

doi:10.15199/48.2018.10.36

Analiza przepięć atmosferycznych w kablach 110 kV w liniach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych i zbadanie wpływu ograniczników przepięć na poziom narażeń napięciowych

Streszczenie. Przepięcia atmosferyczne w liniach kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych mogą prowadzić do uszkodzeń zarówno samego kabla, jak i pozostałych integralnych elementów systemu, takich jak przekładki izolacyjne w mufach separacyjnych. W układach z cross-bondingiem ograniczniki przepięć instalowane są w miejscach krzyżowania żył powrotnych i chronią przede wszystkim przekładki izolacyjne, ale ich dodatkową funkcją, pod warunkiem odpowiedniego połączenia, może być także ochrona osłon kabli. W artykule pokazano wpływ ograniczników na poziom przepięć piorunowych w przykładowym systemie z linią kablową i napowietrzną. Komputerowe symulacje stanów przejściowych wykonano w oprogramowaniu EMTP-RV dla dwóch scenariuszy zdarzeń, tj. uderzenia pioruna w linkę odgromową oraz w przewód fazowy.

Abstract. Lightning overvoltages in cable lines with special bonding can lead to damage both to the cable itself and to other integral system components, such as sectionalising joints. In systems with cross-bonding, surge arresters are installed where segmentation of the cable occurs and primarily protect cable joints, but their additional function, if properly connected, may also be to protect the cable outer jacket. The article shows the effectiveness of sheath voltage limiters against lightning overvoltages in cable system for mixed cable-overhead line. Transient computer simulations were performed in EMTP-RV software for two scenarios, i.e. lightning strike to the ground conductor of overhead line and to the phase conductor. (Analysis of atmospheric surges in 110 kV cables in lines with special bonding and examination of the influence of surge arresters on the level of voltage exposures).

Słowa kluczowe: krzyżowanie żył powrotnych; ograniczniki przepięć do ochrony żył powrotnych; wzrost lokalnego potencjału ziemi; metody obliczeń napięć indukowanych; przepięcia atmosferyczne; EMTP-RV.

Keywords: cross-bonding; sheath voltage limiter; earth potential rise; calculation methods for induced voltage; atmospheric surges; EMTP-RV.

Wstęp

Przy zastosowaniu krzyżowania żył powrotnych (ang. *Cross-Bonding*, *CB*) ekrany metaliczne kabli uziemiane są na końcach głównych sekcji i krzyżują się ze sobą pomiędzy każdą z tzw. małych sekcji, które dzielą linie kablowe na będącą wielokrotnością 3 liczbę segmentów. W efekcie na końcach głównych sekcji, z których każda zawiera po trzy równej długości fragmenty linii, znoszą się napięcia indukowane w żyłach powrotnych od prądów w żyłach roboczych. Dzięki takiemu rozwiązaniu w żyłach powrotnych nie płynie prąd, który w układach obustronnie uziemionych powoduje dodatkowe straty i zmniejsza obciążalność prądową linii kablowej.

Przepięcia atmosferyczne i łączeniowe w systemach kablowych z krzyżowaniem żył powrotnych mogą prowadzić do uszkodzeń muf separacyjnych, których specjalna budowa umożliwia wyprowadzenie na zewnątrz kabli ekranów metalicznych i ich odpowiednie połączenie w tzw. *link-boxach*. Najwyższe napięcia na przekładkach izolacyjnych spodziewane są w przypadku uderzenia pioruna w przewód fazowy na pierwszym od strony linii kablowej przęśle linii napowietrznej (Rys.1) lub wystąpienia przeskoku odwrotnego na słupie kablowym, co wynika ze sposobu połączenia (krzyżowania) żył powrotnych oraz rozptyłu prądu piorunowego, który powoduje powstanie fali przepięciowej o znacznej wartości w jednej z żył powrotnych. Ponadto fala ta jest w kablu słabo tłumiona i może wywoływać przepięcia nawet kilka kilometrów w głąb linii [1]. Wyładowanie do przewodu odgromowego jest zdecydowanie mniej groźne dla przekładek izolacyjnych ze względu na większe tłumienie fali przepięciowej [1] i równomierny rozdział prądu piorunowego na żyły powrotne, dzięki czemu udar napięciowy ma niższą wartość. W obu scenariuszach zdarzeń na uszkodzenie narażona jest jednak osłona zewnętrzna kabla, ponieważ w miejscach krzyżowania żyły powrotne są odizolowane od ziemi.

W celu ochrony od przepięć udarowych należy instalować ograniczniki przepięć, tzw. SVL (ang. *Sheath Voltage Limiter*). Od początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku stosowane są wyłącznie ograniczniki z

tlenków metali. Należy pamiętać, że urządzenia te nie są w stanie chronić przed przepięciami o częstotliwości sieciowej, tj. przepięciami dorywczymi. Przepięcia dorywcze w osłonach metalicznych kabli powstają w efekcie zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Płynący w żyłach roboczych kabla prąd przemienny wytwarza wokół niej pole magnetyczne, które indukuje wzdłuż koncentrycznych powłok metalowych siłę elektromotoryczną o wartości proporcjonalnej do wartości prądu płynącego w żyłach roboczych oraz do długości kabla, a także indukcyjności wzajemnej zależnej od wymiarów geometrycznych układu i przenikalności magnetycznej środowiska. Najsilniejsze oddziaływanie występuje przy przepływie prądu zwarcowego i z tego względu szczególnie istotne jest obliczenie spodziewanych maksymalnych wartości przepięć dorywczych, indukowanych w warunkach zakłóceńowych. Napięcia te powinny być niższe niż napięcie trwałej pracy ogranicznika (w układzie ekran - ziemia lokalna). Niewłaściwy dobór ogranicznika przepięć, skutkujący zadziałaniem w czasie przepięć dorywczych, może prowadzić do jego zniszczenia z powodu utraty stabilności termicznej.

Na tę chwilę nie ma, zarówno w Polsce, jak i na świecie, standardu, który kompleksowo przedstawiałby wytyczne projektowania i budowy linii kablowych, a także ich eksploatacji przy zastosowaniu specjalnego uziemienia żył powrotnych, przede wszystkim w aspekcie koordynacji izolacji. W powszechnym użyciu funkcjonują jedynie pewne wytyczne i wskazówki dla inżynierów i projektantów, na podstawie których projektuje się i buduje współczesne systemy kablowe. Zaznaczenia wymaga fakt, że dostępna wiedza odnosząca się do projektowania linii kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych oparta jest na badaniach, obliczeniach i doświadczeniach eksploatacyjnych systemów kablowych w sieciach, w których poziom prądu zwarcowego nie przekracza 25 kA. Brakuje ugruntowanej wiedzy z zakresu zjawisk w systemach kablowych w sieciach o dużej mocy zwarcowej – przede wszystkim w zakresie pracy ograniczników przepięć.

