym na środku

$$P = X + X_m$$

$$Q = X + X_m/3.$$

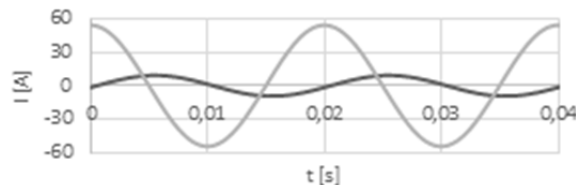
Łatwo można zauważyć, że we wzorze (10) występują sumy, z kolei we wzorze (11) występują suma i różnica. Znak ' - ' dotyczy kabla, w którym prąd wyprzedza prąd w drugim skrajnie położonym kablu tej samej linii kablowej [9]. Interpretację graficzną wzorów przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Przebiegi prądów w żyłach powrotnych kabli różnych faz

W celu określenia rzeczywistych strat w żyłach powrotnych należy mierzyć prądy w żyłach powrotnych wszystkich kabli.

Na rysunku 6 przedstawiono prąd płynący w żyłę roboczą kabla fazy A oraz prąd indukowany w żyłę powrotną tego kabla. Na rysunku można zaobserwować, że prąd płynący w żyłę powrotną jest opóźniony o 90° w stosunku do prądu płynącego w żyłę roboczą.



Rys.6. Prąd w żyłę roboczą (kolor szary) oraz prąd w żyłę powrotną (kolor czarny)

Znajomość prądów płynących poszczególnymi żyłami powrotnymi jest również potrzebna do określenia dopuszczalnej obciążalności prądowej kabli elektroenergetycznych. Zagadnienia związane z określeniem dopuszczalnej obciążalności kabli zostały przedstawione w broszurach CIGRE [13, 14] oraz [9].

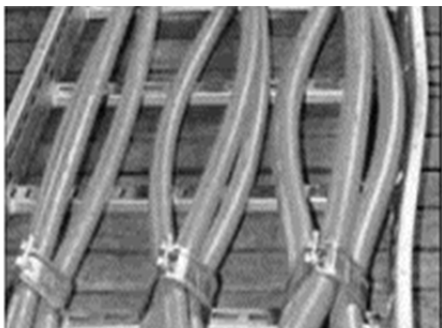
Straty w żyłę powrotną zależą od wartości prądu przepływającego przez żyłę roboczą kabla elektroenergetycznego. Biorąc pod uwagę układ pracy sieci SN łatwo zauważyć, że największy prąd przepływa przez linie kablów wyprowadzające moc ze stacji 110/SN i dlatego najkorzystniejsze jest ograniczanie strat w kablach położonych najbliżej stacji 110/SN.

W niektórych przypadkach straty w żyłach powrotnych mogą być większe od strat w żyłach roboczych [11] i

dlatego metody ograniczania prądu płynącego przez żyłę powrotną można również wykorzystać do zmniejszania ryzyka przegrzania kabla. O przepływie prądu o zbyt dużej wartości może świadczyć wypalenie farby na bednarce, do której przyłączona jest żyła powrotna [12].

Do przesłanek pozwalających na zmniejszenie przekroju żyły powrotnej kabli projektowanych można zaliczyć między innymi rozwój automatyki zabezpieczeniowej np. systemy adaptacyjne [13], zmniejszanie prądu zwarcia doziemnego dzięki stosowaniu kompensacji nadążnej [14] oraz stosowanie linii napowietrznych izolowanych, których stosowanie zmniejsza ryzyko wystąpienia zwarcia jednofazowych i związanych z nimi przepięć, które mogłyby prowadzić do powstania zwarcia dwufazowego cechującego się przepływem prądu o dużej wartości [15].

Oprócz sposobu rozmieszczenia kabli duży wpływ na straty w liniach kablowych ma zawartość harmonicznych jak również asymetria obciążenia i asymetria w odstępach między kablami ułożenia linii kablowych (rysunek 7). Wpływ harmonicznych na straty został przedstawiony w [20, 21]. Maksymalna zawartość harmonicznych oraz dopuszczalna asymetria w liniach SN została określona w normie PN-EN 50160.



