

Korzyści i wyzwania związane z rozwojem wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych WN i NN

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych (WWLN) występujących w Polsce, a także przeanalizowano możliwości poprawy warunków środowiskowych w przypadku prowadzenia takich linii w ujęciu zapewnienia niezbędnego terenu do ich budowy oraz wystąpienia maksymalnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego w ich otoczeniu. Artykuł zwraca uwagę na możliwość pojawienia się napięć składowych zerowych, mimo symetrycznego obciążenia i zasilania tych linii, szczególnie w torach o najniższych napięciach, co jest skutkiem niesymetrii geometrycznej linii.

Abstract. The article discusses the multi-circuit, multi-voltage overhead lines and analyzes the potential for improving the environmental conditions around the lines is discussed in terms of the necessary area for their construction and the peak electromagnetic field strength in their vicinity. Specific attention is given to the possibility of zero-sequence voltage that occurs in the systems despite the symmetric supply and load of circuits that result from the line's geometric asymmetry. (Benefits and Challenges Resulting from the Development of Multi-Circuit Multi-Voltage Overhead Lines).

Słowa kluczowe: linie napowietrzne, pole elektromagnetyczne, niesymetria, napięcie zerowe, przepłot.

Keywords: overhead line, electromagnetic field, asymmetry, zero-sequence voltage, transposition.

WWLN wysokich najwyższych napięć w KSE

WWLN to linie napowietrzne, w których co najmniej dwa tory prądowe o różnym poziomie napięcia znamionowego są prowadzone na wspólnej konstrukcji wsporczej. W Polsce pracuje sześć WWLN:

- linia czterotorowa trójnapięciowa relacji Plewiska-Kromolice (400 + 110 kV), Plewiska-Konin (400 kV), Plewiska-Poznań Południe (220 kV) o długości 31,2 km;
- linia trójtorowa dwunapięciowa relacji Łagisza-Tuczawa (400 kV), Łagisza-Rokitnica (400 kV), Łagisza-Wrzosowa-Joachimów (220 kV) o długości 4,8 km;
- linia trójtorowa dwunapięciowa relacji Pasikowice-Wrocław (400 + 2×110 kV) o długości 6,5 km;
- linia trójtorowa dwunapięciowa relacji Gdańsk Przyjaźń-Gdańsk Błonia (2×400 kV), Gdańsk Przyjaźń-Gdańsk I (220 kV) o długości 5,3 km;
- linia dwutorowa dwunapięciowa relacji Świebodzice-Wrocław (400 + 110 kV) o długości 14,0 km;
- linia dwutorowa dwunapięciowa relacji Mory-Towarowa (220 + 110 kV) o długości 7,5 km.

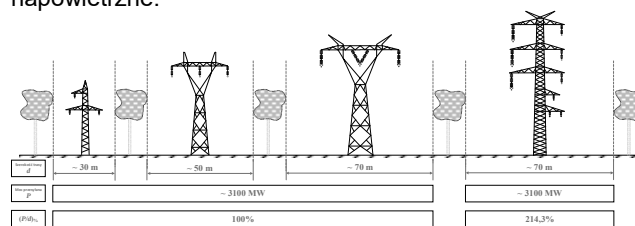
Przewiduje się dalszy rozwój WWLN w KSE o czym świadczy m.in. planowana budowa linii trójtorowej dwunapięciowej 2×400 + 220 kV relacji Byczyna-Podborze o długości około 60 km [1].