Obecnie notuje się znaczny wzrost awarii systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych,

spowodowanych w głównej mierze przez uszkodzenia ograniczników przepięć. Awaryjne te mają różne przyczyny i w większości zdarzeń dotyczą doziemień w wyniku zalania lub zawilgocenia skrzynek uziemiających i skrzynek krzyżowania żył powrotnych CB (cross-bonding), jednakże niektóre z nich spowodowane są uszkodzeniem ograniczników przepięć na skutek przeciążenia. Następstwem uszkodzenia SVL (w przypadku przewodzenia SVL linia pracuje jak uziemiona obustronnie) może być znaczne zwiększenie strat i tym samym ograniczenie możliwości przesyłowych danego systemu kablowego. Natomiast jeżeli dojdzie do pęknięcia warystora (stosu warystorów), tj. przy otwartym obwodzie, przekładki izolacyjne i osłony przestają być chronione od przepięć udarowych.

W praktyce eksploatacyjnej zanotowano także bardzo niebezpieczne przypadki wybuchów skrzynek z ogranicznikami przepięć, które miały miejsce w systemach o prądzie zwarciovym powyżej 25 kA. Część z tych zdarzeń związana była z brakiem ułożenia dodatkowego kabla ECC (ang. *Earth Continuity Conductor*) równoległe do linii kablowej w układach z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych (SPB, ang. *Single-Point Bonding*), co zostało przeanalizowane i opisane w dostępnej literaturze, ale w pozostałych przypadkach problem zauważono w ostatnim okresie i do tej pory nie stwierdzono jednoznacznie przyczyny tych zjawisk. Niektóre spółki dystrybucyjne (m.in. w Australii i Francji) wprowadziły nawet w swoich wewnętrznych standardach wymóg stosowania skrzynek CB w wykonaniu przeciwybuchowym, aby nie dopuścić do narażenia osób postronnych [2].

Artykuł ma na celu wskazanie potencjalnych przyczyn powyższych zagrożeń, wynikających głównie z uproszczeń w aktualnych metodach doboru SVL (obliczeń napięć indukowanych), jak również przedstawia nową metodologię doboru ograniczników przepięć do ochrony osłon kabli WN.

Wpływ ograniczników przepięć na zmniejszenie narażeń napięciowych przy przepięciach piorunowych

W celu wykazania konieczności instalowania ograniczników przepięć w liniach kablowych z krzyżowaniem żył powrotnych przeprowadzono w programie EMTP-RV symulacje wystąpienia przepięcia piorunowego w przykładowym fragmencie systemu elektroenergetycznego. Poniżej omówiono krótko sam program oraz zastosowany sposób modelowania.

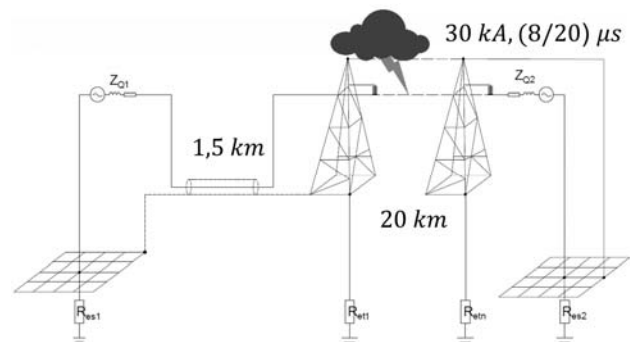
A. Oprogramowanie EMTP-RV

Komercyjne oprogramowanie EMTP-RV, choć należy do tej samej, rozwijanej od lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia rodziny programów EMTP (ang. *ElectroMagnetic Transient Program*), spośród innych aplikacji wyróżnia się przyjaznym graficznym interfejsem użytkownika oraz możliwością symulacji elektromagnetycznych i elektromechanicznych stanów przejściowych w systemach zawierających tysiące elementów, włączając w to układy sterowania (np. układy wzbudzenia generatorów), automatyki zabezpieczeniowej czy urządzenia energoelektroniczne (np. urządzenia FACTS). Bogata biblioteka elementów, zaawansowane metody obliczeniowe, możliwość inicjalizacji obliczeń w dziedzinie czasu ze stanu ustalonego czy funkcje automatycznej kontroli poprawności stworzonego układu oraz wykrywania niestabilności obliczeniowej gwarantują szybkość pracy oraz wiarygodne rezultaty. Program do wizualizacji przebiegów ScopeView umożliwia eksport i import danych w wielu formatach, w tym MATLAB® czy COMTRADE, oraz posiada zaawansowane funkcje matematyczne do analizy sygnałów. O jakości całego pakietu świadczy fakt wykorzystywania go przez światowych liderów i prekursorów w modelowaniu systemów

elektroenergetycznych, operatorów systemów przesyłowych i spółki energetyczne m.in. w Kanadzie (Hydro-Québec, Ontario Hydro) i Francji (RTE, EDF), a także stowarzyszenie CIGRE.

B. Opis układu

Badany układ, który w uproszczonej postaci przedstawiono na rysunku 1 tworzą dwie stacje elektroenergetyczne połączone jednotorową linią napowietrzną o długości 20 km na słupach typu S24 (przewód roboczy AFL – 6 240, linka odgromowa AFL – 1,7 95 średnia długość przęsła 300 m oraz linią kablową o długości 1,5 km na podejściu do stacji nr 1 o dużej mocy zwarciowej (prąd zwarcia trójfazowego ok. 45 kA i małej rezystancji uziemienia ($R_{es1} = 0,3 \Omega$)). Kable typu XRUIKXS 1x800RMC/150 64/110(123) kV ułożono w układzie trójkątnym na styk na głębokości 1,5 m. Do ochrony izolacji żył roboczych kabla zastosowano ograniczniki przepięć o następujących danych katalogowych: $U_r = 96,0$ kV, $U_c = 77,0$ kV, zaś w miejscach krzyżowania żył powrotnych: $U_r = 5,0$ kV, $U_c = 3,6$ kV.

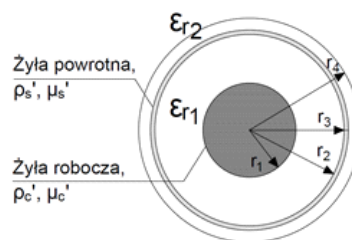


Rys.1. Schematyczne przedstawienie badanego układu

C. Modele elementów

1) Kable

W oprogramowaniu EMTP stosuje się uproszczony sposób odwzorowania kabli (jako współosiowe walce o zadanych parametrach elektrycznych i magnetycznych), skąd wynikają pewne ograniczenia w możliwości obliczenia parametrów elektrycznych linii kablowej na podstawie konfiguracji geometrycznej oraz wiernego oddania budowy kabla.

