

doi:10.15199/48.2022.11.44

Straty mocy w liniach kablowych wysokiego napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania strat mocy w kablach energetycznych wysokiego napięcia modelowanych fazowo, dla dowolnej konfiguracji kabli (układ płaski, trójkątny, mieszany, dowolny). Uwzględniono układ pracy z jednostronnym (SPB) i dwustronnym (BE) uziemieniem ekranów. W opracowanym modelu i bazującym na nim oprogramowaniu do analizy strat mocy uwzględniono przeplatanie przewodów roboczych lub ich ekranów oraz możliwość występowania przewodów ECC w konfiguracji SPB i BE.

Abstract. The article presents a method of determining power losses in phase-modeled high-voltage power cables, for any cable configuration (flat, triangular, mixed, arbitrary). A system of work with single point bonding (SPB) and both-ends bonding (BE) of shield grounding is included. In the developed models and the software based on it for the analysis of power losses, the interlacing of working conductors or their screens and the possibility of the presence of Earth Continuity Conductor (ECC) cables in SPB and BE configurations were taken into account. (**Power losses in high voltage cables**).

Słowa kluczowe: straty mocy, układ z krzyżowaniem żył, przeplatanie, układ SPB i BE, przewody ECC, współczynnik strat dodatkowych.
Keywords: power losses, cross-wire circuit, interlacing, SPB and BE circuit, ECC cables, additional loss factor.

Wstęp

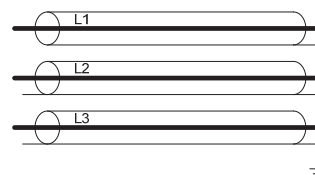
Uwzględnianie odcinków kablowych w nowo projektowanych liniach energetycznych lub zastępowanie odcinków linii napowietrznych liniami kablowymi spowodowane ich modernizacją lub warunkami technicznymi wymaga przeanalizowania ich wpływu na pracę systemu elektroenergetycznego. Analiza tak może obejmować różne zagadnienia, a jednym z nich są straty mocy wynikające z indukowanych sił elektromotorycznych w żyłach powrotnych przewodów roboczych i przewodach ECC. Jeżeli zapewnimy warunki do przepływu prądu, poprzez uziemienie żył powrotnych na obu końcach kabla (układ BE) wywołany indukowaną siłą elektromotoryczną prąd wygeneruje straty mocy zależne od wielu czynników. Uwzględnienie wszystkich przypadków w sposób analityczny jest zagadnieniem czasochłonnym i nie zawsze musi prowadzić do uzyskania pożądanego wyniku. Przykładowo poszukiwanie optymalnego rozmieszczenia przewodów dla linii kablowej składającej się z wielu sekcji o różnym rozmieszczeniu przewodów lub odmiennej konfiguracji jego może być bardzo czasochłonne.

Mnogość sposobów ułożenia kabli i połączeń ekranów i dodatkowych przewodów ECC powoduje, że konieczne staje się dokładne modelowanie linii kablowej rozumianej jako jedna lub kilka jednorodnych sekcji, czyli takich które charakteryzują się identyczną konfiguracją i sposobem ułożenia. Stosowana powszechnie metoda składowych symetrycznych zapewnia uzyskanie zadowalających wyników, ale nie umożliwia optymalizacji rozmieszczenia przewodów uwzględniającej wszystkie warunki, które mają wpływ na warunki pracy rozpatrywanej linii kablowej.

W niniejszym artykule Autor skoncentrował się na jednym z bardziej istotnych zagadnień związanych z przesyłem energii, czyli dodatkowymi stratami mocy w kablach, które mogą mieć negatywny wpływ na jego trwałość, jak również zwiększają koszty przesyłu energii. Zaproponowano sposób modelowania linii kablowej dowolnej konfiguracji geometrycznej przewodów roboczych i ECC. Powyższe założenia uzyskano poprzez uwzględnienie w modelu wszystkich składników wpływających na powstałe straty takich jak: rozmieszczenie przestrzenne przewodów, krzyżowanie żył roboczych, krzyżowanie żył powrotnych, sposób uziemienia ekranu i dodatkowe przewody obwodu ziemno powrotnego.

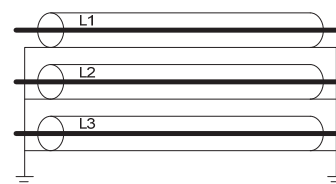
Sposoby łączenia ekranów

Każdy przewód, przez który przepływa prąd indukuje w przewodach równoległych siłę elektromotoryczną (SEM). Wartość SEM zależy wprost proporcjonalnie do wartości przepływającego prądu i odwrotnie proporcjonalnie do odległości pomiędzy przewodami. W przypadku zwarc SEM może przyjmować duże wartości, mogące przekroczyć wytrzymałość materiału, z którego wykonana jest izolacja (rys. 1).