Intensyfikacja wykorzystania terenu zajmowanego przez linie napowietrzne

Szerokość trasy potrzebna do prowadzenia linii napowietrznej jest kompromisem między aspektami technicznymi gwarantującymi poprawną pracę sieci, uwarunkowaniami terenowymi, gabarytami konstrukcji wsporczej linii przesyłowej oraz bezpieczeństwem innych urządzeń i organizmów żywych znajdujących się w jej otoczeniu. Na rysunku 1 przedstawiono trzy sylwetki tradycyjnych jednotorowych jednonapięciowych linii napowietrznych oraz linię trójtorową konstrukcji wielonapięciowej (400 + 220 + 110 kV) wraz z szacunkowymi szerokościami ich pasów technologicznych d oraz szacowanymi mocami przesyłanymi P . Przyjmując, że stosunek sumarycznej mocy przewodowej linii tradycyjnych do sumarycznej szerokości ich pasów technologicznych wynosi 100%, to dla przypadku prowadzenia tych linii na

wspólnym słupie (wariant WWLN) stosunek ten wzrasta do 214,3%.

Podwyższanie napięć przesyłowych z równoczesnym prowadzeniem linii na wspólnej konstrukcji pozwala znacznie ograniczyć łączną szerokość pasa linii, w tym przypadku o 80 m, tj. 53%, a przez to wzrasta również stopień wykorzystania terenu zajmowanego przez linie napowietrzne.



Rys.2. Wizualizacja intensyfikacji wykorzystania terenu zajmowanego przez WWLN

Pole elektromagnetyczne w otoczeniu WWLN

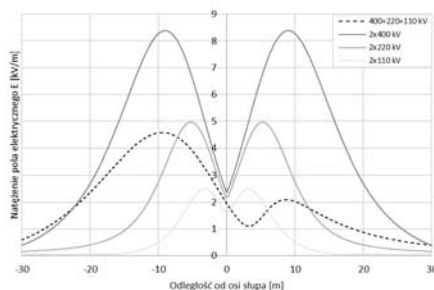
Istotną kwestią związaną z użytkowaniem napowietrznych linii przesyłowych jest występowanie pola elektromagnetycznego w ich otoczeniu w ujęciu narażeń środowiskowych. Zależność między poziomem pola elektromagnetycznego i spodziewanymi skutkami jego oddziaływania na organizmy żywe, w tym człowieka, znalazły szczególne zainteresowanie takich organizacji jak ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), Council of European Union, WHO (World Health Organization). Z uwagi na to, że linie napowietrzne wysokich napięć są obiektami obejmującymi swym zasięgiem znaczne obszary terenu, na których mogą przebywać ludzie, opracowano szczegółowe przepisy określające warunki budowy linii napowietrznych wysokiego napięcia pod kątem ograniczenia zasięgu powstających wokół nich pól elektromagnetycznych. Zgodnie z polskimi przepisami i normą [2,3] dopuszczalne dla miejsc dostępnych dla ludzi poziomy natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wynoszą kolejno 10 kV/m i 60 A/m. Ponadto na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową natężenie pola elektrycznego nie może przekraczać wartości 1 kV/m. Warto podkreślić, że przepisy polskie należą do najbardziej restrykcyjnych w świecie.

Na wartość natężenia pola elektromagnetycznego generowanego przez linię przesyłową mają wpływ przede wszystkim układ geometryczny jej przewodów, napięcie znamionowe oraz obciążenie linii.

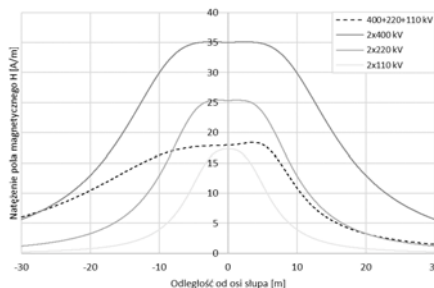
Obecne problemy pojawiające się w procesie rozbudowy infrastruktury sieciowej opierają się przede wszystkim na oporze społecznym wynikającym z obawy przed oddziaływaniem elektromagnetycznym napowietrznych linii przesyłowych wysokiego napięcia. Ze względu na fakt, że WWLN przeważnie przewyższają gabarytami linie jedno- lub dwutorowe, jak również charakteryzują się większą liczbą przewodów fazowych, obawy społeczne przy ich budowie są jeszcze większe, z tego powodu wyznaczanie i publikacja takich wartości jest bardzo istotna.