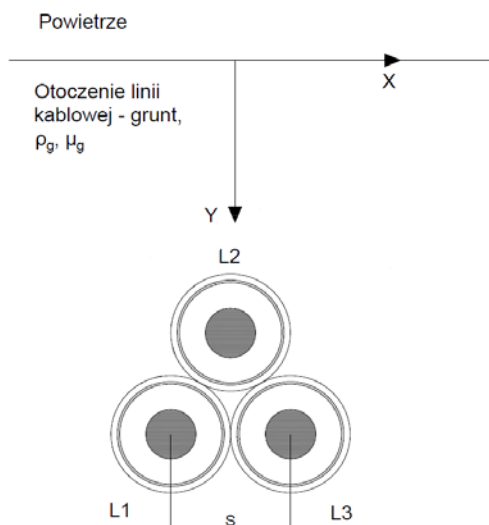


Rys.2. Model kabla jednofazowego w oprogramowaniu EMTP

Tabela 1. Parametry kabli po przekształceniach

Parametr		XRUIKXS 1x800RMC/150 64/110(123) kV	LgYcyw 1x150 3,6/6 kV
1	r_1	17,35 mm	9,8 mm
2	r_2	35,25 mm	14,9 mm
3	r_3	36,88 mm	-
4	r_4	41,25 mm	-
5	ρ_c'	$2,0900 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$	$3,8922 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$
6	ρ_s'	$3,9075 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$	-
7	ϵ_{r1}	2,879	8
8	ϵ_{r2}	2,300	-
9	ρ_g	100 Ωm	100 Ωm

Aby uzyskać więc prawidłowe wartości parametrów elektrycznych, wymagane jest przekształcenie rzeczywistych parametrów technicznych kabla na takie, które wprowadza się do oprogramowania. Do użytkownika należy decyzja, w jaki sposób uwzględnić w niniejszym modelu (rys.2) parametry budowy żyły roboczej, poszczególne warstwy półprzewodzące oraz reprezentację ekranu metalicznego/żyły powrotnej.



Rys.3. Sposób określenia geometrii ułożenia linii kablowej

2) Linia napowietrzna

Symulacje przeprowadzono z zastosowaniem dostępnego w EMTP-RV modelu szerokopasmowego, który wykorzystuje najbardziej zaawansowaną technikę modelowania linii i w pełni reprezentuje jej zachowanie w szerokim zakresie częstotliwości. Jedyną zauważalną niedogodnością jest szybkość obliczeniowa, co ma jednak zostać znacząco poprawione w kolejnych wersjach programu [3].

Ze względu na szybkozmienny charakter zjawisk (przebieg atmosferyczny), słupy linii odwzorowano jako jednofazowy bezstratny element o parametrach rozłożonych, charakteryzowany przez impedancję udarową [4]. Ponadto uwzględniono zjawisko jonizacji gruntu, które powoduje zmniejszenie rezystancji uziemienia słupa na skutek przepływu prądu doziemnego [4]. Przyjęto statyczną wartość rezystancji słupów równą 10 Ω.

3) Ograniczniki przepięć

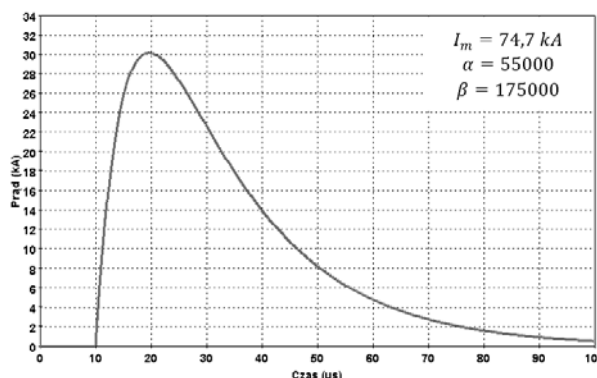
Standardowy model ogranicznika jako pojedynczego elementu, tj. nieliniowej rezystancji o charakterystyce napięciowo-prądowej zaczerpniętej z kart katalogowych, nie oddaje prawidłowo jego zachowania dla przebiegów szybkozmiennych. W takim przypadku zastosowanie znajdują inne modele, np. IEEE [5], uwzględniające częstotliwościową zależność parametrów. Modyfikację schematu IEEE stanowi model opracowany przez Pincetiego i Giannantoniego [6], w którym parametry zastępcze oparte są na danych elektrycznych, a nie, jak w przypadku modelu IEEE, właściwościach fizycznych ogranicznika. W konsekwencji model ten powinien wierniej odwzorowywać zachowanie ogranicznika, bez konieczności indywidualnego dostrajania parametrów. Przeprowadzone symulacje potwierdziły dobrą zgodność, dla różnych wartości i kształtów udarów prądowych, pomiędzy wartościami szczytowymi napięć ograniczonych na zaciskach ogranicznika wyznaczonymi symulacyjnie i zaczerpniętymi z kart katalogowych [7], [8].

4) Wyładowanie atmosferyczne

Model wyładowania piorunowego składa się z dwóch elementów – źródła prądowego i przyłączonej równolegle rezystancji reprezentującej drogę upływu prądu piorunowego pomiędzy chmurami i ziemią. Założono szczytową wartość prądu równą 30 kA oraz czas trwania czoła udaru $T_1 = 8 \mu s$ i czas do półszczytu udaru $T_2 = 20 \mu s$. Kształt przebiegu określony został funkcją dwuwykładniczą:

$$(1) \quad i(t) = I_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

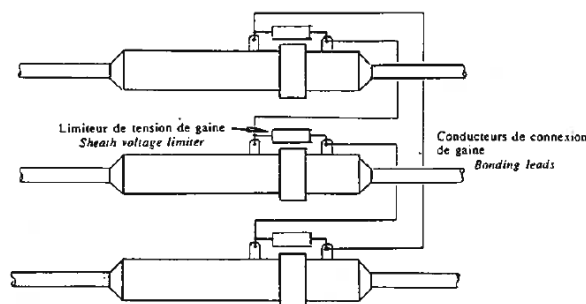
przy czym parametry I_m , α oraz β dobrano tak, aby uzyskać najwierniejsze przybliżenie udaru znormalizowanego [9], przebieg przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Przebieg udaru prądowego

5) Przewody przyłączeniowe do ograniczników przepięć

Założono wykonanie połączenia pomiędzy mufami separacyjnymi a ogranicznikami przepięć w *link-boxach* przewodem miedzianym LgYcyW 1x150 3,6/6 kV o długości 10 m. Sposób wykonania oraz zamodelowanie tego połączenia ma duży wpływ na wartość szczytowej napięcia na przekładkach izolacyjnych przy przepięciach atmosferycznych, które charakteryzują się stromym czołem (znaczną wartością di/dt), a więc generują duże spadki napięć na indukcyjnościach. W artykule ELECTRA [10] jako najlepszy sposób (ze względu na wartości szczytowych napięć udarowych) wskazano bezpośrednie przyłączenie ograniczników do zacisków muf separacyjnych, choć rozwiązanie to jest trudne do praktycznej realizacji. Zalecane jest więc stosowanie możliwie najkrótszych połączeń oraz przewodów koncentrycznych w celu ograniczenia ich impedancji udarowej.

