

Wykorzystania pasów technologicznych linii przesyłowych 400 kV do rozbudowy sieci dystrybucyjnych

Streszczenie. Artykuł dotyczy analizy możliwości wykorzystania pasów technologicznych linii przesyłowych 400 kV do rozbudowy sieci dystrybucyjnych. Analizę tę przeprowadzono z zastosowaniem opracowanych i zweryfikowanych eksperymentalnie modeli do wyznaczania pola elektrycznego w otoczeniu linii. Modele obliczeniowe wykorzystano do badań szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego linii 400 kV, jednak otrzymane wnioski są słuszne także dla linii o innych napięciach znamionowych.

Abstract. This article deals with the analysis of the possibility of using the right-of-way of 400 kV transmission lines for the expansion of distribution grid. This analysis was carried out using models developed and experimentally verified for determining the electric field in the vicinity of lines. The computational models were used to study the widths of the zones of influence of the electric field of 400 kV lines, but the conclusions obtained are also valid for lines of other voltage (**Usage of 400 kV transmission lines right-of-way for an expansion of distribution grid**).

Słowa kluczowe: pas technologiczny, linie napowietrzne, pole elektryczne, napięcie indukowane.

Keywords: right-of-way, overhead line, electric field, induced voltage

Wstęp

Polski system elektroenergetyczny stanął przed wyzwaniem koniecznej i trudnej transformacji. Obserwuje się duży i dynamiczny rozwój sektora mikroinstalacji fotowoltaicznych montowanych przez osoby prywatne, a także rosnącą liczbę inwestycji w farmy fotowoltaiczne o mocach rzędu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset megawatów. Działania te, wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, wynikającym w pewnym stopniu ze zmiany stylu życia i przyzwyczajzeń konsumentów, obnażyły słabość systemu elektroenergetycznego w zakresie dystrybucji energii elektrycznej na poziomie średniego i wysokiego napięcia.

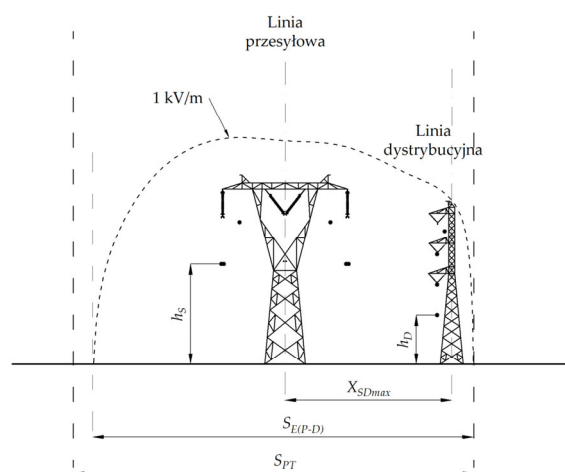
Wskutek tak dynamicznych procesów modernizacji sektora wytwarzania energii elektrycznej, obszar gospodarki związany z jej dystrybucją nie nadąża za postępującymi zmianami. Wynika to z szeregu czynników dotyczących finansowania nowych, jak i modernizowania istniejących linii oraz stacji elektroenergetycznych, a także czynników środowiskowych, kwestii społecznych oraz uwarunkowań prawnych. Operatorzy systemów dystrybucyjnych realizując swoje bieżące zadania, nie dysponują zasobami finansowymi na szybką rozbudowę sieci dystrybucyjnych, szczególnie na poziomie napięcia 110 kV. Dodatkowo procesy inwestycyjne związane z budową tych obiektów mogą trwać nawet kilka lat.

Jednym z zasadniczych elementów procesów inwestycyjnych rozbudowy sieci dystrybucyjnych jest pozyskanie terenu i prawa do gospodarowania nieruchomościami na cele budowlane. Proces ten jest niezmiernie czasochłonny i wymagający znacznego zaangażowania w prowadzenie negocjacji z właścicielami gruntów. Równocześnie wymaga znacznych nakładów finansowych, koniecznych do wykupu gruntów pod stacje elektroenergetyczne oraz na ustanowienie służebności gruntowej przesyłu pod linie dystrybucyjne.

Z powyższych względów pożądane jest poszukiwanie rozwiązań alternatywnych, takich jak lokalizacja linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych. W niniejszym artykule skupiono się na poszukiwaniu głównych czynników i warunków determinujących możliwość bezpiecznej budowy oraz niezawodnej eksploatacji napowietrznych linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych.