W tym celu dokonano porównania wartości natężenia pola elektromagnetycznego dla linii dwutorowych 110 kV, 220 kV, 400 kV z linią trójtorową trójnapięciową (400+220+110 kV, rys. 4). Natężenie pola wyznaczono w miejscu największego zwisu przewodów. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono jeden z przykładowych zestawów uzyskanych wyników natężenia pola elektrycznego E oraz magnetycznego H wyznaczanych w zależności odległości od osi słupa. Wartość natężenia pola elektromagnetycznego określano na wysokości 2 metrów od ziemi, która zwykle podawana jest jako wartość normowa. Krzywe E i H otrzymane dla WWLN są niesymetryczne względem osi y co wynika z niesymetrycznej budowy tej linii (rys. 4).

Dla pola elektrycznego E osiąga się mniejszą wartość maksymalną przy zastosowaniu WWLN niż w przypadku linii dwutorowych 2×400 kV oraz 2×220 kV, mimo zwiększonej liczby torów prądowych linii (rys. 2). Dopuszczalną wg polskich przepisów wartość E (1 kV/m) osiąga się przy około 27 metrach od osi słupa dla WWLN oraz przy około 25 metrach od osi słupa dla linii 2×400 kV. Wartości te mieszczą się nadal w szerokości pasów technologicznych linii przesyłowych.



Rys. 2. Krzywe natężenia pola elektrycznego E w funkcji odległości od osi słupa dla czterech badanych linii napowietrznych



Rys. 3. Krzywe natężenia pola magnetycznego H w funkcji odległości od osi słupa dla czterech badanych linii napowietrznych

Dla wszystkich rozważanych linii, natężenie pola magnetycznego jest znacznie niższe niż ustalona graniczna

wartość dopuszczalna, mimo wyznaczania go przy przyjęciu pełnego obciążenia linii prądami dopuszczalnymi. Osiągana wartość maksymalna w przypadku WWLN jest około dwukrotnie mniejsza niż w przypadku tradycyjnej linii dwutorowej o napięciu znamionowym 400 kV (rys. 3).

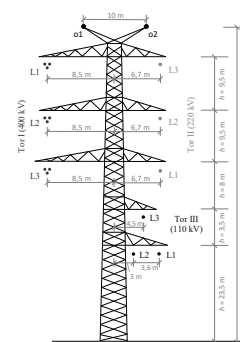
Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie WWLN nie powoduje pogorszenia się warunków oddziaływania pola elektromagnetycznego pochodzącego od linii napowietrznych na środowisko naturalne.

Analiza niesymetrii WWLN

W przypadku linii trójtorowej uzyskanie pełnej symetrii impedancyjnej wymaga wykonania 36 pojedynczych przeplotów przewodów fazowych, gdzie przez pojęcie pojedynczy przeplot rozumie się zmianę położenia wszystkich przewodów fazowych jednego toru. Ze względu na strukturę układu przewodów w WWLN oraz różnych poziomów napięć poszczególnych jej torów, transpozycja przewodów fazowych jest skomplikowana pod względem technicznym i logistycznym. Nie bez znaczenia pozostaje aspekt ekonomiczny, ponieważ przeważnie dla linii o większej liczbie torów transpozycja przewodów roboczych wymaga wykorzystania dodatkowego słupa, co zwiększa koszty jej budowy. Przedstawione argumenty skutkują w praktyce zaniechaniem stosowania symetryzacji linii poprzez przeplot jej przewodów.

Zasilanie linii niesymetrycznej, tj. w której nie zastosowano transpozycji przewodów fazowych, napięciem symetrycznym kolejności zgodnej i obciążenie jej prądem wyłącznie kolejności zgodnej powoduje wyindukowanie się napięć wszystkich składowych symetrycznych.