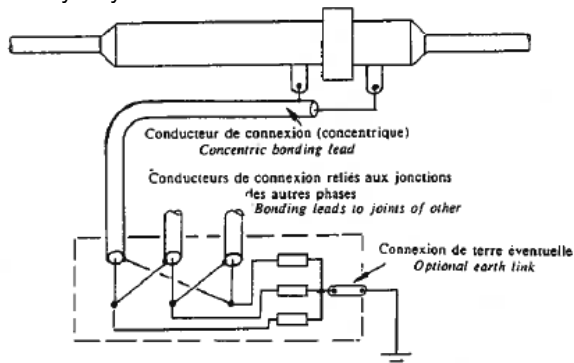


Rys.5. Najlepsze miejsce instalacji ograniczników przepięć wg [10]

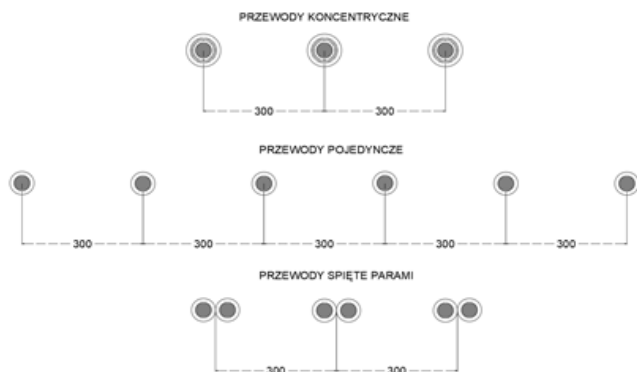
Wg [1] przewody do ograniczników mogą być reprezentowane przez indukcyjność, jednak podawane w literaturze wartości mają bardzo szeroki zakres (od 0,1 $\mu H/m$ do 1,2 $\mu H/m$).

W celu pokazania pełnego obrazu sytuacji, przewody przyłączeniowe zamodelowano na cztery sposoby jako:

- indukcyjności o wartości 12,32 μH ,
- model szerokopasmowy linii z przewodami spiętymi parami,
- model szerokopasmowy linii z przewodami oddalonymi,
- model szerokopasmowy linii z przewodami koncentrycznymi.



Rys.6. Zalecany sposób przyłączenia ograniczników przepięć wg [10]



Rys.7. Analizowane sposoby realizacji połączenia między mufami separacyjnymi a ogranicznikami przepięć

Dla uściślenia należy dodać, że żaden z podanych sposobów nie reprezentuje w pełni owego połączenia, m.in. ze względu na zmienną orientację przestrzenną przewodów w rzeczywistych układach. Można jednak założyć, że użycie modelu szerokopasmowego, tj. modelowanie tego połączenia jako krótkich odcinków ułożonych na niewielkiej głębokości w ziemi, stanowi dobre przybliżenie układu rzeczywistego.

D. Wyniki symulacji

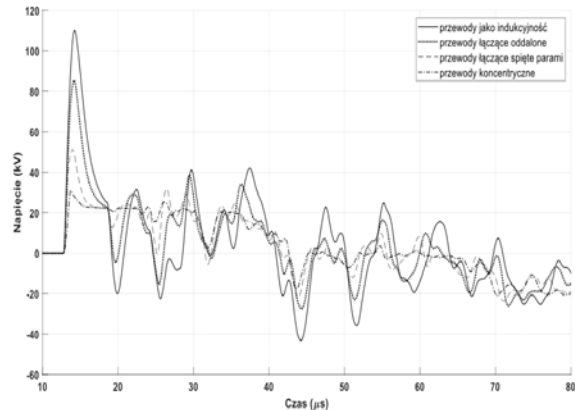
Na poniższych wykresach przedstawiono wyniki symulacji przy założeniu uderzenia pioruna w przewód fazowy na pierwszym przęśle linii napowietrznej, tj. bezpośrednio przy słupie kablowym.



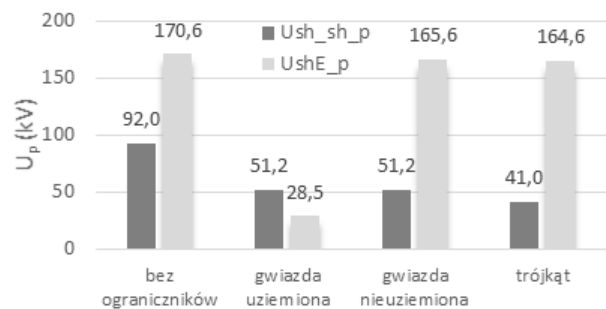
Rys.8. Mufa separacyjna z widocznymi wyprowadzeniami i oznaczeniami badanych napięć [11]

Jak pokazano na rysunku 9 zastosowanie przewodów o indukcyjności 12,32 μH skutkuje przepięciem o wartości szczytowej ponad 110 kV. Ponad trzykrotnie niższą wartość uzyskuje się dla trzech przewodów koncentrycznych, przy

czym należy zwrócić uwagę, że jest to rozważanie jedynie teoretyczne, gdyż tego typu przewody o wymaganym przekroju (150 mm^2 zarówno dla żyły, jak i ekranu) nie są dostępne na rynku. Na podstawie tych wyników można sformułować zalecenie, by w powszechnym przypadku stosowania sześciu osobnych przewodów prowadzić je możliwie blisko siebie (spinać) w parach. Dla takiego sposobu wykonania przeprowadzone zostały dalsze symulacje.



Rys.9. Przebiegi napięcia na przekładkach izolacyjnych w miejscu krzyżowania żył powrotnych najbliższej słupa kablowego dla różnych modeli połączenia między mufami a ogranicznikami przepięć



Rys.10. Najwyższe wartości szczytowe napięć na przekładkach izolacyjnych ($U_{sh_sh_p}$) oraz na żyłce powrotnej kabla względem ziemi lokalnej (U_{shE_p}) w zależności od sposobu połączenia ograniczników przepięć

Wyniki przedstawione na rysunku 10 jednoznacznie wskazują na skuteczność realizowanej przez SVL ochrony przekładek izolacyjnych w mufach. Przy połączeniu w gwiazdę przepięcie osiąga ok. 51 kV, a więc mniej niż wynosi wytrzymałość udarowa przekładek izolacyjnych (75 kV wg [12]). Połączenie w trójkąt ogranicza wartość szczytową przepięcia do 41 kV, gdyż wówczas U_{sh_sh} jest równe sumie napięć na jednym ograniczniku i przewodach doprowadzających, a nie, jak w przypadku połączenia gwiazdowego, napięć na dwóch ogranicznikach.

O ile uziemienie (lub jego brak) punktu gwiazdowego nie ma wpływu na szczytową wartość napięcia $U_{sh_sh_p}$, to tylko układ uziemionej gwiazdy zmniejsza narażenie osłony zewnętrznej kabla. Dzieje się tak dzięki zwiększeniu lokalnego potencjału ziemi w pobliżu uziomu, co zmniejsza napięcie żyły powrotnej względem ziemi lokalnej, podobnie jak ma to miejsce na końcach głównych sekcji linii kablowej, gdzie żyły powrotne są uziemione. Broszura [1] zwraca jednak uwagę, że efekt ten występuje tylko lokalnie, tj. maksymalnie kilkadziesiąt metrów od końców sekcji linii kablowej, dlatego należy pamiętać, że głównym zadaniem SVL jest ochrona przekładek izolacyjnych w mufach separacyjnych, a nie zapewnianie ochrony osłony kabla na całej długości linii.