Rys.1. Układ połączeń ekranów żył roboczych jednostronnie uziemionych SBE (both-ends bonding)

W celu ograniczenia SEM stosuje się różne sposoby łączenia ekranów przewodów roboczych. Najprostszym z nich, ale nie pozbawionym wad jest układ, w którym oba końce ekranu (rys. 2) są uziemione (BE). Zastosowanie takiego połączenia w istotny sposób zmniejsza indukowaną siłę elektromotoryczną, gdyż przeciwdziała jej przepływ prądu w żyłach powrotnych. Niestety, niekorzystnym efektem jest zwiększenie strat w trakcie normalnej pracy kabla, co może doprowadzić do jego termicznego uszkodzenia lub wymusza ograniczenie maksymalnej możliwej do przesłania mocy.

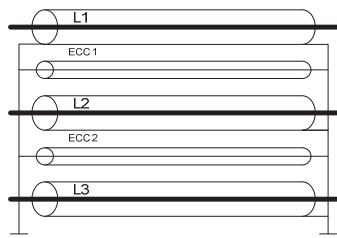


Rys. 2. Układ połączeń ekranów żył roboczych dwustronnie uziemionych BE (both-ends bonding)

Połączenie BE rozwiązuje problem zbyt dużej wartości SEM w trakcie zwarc, ale powoduje zwiększenie sumarycznych strat w trakcie normalnej eksploatacji. Jest to więc rozwiązanie kosztowne, ale zapewniające odpowiedni poziom bezpieczeństwa. Dodatkowe straty występujące w żyłach powrotnych przy niekorzystnym układzie (układ płaski jednofazowych kabli z obustronnie uziemionymi

żyłami powrotnymi) straty w żyłach powrotnych mogą być większe od strat w żyłach roboczych.

W celu ograniczenia wartości napięć indukowanych w żyłach powrotnych wzdłuż linii kablowej WN w układzie SPB, w bezpośrednim sąsiedztwie kabli WN powinien być ułożony kabel ECC (insulated earth continuity conductor). Kabel ten powinien być obustronnie uziemiony i połączony z innymi elementami obwodu ziemnopowrotnego.

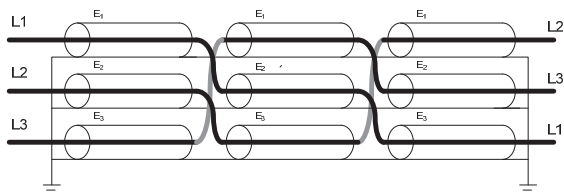


Rys. 3. Układ połączeń ekranów żył roboczych jednostronnie uziemionych SBE (both-ends bonding) z przewodami ECC (Earth Continuity Conductor)

Wykorzystanie przewodu ECC jest więc kompromisem pomiędzy układami BE i SPB. Ogranicza wartość indukowanego napięcia, choć nie tak bardzo jak układ BE, kosztem zwiększenia strat dodatkowych w trakcie normalnej eksploatacji.

Innym sposobem minimalizacji strat w żyłach powrotnych jest zastosowanie przeplotu, który może być realizowany na kilka sposobów:

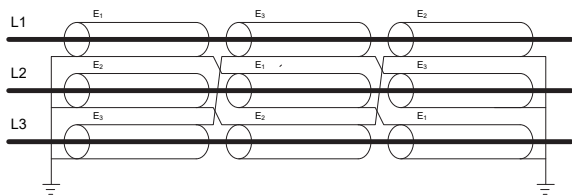
- przeplot żył roboczych,
- przeplot żył powrotnych,
- przeplot przewodów ECC.



Rys. 4 Krzyżowanie ekranów żył roboczych w układzie BE

Teoretycznie przeplatanie żył roboczych (rys. 4) w 1/3 i 2/3 długości sekcji CB (cross bounding) całkowicie eliminuje straty dodatkowe. Jest to jednak przypadek wyidealizowany zakładający pełną symetrię prądów fazowych oraz impedancji własnych i wzajemnych wszystkich sekcji. Projektując linię kablową istnieje możliwość wpływania na wartości impedancji, ale warunki terenowe mogą wymuszać zastosowanie nieoptymalnego ułożenia kabli (przepusty pod autostradami lub inne przeszkody terenowe). W takiej sytuacji manualne poszukiwanie optymalnego rozwiązania jest zadaniem czasochłonnym i nie gwarantującym uzyskania zadowalającego efektu, ale wykorzystanie możliwości maszyn liczących może sprawić, że rozwiązanie będzie możliwe do uzyskania.