W celu określenia spodziewanej niesymetrii impedancyjnej i pojemnościowej linii i jej skutków na pracę sieci przesyłowej w ujęciu zapewnienia żądanej jakości energii elektrycznej, wyznaczono wartości napięcia zerowego na końcu nieobciążonego toru o najniższym napięciu znamionowym. Sylwetkę badanej WWLN przedstawiono na rysunku 4. Sposób wyznaczania napięcia U_0 opisano szerzej w [4].



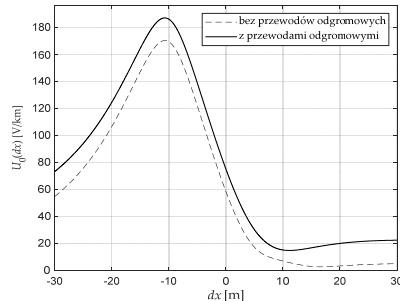
Rys. 4. Rozważana sylwetka WWLN

Niesymetria impedancyjna WWLN

W celu zbadania wpływu niesymetrii impedancyjnej linii na wartość indukowanego napięcia zerowego, niesymetryczną WWLN zasilono w węzłach początkowych napięciem symetrycznym kolejności zgodnej oraz obciążano prądem zgodnym w węzłach końcowych torów I (400 kV) i II (220 kV) wartościami prądów dopuszczalnych długotrwale tych torów. Wartość napięcia zerowego U_0 została wyznaczona w funkcji położenia badanego toru III (110 kV). Zbadano również wpływ oddziaływania przewodów odgromowych na wartość indukowanego napięcia zerowego.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność napięcia zerowego U_0 indukowanego w torze III, wynikającego z niesymetrii impedancyjnej linii, w funkcji lokalizacji

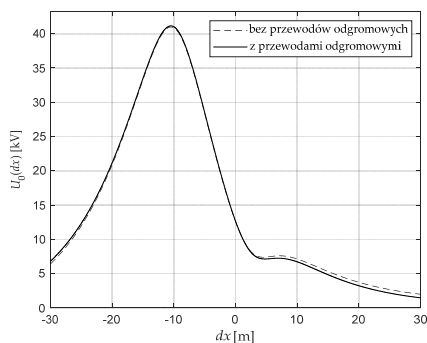
badanego toru względem osi słupa (rys. 4). Największe wartości napięcia U_0 uzyskuje się dla położenia toru III pod torem I (400 kV). Dla takiego usytuowania toru III napięcie zerowe osiąga wartość 183 V/km (przy uwzględnieniu przewodów odgromowych). Dla rzeczywistego położenia badanego toru, tj. $dx = (3 - 6,6)$ m, wartość indukowanego napięcia zerowego wynosi 30 V/km. Występowanie przewodów odgromowych wpływa na wzrost indukowanego napięcia U_0 o około (10-20) V/km.



Rys. 5. Napięcie zerowe U_0 (wyznaczone na 1 km długości linii) wynikające z niesymetrii reaktancyjnej badanej WWLN w funkcji położenia toru 110 kV względem osi słupa

Niesymetria pojemnościowa WWLN

Tak jak w przypadku parametrów wzdłużnych, brak symetryzacji fazowej linii prowadzi do powstania niesymetrii pojemnościowej. W przypadku linii przesyłowych o różnym poziomie napięć znamionowych współdzielących konstrukcję wsporczą, skutek niesymetrii pojemnościowej linii jest przede wszystkim zauważalny dla sieci o najniższym napięciu. Dla linii przesyłowych wysokich napięć pojawienie się dodatkowego napięcia może mieć wpływ na niepoprawną pracę zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz pojawienie się prądów składowej zerowej o znacznych wartościach w normalnych stanach pracy sieci.