Określenie napięcia trwałej pracy ograniczników przepięć

Przedstawiony powyżej przykład wykazał rolę SVL w układach z krzyżowaniem żył powrotnych. Oczywiście jest, że im niższe napięcie znamionowe SVL, tym niższe napięcia obniżone, a więc lepsza ochrona narażonych na uszkodzenie elementów systemu kablowego. Z drugiej jednak strony, przepięcia dorywcze przy niewłaściwie dobranych ogranicznikach (o zbyt niskim napięciu trwałej pracy U_c) mogą prowadzić do ich uszkodzenia. Jak wskazano, uziemiona gwiazda jest najbardziej optymalna pod względem zapewnianej ochrony, jednak to w tym układzie pojawiają się najwyższe napięcia na SVL przy przepięciach dorywczych. Napięcie trwałej pracy ograniczników U_c powinno być wyższe od najwyższego napięcia, jakie może w najbardziej niekorzystnych warunkach wystąpić na ich zaciskach podczas zakłócenia (zwarcia). Obliczenia napięć indukowanych należy więc uznać za kluczowy element prac przy określaniu wymaganych parametrów ograniczników dla projektowanych systemów.

Obliczenia te można wykonać trzema metodami, stosując:

- wzory uproszczone,
- CIM (ang. *Complex Impedance Matrix*),
- oprogramowanie EMTP.

A. Wzory uproszczone

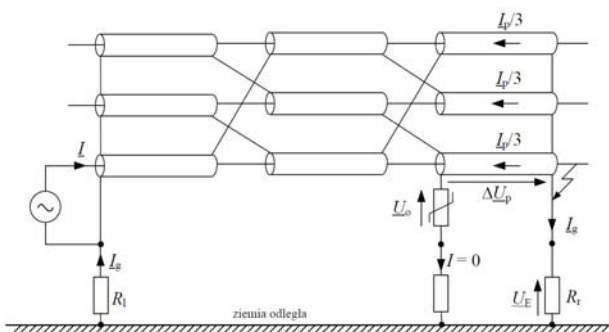
Odpowiednie wzory do uproszczonych obliczeń napięć indukowanych (50 Hz) znaleźć można np. w opracowaniu wydanym przez PSE S.A. [13]. Wzory te zaczerpnięto m.in. z broszur CIGRE ([1], [14]), a wyprowadzono na podstawie ogólniejszych równań macierzowych opisujących system kablowy. Ich powtarzanie w tym miejscu byłoby bezcelowe. Ograniczymy się jedynie do stwierdzenia faktu, że rozważane są jedynie zwarcia jedno- i trójfazowe na końcu linii kablowej, a warunek doboru SVL określono jako:

$$(2) \quad U_c \geq |U_o|_m$$

gdzie:

$$(3) \quad |U_o|_m = \max\{U_{o1f}, U_{o3f}\}$$

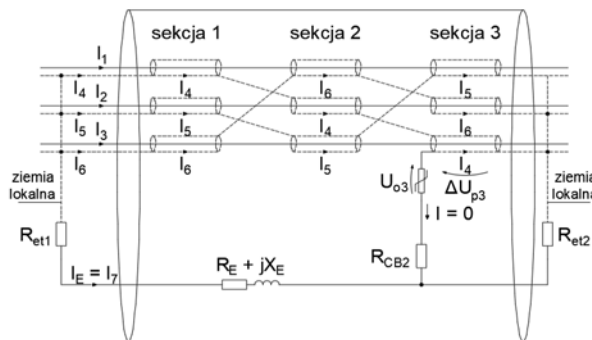
U_{o1f} i U_{o3f} to odpowiednio napięcia na SVL przy zwarcu jedno- i trójfazowym. Co istotne, zakłada się, że linia kablowa łączy dwie stacje elektroenergetyczne. Dla innych przypadków, tj. wstawki kablowej do linii napowietrznych lub wyprowadzenia kablowego ze stacji na linię napowietrzną, opracowanie [13] zaleca zastąpienie we wzorach rezystancję R_r , R_l lub ich obu (rys.11) wypadkowymi impedancjami systemu uziemień, obejmujących rezystancję uziemienia słupa kablowego, pozostałych słupów w linii oraz impedancje linek odgromowych, jako elementów obwodu ziemnopowrotnego lub skorzystanie z gotowych zależności podanych w [14].



Rys.11. Schemat linii kablowej w układzie CB podczas zwarcia jednofazowego [13]

B. Complex Impedance Matrix

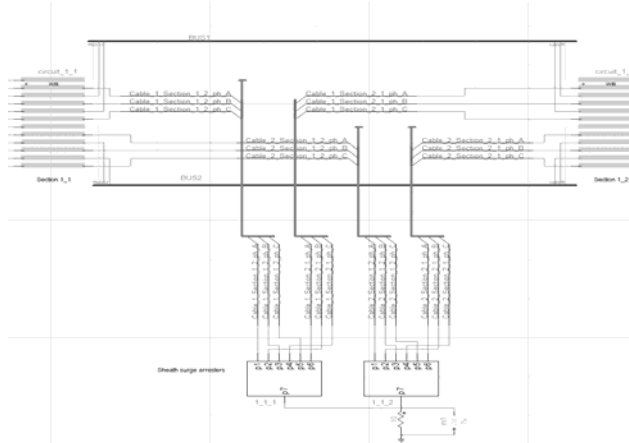
Metoda ta została opisana w broszurze CIGRE nr 283 [1] i opiera się na reprezentacji linii kablowej jako zespołu przewodników (żyły robocze, żyły powrotne, ziemia równoważna, kabel ECC) zamkniętych w fikcyjnym cylindrze o określonych warunkach brzegowych. Pomijane są przy tym wszelkie pojemności w układzie, a obwód ziemnopowrotny jest odwzorowany przez równoważny przewód. W efekcie uzyskuje się zespół równań macierzowych określających relacje między prądami i napięciami w przewodnikach. Zaletą tej metody jest możliwość wykonania obliczeń dla różnych rodzajów zwarć, przy dowolnej geometrii ułożenia kabli, a także z wieloma torami czy opcjonalnym kablem ECC, zaś wadą – znaczne skomplikowanie równań, w szczególności w układach z cross-bondingiem, które wymagają modyfikacji oryginalnych równań pętli prądowych zawartych w [1]. Równania macierzowe rozwiązuje się numerycznie przy pomocy odpowiedniego oprogramowania, np. MATLAB®.



Rys.12. Schemat równoważny linii kablowej z krzyżowaniem żył powrotnych w metodzie CIM

C. Symulacje komputerowe

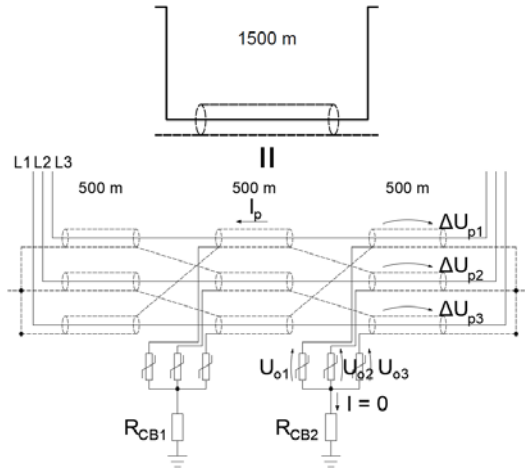
Oprogramowanie EMTP daje możliwość kompleksowego modelowania systemów z uwzględnieniem wszystkich zależności pomiędzy elementami składowymi. Jest to szczególnie, ale jednocześnie najbardziej skomplikowana reprezentacja rzeczywistych układów. Możliwe jest modelowanie nie tylko samej linii kablowej, ale również pozostałych elementów, takich jak stacje elektroenergetyczne, transformatory, generatory, linie napowietrzne, itd., w związku z czym uzyskuje się wgląd w zjawiska mające miejsce w różnych miejscach systemu, co umożliwia lepsze zrozumienie zależności i wzajemnego wpływu poszczególnych parametrów np. na wartości napięć indukowanych. Z drugiej jednak strony, uzyskanie wiarygodnych wyników wymaga wiedzy, doświadczenia i umiejętności w zakresie modelowania elektro-magnetycznych stanów przejściowych.