Eliminację strat w ekranach żył roboczych kabli można uzyskać przeplatając ekrany (rys. 5) przy zachowaniu stałego położenia żył roboczych przewodu.

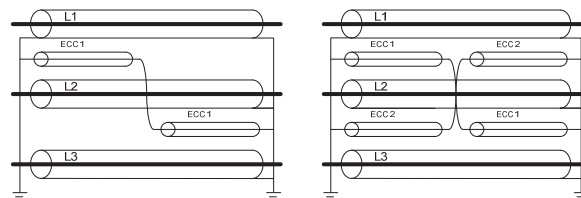


Rys. 5. Krzyżowanie ekranów żył roboczych w układzie BE

Z punktu widzenia rozptyłu prądów w żyłach powrotnych uzyskujemy obwód analogiczny do przedstawionego powyżej. Należy pamiętać, że to stwierdzenie jest prawdziwe gdy rozpatrujemy tylko jeden tor kablowy. Jeżeli chcemy mieć możliwość analizy wpływu jednego lub kilku dodatkowych torów kablowych to sposób kompensacji napięć (przeplatanie żył roboczych, czy powrotnych) może mieć istotne znaczenie, gdy tory będą w niedużej odległości od siebie. Przykładowo z taką sytuacją możemy mieć do czynienia przy podejściu do rozdzielni.

Dodatkowo model komplikuje się jeżeli uwzględnimy przewody ECC. W polskich sieciach nie stosuje się przewodów ECC w połączeniu z układem BE, ale rozwiązania takie są stosowane np. w USA. Uzasadnione jest więc uwzględnienie na etapie projektowania oprogramowania i modelu kabla.

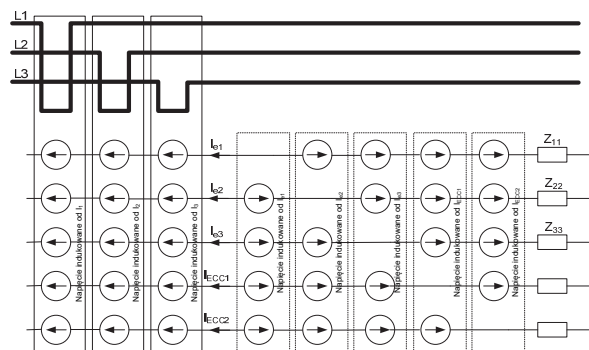
Przewody ECC podlegają tym samym prawom elektromagnetyzmu co pozostałe przewody, nic więc dziwnego, że również dla nich stosuje się przeplatanie. W przeciwieństwie do przewodów fazowych, które zawsze są trzy, przewodu ECC może nie występować wcale, może być jeden lub dwa. Mogą być również przeplatane lub nie.



Rys. 6. Krzyżowanie pojedynczego i podwójnego przewodu ECC

Matematyczny model jednorodnej sekcji kablowej

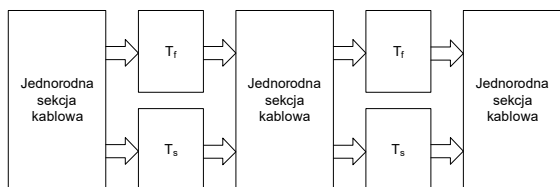
Przedstawione wcześniej przypadki różnych konfiguracji połączeń ekranów ochronnych i przewodów ECC oraz wymaga właściwego podejścia do projektowania modelu matematycznego, który będzie można zaimplementować w autorskim oprogramowaniu. Uwzględniając możliwość przeplatania żył roboczych, ekranów ochronnych dodatkowych przewodów ECC, które również mogą być przeplatane oraz wiele sekcji o różnym, geometrycznym rozmieszczeniu przewodów podjęto decyzję o zastosowaniu modelu fazowego. Dodatkowa liczba równań (w porównaniu do modelu składowych symetrycznych) koniecznych do rozwiązania nie jest ograniczeniem dla współczesnych komputerów, a skalowalność takiego rozwiązania jest znacznie większa. Docelowo Autor zakłada dodanie analogicznego modelu uwzględniającego zjawiska zachodzące w stanach awaryjnych w tym podczas zwarć.



Rys. 7 Schemat ideowy jednorodnej sekcji kablowej

Analizując schemat przedstawiony na rys. 7 oraz uwzględniając doświadczenie programistyczne zdecydowano się na podejście powszechnie stosowane w transformacjach grafiki 3D [3].