Lokalizacja linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych

Podstawą lokalizacji linii dystrybucyjnych w zbliżeniu do linii przesyłowych (rysunek 1) jest wyznaczenie zakresu wartości odległość X_{SD} między osiami linii. Minimalna wartość X_{SD} uwarunkowana jest zapewnieniem wymaganej wytrzymałości elektrycznej odstępu powietrznego, pomiędzy zbliżonymi do siebie przewodami pod wpływem parcia wiatru i powinna być wyznaczona w oparciu o metodę proponowaną w normach [1, 2]. Natomiast maksymalna wartość X_{SD} zależy od skumulowanego pola elektrycznego obu linii na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej (rysunek 1), którego wartość nie powinna przekraczać wartości dopuszczalnej $E = 1$ kV/m.



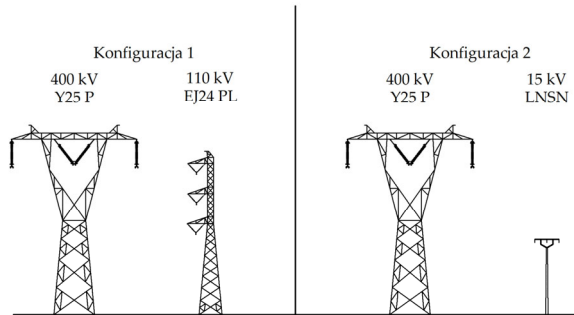
Rys.1. Lokalizacja linii dystrybucyjnej w zbliżeniu do linii przesyłowej: S_{PT} – szerokość pasa technologicznego linii przesyłowej, $S_{E(1kV-D)}$ – szerokość strefy 1 kV/m skumulowanego pola elektrycznego linii przesyłowej i dystrybucyjnej, X_{SD} – odległość między osiami linii

Z przeprowadzonych badań zbliżeń linii dystrybucyjnych 110 kV w układzie pionowym do linii 400 kV na słupach Y25 (rys. 2), wynika, że:

— dla $X_{SD} \leq 19$ m zbliżenie jest niemożliwe ze względu na wytrzymałość elektryczną,

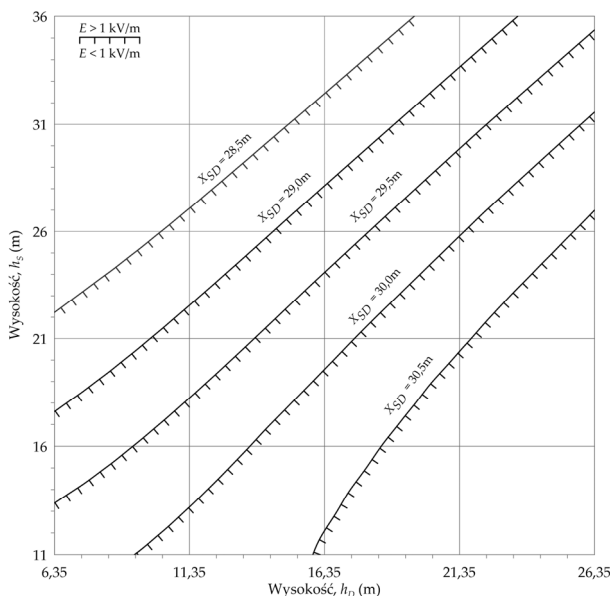
- dla $19 \text{ m} < X_{SD} \leq 28 \text{ m}$ zbliżenie możliwe jest warunkowo przy odpowiednim wzajemnym rozmieszczeniu słupów wzdłuż linii 400 kV i 110 kV,
- dla $X_{SD} > 28 \text{ m}$ zbliżenie możliwe jest niezależnie od rozstawu słupów.

W przypadku zbliżenia linii dystrybucyjnej 15 kV do linii przesyłowej 400 kV powyższe zakresy wynoszą odpowiednio: $X_{SD} \leq 18 \text{ m}$, $19 \text{ m} < X_{SD} \leq 29 \text{ m}$, $X_{SD} > 29 \text{ m}$.