Rys.13. Fragment modelu dwutorowej linii kablowej z cross-bondingiem w EMTP-RV

Wyniki obliczeń

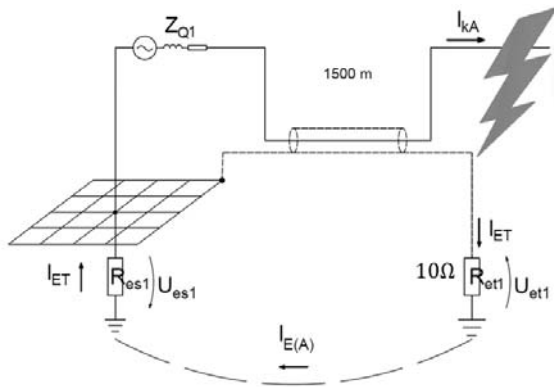
Trzy opisane powyżej metody wykorzystano do obliczeń napięć indukowanych we fragmencie systemu elektroenergetycznego, którego podstawowe parametry podano we wcześniejszym przykładzie dotyczącym przepięcia atmosferycznego. Modyfikacje ograniczały się do uproszczenia sposobu modelowania określonych elementów (ograniczników przepięć, słupów linii napowietrznej) oraz zmian w konfiguracji (zasilanie jednostronne, dwa tory linii).



Rys.14. Stosowana konwencja oznaczeń

D. Układ z zasilaniem jednostronnym

Jest to najprostsza konfiguracja, w której linia kablowa zasilana jest jednostronnie (Rys.15). Sytuacja ta odpowiada założeniom w modelu CIM i wzorach uproszczonych. Przyjęto zwarcie na końcu linii.



Rys.15. Linia kablowa z cross-bondingiem zasilana jednostronnie

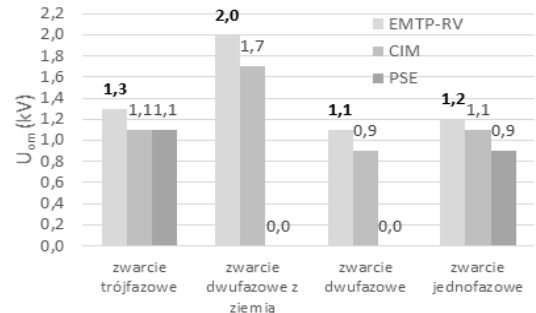
Tabela 2 wskazuje na dobrą zgodność pomiędzy wynikami obliczeń trzema metodami. Różnice w wynikach z EMTP-RV wynikają z dokładniejszego odwzorowania kabli (model szerokopasmowy). Należy jednak zwrócić uwagę, że dla tej kombinacji rezystancji uziemień stacji i prawego końca linii, najwyższe napięcia w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna występują dla faz nieobjętych zwarcie, czego nie uwzględniają wzory wg wytycznych PSE.

Tabela 2 przedstawia wyniki jedynie dla dwóch rodzajów zwarc, dla których napięcia indukowane można wyliczyć ze wzorów zawartych w [13]. CIM i analizy w EMTP-RV umożliwiają również obliczenie tych napięć dla zwarcia dwufazowego (bez lub z udziałem ziemi).

Dla badanego układu największe zagrożenie dla ograniczników ($U_{om} = 2,0$ kV) występuje przy zwarcie dwufazowym z ziemią.

Tabela 2. Wyniki obliczeń napięć na SVL w układzie z Rys.15

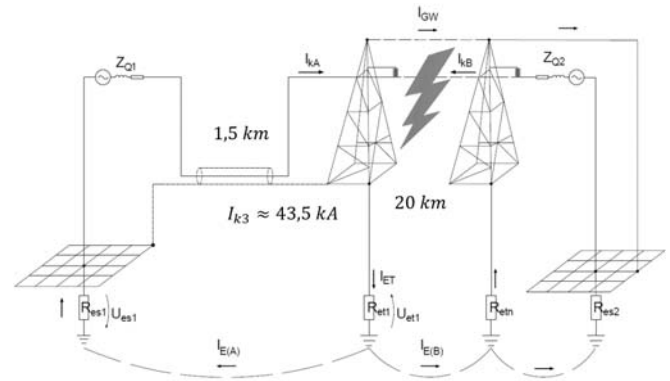
1 tor - zasilanie jednostronne (1 źródło)							
	I_k	U_{et1}	I_p	ΔU_{p1}	U_{o1}	U_{o2}	U_{o3}
	kA	V	A	kV	V	V	V
zwarcie jednofazowe							
EMTP-RV	40,5	1521,9	13170,5	1243,6	994,4	1153,7	1154,7
CIM		1509,3	13196,0	1120,8	867,4	1075,6	1075,6
PSE		1509,0	13197,4	1105,0	-	878,5	-
zwarcie trójfazowe							
EMTP-RV	40,5	6,4	1,0	1311,7	1308,3	1307,7	1311,0
CIM		0,2	0,0	1048,7	1048,7	1048,8	1048,5
PSE		-	-	-	-	1051,0	-



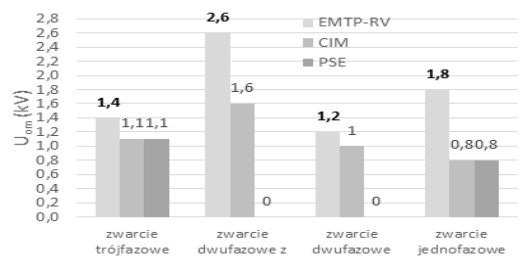
Rys.16. Maksymalna wartość skuteczna napięcia na ogranicznikach przepięć (kV) w układzie z rysunku 15

E. Skalowanie linii napowietrznej na podejściu do stacji o dużej mocy zwarciowej

Jest to konfiguracja identyczna z analizowaną w pierwszym przykładzie (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**). Przyjęto zwarcie na słupie kablowym.