Łączenie sekcji jednorodnych



Rys. 8 Schemat łączenia jednorodnych sekcji kablowych z uwzględnieniem transformacji prądów fazowych i napięć/prądów żył powrotnych i ECC dla sekcji CB

Dla jednorodnej sekcji bez przewodów ECC można zapisać macierz impedancji własnych i wzajemnych w następującej postaci:

$$(1) \quad Z = Z_f = \begin{bmatrix} Z_{f11} & Z_{f12} & Z_{f13} \\ Z_{f21} & Z_{f22} & Z_{f23} \\ Z_{f31} & Z_{f32} & Z_{f33} \end{bmatrix}$$

Występujące w macierzy wartości impedancji własnych i wzajemnych można obliczyć z następujących zależności [1,2]:

$$(2) \quad Z_{ik} = \begin{cases} 0,049 + j0,145 \lg(2D_E / d_i) & i = k \\ 0,049 + j0,145 \lg(D_E / D_{ik}) & i \neq k \end{cases}$$

gdzie: D_E – odległość pomiędzy linią kablową a hipotetycznym przewodem powrotnym w ziemi wyrażona w metrach, d_i – średnica żyły powrotnej, D_{ik} – odległość pomiędzy osiami kabli

$$(3) \quad D_E = 93,1 \sqrt{\rho_E}$$

gdzie: ρ_E – rezystywność głębokich warstw ziemi w Ωm .

Jeżeli uwzględnimy przewody ECC macierz impedancji przyjmuje postać:

$$(4) \quad Z = \begin{bmatrix} Z_{f11} & Z_{f12} & Z_{f13} & Z_{ECC14} & Z_{ECC15} \\ Z_{f21} & Z_{f22} & Z_{f23} & Z_{ECC24} & Z_{ECC25} \\ Z_{f31} & Z_{f32} & Z_{f33} & Z_{ECC34} & Z_{ECC35} \end{bmatrix} = [Z_f | Z_{ECC}]$$

Impedancje wzajemne Z_{ECC} obliczamy analogicznie, jak impedancje wzajemne żył powrotnych (wzór 2, przypadek $i \neq k$).

Siła elektromotoryczna indukowana w ekranach ochronnych i przewodach ECC od prądów żył roboczych może być wyrażona wzorem macierzowym

$$(5) \quad E = ZI_f$$

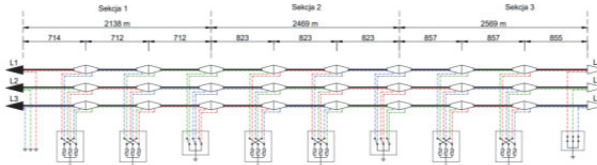
Zaproponowane podejście znacznie ułatwia modelowanie całek linii kablowej, dla której wypadkowa macierz Z jest iloczynem macierzy impedancji własnych i wzajemnych wszystkich odcinków składowych.

$$(6) \quad Z = \prod_{i=1}^N Z_i$$

gdzie: Z – impedancja rozpatrywanej sekcji, Z_i – impedancja i -tego, jednorodnego segmentu sekcji, N – liczba segmentów w sekcji.

Eksperyment

W celu przetestowania zaproponowanego modelu linii kablowej przeprowadzono obliczenia dla linii kablowej 110kV składającego się z trzech sekcji w układzie z krzyżowaniem żył (rys 9). Każda z przedstawionych sekcji składała się z różnej liczby jednorodnych odcinków kablowych układanych w ziemi lub w przepustach kablowych (sekcja 1 – 20 odcinków, sekcja 2 – 66 odcinków, sekcja 3 – 13 odcinków).



Rys.9 Schemat modelowanej linii kablowej

Otrzymane w wyniku modelowania wyniki strat dodatkowych porównano z wynikami symulacji wykonanej w komercyjnym oprogramowaniu ZikOS-LN* opracowanym przez firmę IPC Sp. z o.o. (dostępne pod adresem <https://zikos.pl>) uzyskując pełną ich zgodność.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda modelowania zapewnia możliwość modelowania linii kablowych o dowolnej strukturze przestrzennej i sposobie połączenia ekranów powrotnych i przewodów ECC.

Zaproponowana metoda jest poprawna i w przyszłości może zostać rozbudowana o modelowanie linii wielotorowych lub bardzo skomplikowanych przypadków, w których wiele linii zbiega się w stacji transformatorowo rozdzielczej.

Koszt numeryczny obliczeń jest nieduży dzięki czemu nie jest konieczne użycie drogich klastrów obliczeniowych.

Metoda może znaleźć zastosowanie w przypadku minimalizacji strat dodatkowych, dla których poszczególne segmenty, ze względu na warunki terenowe, nie mogą być tak samo ułożone.

Autor: dr inż. Artur Pasierbek, Politechnika Śląska, Katedra Algorytmiki i Oprogramowania, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: Artur.Pasierbek

LITERATURA

- [1] Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, WNT Warszawa 2002.
- [2] Żmuda K.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2016.
- [3] Ganczarski J.: OpenGL. Podstawy programowania grafiki 3D, Gliwice Helion 2015.