Rys.2. Konfiguracje zbliżenia linii dystrybucyjnej do linii przesyłowej

Podstawą obliczania skumulowanego pola elektrycznego jest metoda ładunków symulowanych [3, 4]. W metodzie tej rzeczywisty rozkład ładunków na powierzchniach przewodników o znanych wartościach potencjałów jest zastępowany zbiorem ładunków fikcyjnych (symulujących) tak, aby obraz pola elektrycznego wywołany tymi ładunkami był jak najbardziej zbliżony do obrazu pola ładunków rzeczywistych.



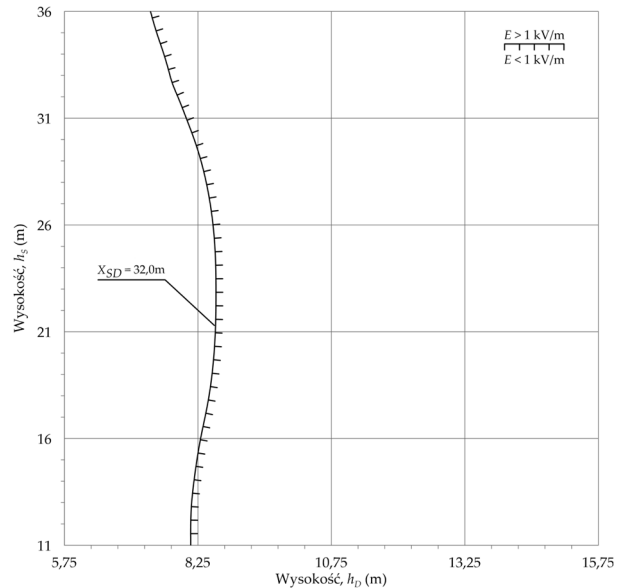
Rys.3. Nomogram $E(h_s, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji zbliżenia linii 110 kV

Celem badań było wyznaczenie skumulowanego oddziaływania natężenia pola elektrycznego w sytuacji zlokalizowania linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej, zgodnie z ideą przedstawioną na rysunku 1. Wyniki badań przedstawiono w postaci nomogramów natężenia pola elektrycznego $E = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej:

$$(1) \quad E(h_s, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m dla } x = S_{PT} / 2$$

Na rysunku 3 przedstawiono nomogram dla zbliżenia linii 110 kV w układzie pionowym do linii 400 kV na słupach

Y25, natomiast na rysunku 4 dla zbliżenia linii 15 kV do linii 400 kV na słupach Y25. Wartości liczbowe parametrów h_S i h_D odpowiadają typowym zakresom wysokości zawieszenia dolnych przewodów fazowych w liniach przesyłowych 400 kV i w liniach dystrybucyjnych 110 kV. Przedstawione na rysunku 3 krzywe dotyczą odległości X_{SD} pomiędzy osiami linii z zakresu 28,5+30,5 m. Ponadto krzywe te stanowią również granice obszarów wartości parametrów h_S i h_D , dla których wartości natężenia pola elektrycznego na granicy pasa technologicznego są większe niż 1 kV/m albo są mniejsze niż 1 kV/m.

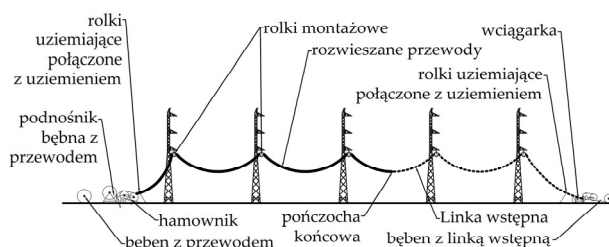


Rys.4. Nomogram $E(h_s, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji zbliżenia linii 15 kV

Natomiast dla wariantu z linią 15 kV (rysunek 4) w analizowany zakres wysokości h_S i h_D zawieszenia przewodów występuje tylko krzywa dla $X_{SD} = 32,0 \text{ m}$. Przeprowadzone badania wykazały bowiem, że w rozważanym zakresie wysokości zawieszenia przewodów, dla odległości $X_{SD} < 32 \text{ m}$, możliwa jest lokalizacja linii dystrybucyjnej 15 kV w pasie technologicznym linii przesyłowej 400 kV bez ryzyka przekroczenia 1 kV/m natężenia pola elektrycznego na granicy tego pasa.

Analiza wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w budowanych liniach dystrybucyjnych

Czynności wykonywane w pobliżu pracujących linii elektroenergetycznych wiążą się z ryzykiem porażenia prądem nie tylko w przypadku bezpośredniego kontaktu z pracującą linią, ale również na skutek indukowania się napięć na narzędziach, maszynach czy elementach budowanej linii [6, 7, 8, 9].