Rys.17. Linia kablowa z cross-bondingiem na podejściu do stacji o dużej mocy zwarciowej



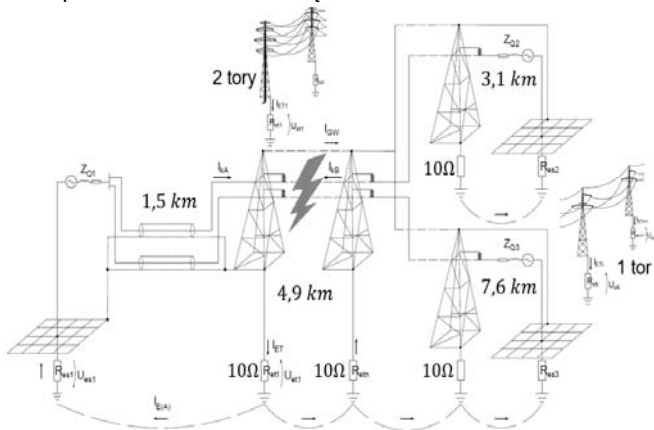
Rys.18. Maksymalna wartość skuteczna napięcia na ogranicznikach przepięć (kV) w układzie z rysunku 17

Do obliczeń wzorami uproszczonymi i metodą CIM wzięto całkowite prądy zwarciowe (założenie, że cały prąd zwarciowy płynie przez kabel), uzyskując w ten sposób wyniki zawyżone niż gdyby uwzględnić tylko tę część prądu zwarciowego, która płynie przez kabel. Mimo tego obliczone

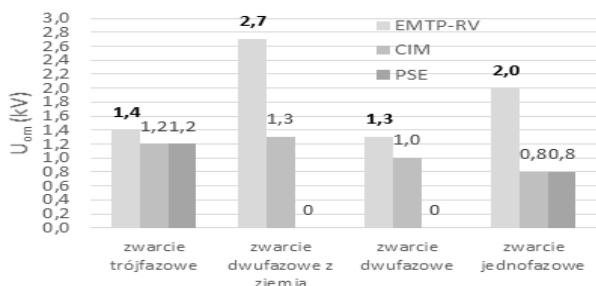
napięcia są niższe nawet do 30 procent niż EMTP-RV, ponieważ metody uproszczone nie uwzględniają we właściwy sposób rozprzysięgu prądu zwarciego, który zamyka się przez przewód odgromowy oraz ziemię (w kierunku obu stacji), powodując znaczny wzrost lokalnego potencjału ziemi w pobliżu słupa kablowego.

F. Dwutorowa linia kablowa na podejściu do stacji o dużej mocy zwarciovej

W tym przypadku zamodelowano fragment systemu obejmujący trzy stacje 110 kV Dwutorowa linia kablowa (odległość między środkami trójkątnego układu kabli wynosi 2 m) znajduje się na podejściu do stacji o największej mocy zwarciovej. Następnie prowadzona jest linia napowietrzna, która po ok. 5 km rozdziela się na dwie osobne linie.

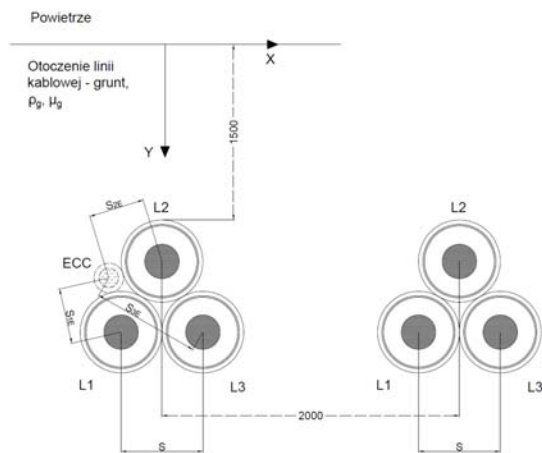


Rys.19. Modelowany system z dwutorową linią kablową



Rys.20. Maksymalna wartość skuteczną napięcia na ogranicznikach przepięć (kV) w układzie z rysunku 19

Wyniki tu przedstawione są bardzo zbliżone do tych z poprzedniego przypadku i odnoszą się do nich takie same uwagi. Najwyższe napięcie na SVL ponownie stwierdza się przy zwarcu dwufazowym z ziemią.



Rys.21. Sposób ułożenia w gruncie dwutorowej linii kablowej z dodatkowym kablem ECC

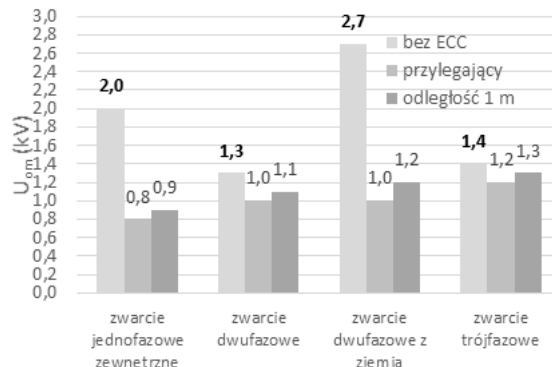
Rozważono także możliwość dodania kabla ECC o przekroju 150 mm², którego dane zawarto w tabeli 1. Kabel ECC nie jest powszechnie instalowany w systemach z krzyżowaniem żył powrotnych, choć można go zastosować, gdy istnieje konieczność zminimalizowania efektu wzrostu lokalnego potencjału ziemi.

Należy mieć jednak na uwadze, że dodanie przewodnika uzziemionego na obu końcach linii oraz w miejscach krzyżowania żył powrotnych tworzy zamkniętą drogę dla prądu, który płynie pod wpływem napięć indukowanych w ECC. W systemie pojawiają się więc straty od prądów płynących również w stanach ustalonych. W normie [15] znajduje się zalecenie, by uwzględnić wpływ tego prądu na obciążalność kabli. W celu określenia jego wartości wykonano symulacje stanu ustalonego w dwutorowej linii kablowej przy obciążeniu każdego z kabli prądem $I_f \approx 800$ A dla dwóch wariantów, tj. z kablem ECC przylegającym do jednego z torów (Rys.21) oraz w odległości 1 m od pierwszego i 3 m od drugiego z torów. Obliczone napięcia przy przepięciach dorywczych również odnoszą się do tych dwóch przypadków.

Tabela 3. Prąd w kablu ECC w stanie ustalonym

$I_f \approx 800$ A	I_{ecc}	U_{om}
	A	V
bez ECC	0	31,9
ECC przylegający	126,2	22,7
ECC w odległości 1 m	8,9	25,4

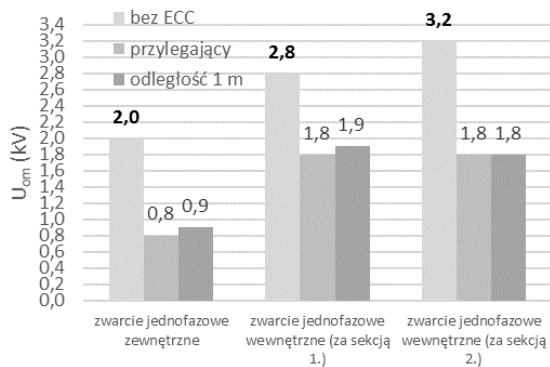
Jak przedstawiono w tabeli 3, prąd w kablu ECC ma znaczną wartość, jednak jego oddalenie na stosunkowo niewielką odległość od kabli fazowych (1 m) redukuje go do pomijalnie małej wartości.