Rys. 7. Kabel elektroenergetyczny pierwotnie ułożony w konfiguracji trójkąta

Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób modelowania kabla oraz przeanalizowano wpływ sposobu rozmieszczenia kabli na straty w żyłach powrotnej. Wykazano, że w kablach obciążonych największym prądem prądy płynące w żyłach powrotnych są największe. Ponadto prądy indukowane w żyłach powrotnych zależą od długości kabla i od przekroju żyły powrotnej – im większy przekrój żyły tym większy prąd i straty wynikające z przepływu prądu w żyłach powrotnej. Wymienione zależności mogą być podstawą do wskazywania kabli, w których występują największe straty. Modelowanie strat linii kablowych pozwala na określenie strat finansowych ponoszonych przez przedsiębiorstwo elektroenergetyczne, co z kolei pozwala na wybranie optymalnego z ekonomicznego punktu widzenia rozwiązania mającego na celu ograniczenie strat. Należy jednak pamiętać, że straty wyznaczone na drodze obliczeń mogą się znacząco różnić od strat występujących w rzeczywistości za co odpowiedzialne są między innymi

wyższe harmoniczne, asymetria obciążenia oraz asymetria ułożenia linii kablowych.

Autorzy: mgr. Inż. Krzysztof Łowczowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.łowczowski@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] COSIW; SEP, N SEP-E-004 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe (2014)
- [2] EN 50522, Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c (2010)
- [3] Lucas J. R., High Voltage Engineering (2001)
- [4] Rakowska A., Konieczność dynamicznego rozwoju sieci kablowej - uwarunkowania techniczne i społeczne, Zakopane (2013)
- [5] TFKable, Kable i przewody elektroenergetyczne.
- [6] Żmuda K., Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze, Gliwice (2012)
- [7] Gulski E., Rakowska A., Siodła K., Chojnowski P., Parciak J., Rola badań eksploatacyjnych kabli transmisyjnych wysokiego napięcia z zastosowaniem czułych metod diagnostycznych (2009)
- [8] DlgSILENT GmbH, DlgSILENT Power Factory - User Manual Version 15, Gomaringen (2015)
- [9] DlgSILENT GmbH, DlgSILENT PowerFactory Technical Reference Documentation, Gomaringen (2015)
- [10] Energolinia; TFKable; Polskie Centrum Promocji Miedzi, Lnie kablowe średniego napięcia z zastosowanie kabli elektroenergetycznych o żyłach miedzianych (2004)
- [11] Anders G. J., Rating of electric power cables, New York: IEEE.
- [12] McFadyen S., Cable Sheath and Armour Loss (2013) [Online]. Available: <http://myelectrical.com/notes/entryid/235/cable-sheath-and-armour-loss#myID1310033>. [Data uzyskania dostępu: 27 04 2016]
- [13] CIGRE WG B1.35, A Guide for Rating Calculations of Insulated Cables (2015)
- [14] CIGRE WG B1.11, Upgrading & Uprating of Existing Cable Systems (2015)
- [15] Sarajcev I., Majstrovic M., Medic I., Calculation of losses in electric power cables as the base for cable temperature analysis. Advanced Computational Methods in Heat Transfer VI.
- [16] Krawiec H., Przyczyny grzania się bednarki i żył powrotnych kabli 6 kV, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne (2014)
- [17] Hoppel W., Lorenc J., Utilising MPZ-NET System to perform adaptive functions utilising MPZ-NET System to Perform Adaptive Functions, Kórnik (2007)
- [18] Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., Kompensacja nadążna pojemnościowych prądów ziemnozwarciowych w sieciach SN dla poprawy ciągłości i jakości zasilania, Poznań (2016)
- [19] Lorenc J., Rakowska A., Staszak B., Limitation of earth-fault disturbances and their effects in medium voltage overhead lines (2007)
- [20] Nawrowski R., Stein Z., Zielińska M., Harmoniczne w prądzie zasilającym urządzenia małej mocy i ich wpływ na straty, Poznań (2016)
- [21] Marszałkiewicz K., Źródła zakłóceń i jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych, Wiadomości Elektrotechniczne (2004)