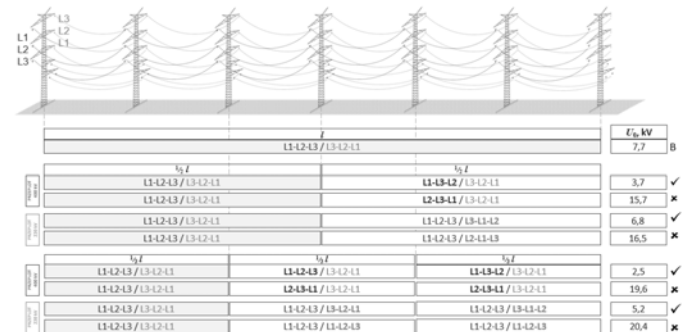
Rys. 6. Napięcie zerowe U_0 wynikające z niesymetrii pojemnościowej badanej WWLN w funkcji położenia toru 110 kV względem osi słupa

Wpływ niesymetrii pojemnościowej WWLN na wartość pojawiającego się napięcia zerowego w badanym torze III przedstawia rysunek 6. Usytuowanie badanego toru III pod torem I (400 kV) powoduje znaczny wzrost napięcia zerowego do wartości 42 kV, co stanowi 38% wartości napięcia znamionowego tego toru. Dla rzeczywistego położenia toru 110 kV napięcie U_0 osiąga wartość 7,7 kV ($0,07U_{nIII}$). W tym przypadku nie obserwuje się znaczącego wpływu przewodów odgromowych na wartość napięcia U_0 .

Redukcja napięcia zerowego poprzez przeplot przewodów fazowych

Efekt redukcji napięcia zerowego można uzyskać poprzez symetryzację linii napowietrznej czyli poprzez przeplot jej przewodów fazowych.

Na rysunku 7 zaprezentowano wartości napięcia U_0 osiąganego w badanym torze przy zastosowaniu wybranych transpozycji przewodów fazowych pozostałych torów, tj. zastosowanie niepełnego przeplotu przewodów fazowych w połowie długości WWLN oraz w 1/3 i 2/3 jej długości. Indeks „B” oznaczono układ bazowy przewodów WWLN (rys. 4), indeksem „✓” oznaczono układ faz, dla którego uzyskano największą redukcję napięcia U_0 , a indeksem „✗” układ faz, dla którego napięcie zerowe najbardziej wzrosło.



Rys. 7. Napięcie U_0 przy zastosowaniu przeplotu przewodów fazowych toru 400 lub 220 kV przy podziale WWLN na dwie i trzy równe części/długości

W zależności od zastosowanego układu przewodów fazowych uzyskuje się efekt redukcji lub eskalacji U_0 .

Wnioski końcowe

Zastosowanie WWLN niesie za sobą szereg korzyści zarówno technicznych, jak i ekonomicznych, o czym świadczy szansa redukcji terenu zajmowanego przez linie napowietrzne przy zachowaniu przesyłanej mocy do odbiorców oraz zmniejszenie maksymalnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii.

Skutkiem niesymetrii geometrycznej WWLN jest pojawienie się składowej symetrycznej zerowej napięcia w torach niezasilonych pod wpływem niesymetrycznego napięcia w innych torach (niesymetria pojemnościowa) oraz w torach nieobciążonych (niesymetria impedancyjna). Wpływ składowej zerowej napięcia jest szczególnie widoczny w torach o najniższym napięciu znamionowym i jest on różny dla różnej geometrii linii, stąd konieczna jest optymalizacja położenia torów względem siebie (rys. 5, 6).

W celu eliminacji napięcia zerowego, konieczne jest wykonanie przeplotu przewodów fazowych linii o wyższym napięciu (w analizowanym przypadku WWLN – torów I i/lub II).

Autorzy: dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. PŚ, E-mail: Henryk.Kocot@polsl.pl, mgr inż. Agnieszka Dziendziel, doktorantka, E-mail: Agnieszka.Dziendziel@polsl.pl; Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 40-100 Gliwice.

LITERATURA

1. Projekt planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2021-2030. PSE S.A., Konstancin-Jeziorna, grudzień 2019.
2. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. 2019, poz. 1883).
3. PN-EN 50341-1:2013-03: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne.
4. Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines, *Energies*, vol. 14, iss. 2, 2021.