Rys.22. Maksymalna wartość skuteczną napięcia na ogranicznikach przepięć (kV) w układzie z rysunku 19

Powyższe wyniki potwierdzają, że ECC zmniejsza napięcie na ogranicznikach, ponieważ staje się ono niezależne od wzrostu lokalnego potencjału ziemi na końcu linii kablowej. Efekt ten jest szczególnie widoczny w przypadku zważeń doziemnych, a najwyższa wartość napięcia na SVL pojawia się przy zwarcu trójfazowym, nie zaś przy dwufazowym z ziemią jak przy braku tego kabla. Jednocześnie odległość ECC od torów linii kablowej ma marginalny wpływ na wartości napięć indukowanych. Biorąc jednak pod uwagę wpływ miejsca umieszczenia ECC na wartości prądów w tym kablu w stanach ustalonych, kabel ten, o ile w ogóle planuje się jego zastosowanie, nie powinien być układany w bezpośrednim sąsiedztwie torów kablowych.

W celu dopełnienia obrazu sytuacji, przedstawiono również wyniki symulacji zważeń wewnętrznych w kablu, w miejscach krzyżowania żył powrotnych. Założono, że realne jest wystąpienie tylko zważenia jednofazowego do żyły powrotnej kabla.



Rys.23. Maksymalna wartość skuteczna napięcia na ogranicznikach przepięć (kV) w układzie z rysunku 19 przy zwarciach jednofazowych na słupie kablowym i wewnątrz linii kablowej (symulacje w EMTP-RV)

Rysunek 23 wskazuje ponownie na rolę kabla ECC w zmniejszaniu napięć indukowanych. Jednocześnie widać, że zwarcie w miejscu drugiego krzyżowania żył powrotnych (bliżej słupa kablowego) skutkuje największą

Wnioski

1. Analizując doświadczenia eksploatacyjne można stwierdzić, że poza uszkodzeniami linii spowodowanymi przez czynniki zewnętrzne, to praca ograniczników przepięć stanowi o awaryjności systemów kablowych ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych. Z tego względu podstawową kwestią jest odpowiedni dobór tych urządzeń, zapewniający możliwie najlepszą ochronę elementów systemu kablowego przy jednoczesnym zminimalizowaniu ryzyka uszkodzenia samego ogranicznika na skutek przepięć dorywczych. W konsekwencji wymagana jest znajomość największego napięcia na ogranicznikach podczas zwarć w analizowanym systemie. Ograniczniki nie powinny przewodzić przy przepięciach o częstotliwości sieciowej, ponieważ grozi to ich uszkodzeniem.

2. W artykule przedstawiono porównanie wyników obliczeń napięć na ogranicznikach przy przepięciach o częstotliwości sieciowej, występujących w trakcie zwarć różnego typu. Przeanalizowano różne konfiguracje systemu z linią kablową z krzyżowaniem żył powrotnych, w tym możliwości ułożenia dodatkowego kabla ECC. Analiza rezultatów prowadzi do wniosku, że uproszczone metody obliczeniowe dają wiarygodne wyniki w prostych układach, np. w przypadku połączenia dwóch stacji linią kablową. W nieco bardziej skomplikowanych systemach obliczone napięcia mogą być zdecydowanie niższe od tych, które mogą wystąpić w rzeczywistości. Co więcej, wzory uproszczone dostępne są jedynie dla przypadków zwarcia jedno- i trójfazowego. Przykładowo w ostatnim z analizowanych przypadków dobór ograniczników przeprowadzono by przy określeniu wymaganego napięcia ciągłej pracy $U_c \geq 1,2$ kV (zwarcie trójfazowe, Rys.20, wzory uproszczone), podczas gdy na podstawie symulacji stwierdzono, że napięcie to powinno być równe co najmniej 2,7 kV (analiza zwarcia dwufazowego z ziemią).

3. Metody analityczne opierają się na założeniu stanu quasi-ustalonego, nie ma więc możliwości analizy zjawisk przejściowych. Badanie zjawisk dynamicznych, jak np. przepięcie atmosferyczne, wymaga włączenia do tego celu technik komputerowych, tj. programów do analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych, np. EMTP-RV.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Szuchnik, Eltel Networks Energetyka S.A., Gutkowo 81D, 11-041 Olsztyn, E-mail: krzysztof.szuchnik@eltelnetworks.com; inż. Michał Kołtun Centrum Badawczo-Rozwojowe Eltel Networks Energetyka S.A. Gutkowo 81D, 11-041 Olsztyn michal.koltun@eltelnetworks.com

LITERATURA

- Working Group B1.18, Special Bonding of High Voltage Power Cables, *CIGRE Technical Brochure 283*, 2005.
- [2] Szuchnik K., Narażenia osłon/powłok kabli 110 kV od przepięć w układach ze specjalnym uziemieniem żył powrotnych na wprowadzeniu do stacji o dużej mocy zwarciowej - układ SPB, *Przeгляд Elektrotechniczny*, nr 10, październik 2016.
- [3] Mahseredjian. J., Dewhurst C., EMTP-RV User Manual, Powerys, wersja 3.5, 2017.
- [4] Working Group 01 of Study Committee 33, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, *CIGRE*, 1991.
- [5] Working Group 3.4.11, Modeling of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. Power Delivery*, nr 7, 302-309, 1992.
- [6] Saengsuwan T., Thipprasert W., Lightning arrester modeling using ATP-EMTP, w *TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference*, Chiang Mai, Thailand, 2004.
- [7] Protektel Sp.j., Karta katalogowa ograniczników przepięć PROXAR-IVN AC, 2016.
- [8] Protektel Sp.j., Karta katalogowa ograniczników przepięć PROXAR-IIN AC, 2017.
- [9] IEC 60060-1:2010, High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, 2010.
- [10] Working Group 07 of Study Committee 21, Guide to the protection of specially bonded cable systems against sheath overvoltages, *CIGRE*, 1990.
- [11] Pfisterer, Broszura informacyjna muf kablowych IXOSIL SLIP-ON, 2010.
- [12] PN-HD 632 S2:2009 - wersja angielska, Kable energetyczne o izolacji wytłaczanej i ich osprzęt na napięcie znamionowe powyżej 36 kV ($U_m = 42$ kV) do 150 kV ($U_m = 170$ kV).
- [13] Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Dobór ograniczników przepięć instalowanych na żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych 110 kV, 220 kV i 400 kV, Wytuczne projektowe – wskazówki dla projektantów, 2015.
- [14] Working Group B1.26, „Earth Potential Rises in Specially Bonded Screen Systems”, *CIGRE Technical Brochure 347*, 2008.
- [15] IEEE 575-2014, IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV, 2014.
- [16] Abdulwadood S., Design of Lightning Arresters for Electrical Power Systems Protection, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, tom 11, nr 6, 433-442, 2013.
- [17] IEC 60840:2011, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) - Test methods and requirements, 2011.
- [18] Modeling guidelines for fast front transients, *IEEE Transactions on Power Delivery*, tom 11, nr 1, 493-506, 1996.
- [19] Working Group B1.04, Maintenance for HV cables and accessories, *CIGRE Technical Brochure 279*, 2005.
- [20] IEC 60071-4:2004, Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks, 2004.
- [21] IEC 60287-1-1:2006, Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General, 2006.
- [22] Working Group C4.407, Lightning Parameters for Engineering Applications, *CIGRE Technical Brochure 549*, 2013.