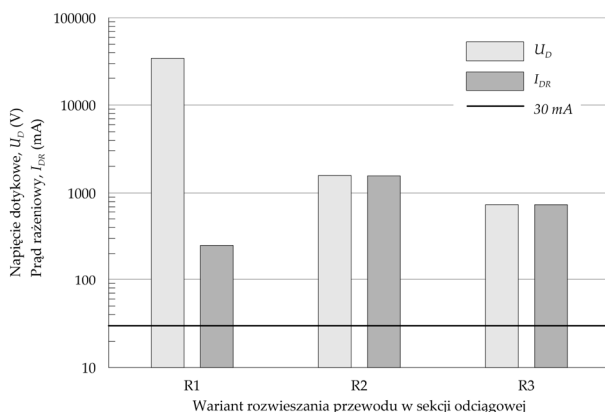


Rys.5. Schemat układu montażu przewodów w sekcji odciągowej

Będzie to mieć miejsce podczas wszystkich prac budowlanych, jednak szczególnie duże zagrożenie występować będzie podczas montażu przewodów (rys. 5), który wykonywany jest metodą naciągową (tzw. metoda wciągarka – hamownik [10]).

W programie EMTP-ATP opracowano modele komputerowe do badań oddziaływań elektromagnetycznych pomiędzy liniami i ich skutków prądowo-napięciowych determinujących zagrożenie porażeniowe dla osób wykonujących prace budowlane dla przypadku rozwieszania przewodów. Spośród wielu możliwych w praktyce wariantów prowadzenia prac montażowych w badaniach rozważono trzy przypadki, które różnią się sposobem uziemienia bębna z hamownikiem, rolę montażowych oraz wciągarki. W wariantcie R1 założono, że żadne z urządzeń nie jest uziemiane. W wariantcie R2 uziemiany jest bęben wraz z hamownikiem, natomiast w wariantcie R3 uziemiane są wszystkie wymienione wcześniej urządzenia.

Przeprowadzone badania wykazały, że podczas budowy linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych należy liczyć się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego. Na rysunku 6 przedstawiono największe spodziewane wartości napięć dotykowych U_D i prądów rażeniowych I_{DR} , jakie mogą wystąpić w wyniku przepływu w linii przesyłowej prądów zwarciovych. Wyznaczone wartości prądów I_{DR} są wielokrotnie większe od wartości 30 mA, uznawanej za próg wystąpienia fibrylacji komórek serca. Tym samym prace związane z rozwieszaniem przewodów wiążą się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego osób realizujących te prace.



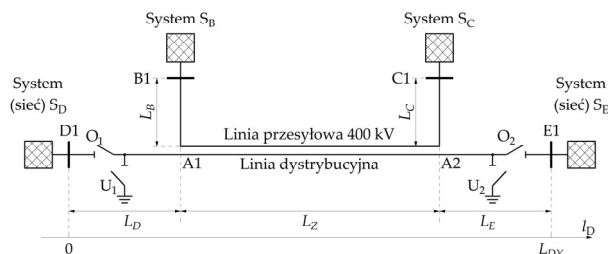
Rys.6. Największe wartości napięć dotykowych U_D i prądów rażeniowych I_{DR} w wariantach R1, R2, R3 rozwieszania przewodów

Badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w eksploatowanych liniach dystrybucyjnych

Eksploatacja linii dystrybucyjnych wybudowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych była kolejnym kluczowym aspektem badań. Znajomość skutków oddziaływania na linie dystrybucyjne istotna jest nie tylko z uwagi na możliwe pogorszenie parametrów określających jakość energii elektrycznej [11], ale również na warunki bezpieczeństwa i higieny pracy. Zagrożenie to występuje podczas przeprowadzania czynności konserwacyjnych, naprawczych oraz remontowych na liniach dystrybucyjnych.

W programie EMTP-ATP odwzorowano modelowy układ sieci przedstawiony na rysunku 7. Układ tworzą: linia przesyłowa 400 kV przyłączona do systemów S_B i S_C oraz linia dystrybucyjna przyłączona do systemów (sieci) S_D i S_E . Linie te pomiędzy punktami B1 i C1 są do siebie zbliżone

na długości L_Z , w wyniku lokalizacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej. Długość linii przesyłowej wynosi $L_{SY} = L_B + L_Z + L_C$, gdzie L_B oraz L_C są długościami odcinków linii 400 kV pomiędzy punktami B1–A1 oraz A2–C1. Natomiast długość linii dystrybucyjnej wynosi $L_{DY} = L_D + L_Z + L_E$, gdzie L_D , L_E długościami odcinków D1–A1, A2–E1. Schemat zawiera również odłączniki O1, O2 oraz uziemniki U1, U2, których zamknięcie bądź otwarcie odwzorowuje różne stany pracy linii dystrybucyjnej.

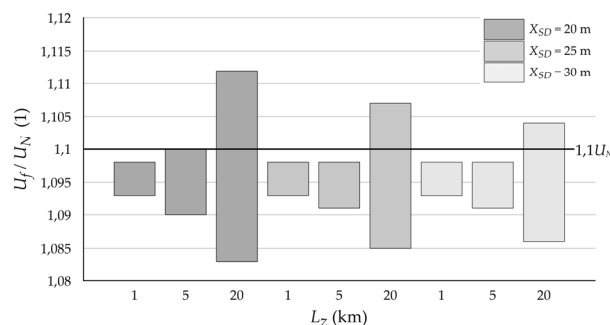


Rys.7. Schemat układu elektroenergetycznego przyjętego do badań oddziaływań linii przesyłowej na linię dystrybucyjną podczas eksploatacji

W stanie pracy normalnej linii dystrybucyjnej podstawą oceny skutków oddziaływania linii przesyłowych są napięcia fazowe U_A , U_B , U_C w zbliżonej linii dystrybucyjnej oraz wskaźnik asymetrii W_A wyrażony wzorem:

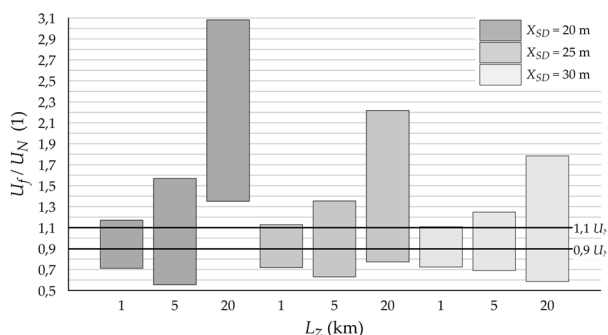
$$(2) \quad W_A = \left| \frac{U_{2(D)}}{U_{1(D)}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{U_A + a^2 U_B + a U_C}{U_A + a U_B + a^2 U_C} \right| \cdot 100\%$$

Przeprowadzone badania wykazały, że oddziaływanie linii 400 kV może być przyczyną wystąpienia w linii 110 kV wzrostu napięcia powyżej dopuszczalnej wartości 1,1 napięcia znamionowego (rysunek 8). Stwierdzono, że dla odległości $X_{SD} = 30$ m długość odcinka zbliżenia L_Z nie powinna przekraczać 10 km, a przy $X_{SD} = 20$ m długość ta powinna być nie większa niż 5 km. Pomimo znacznej deformacji napięć fazowych wartości wskaźnika asymetrii W_A nie przekraczają dopuszczalnej dla linii 110 kV wartości 1%.



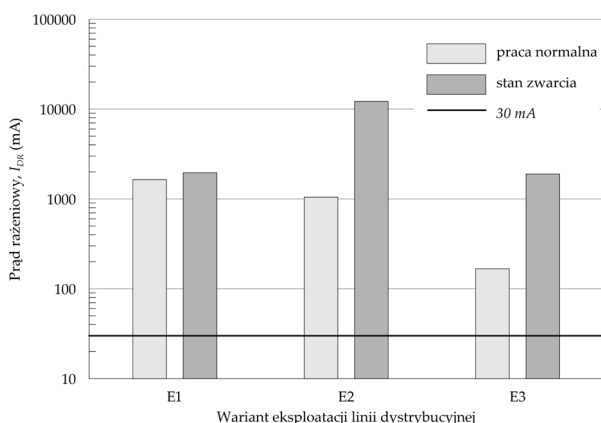
Rys.8. Wartości napięć fazowych w linii dystrybucyjnej 110 kV w zależności od długości odcinka zbliżenia L_Z oraz odległości między osiami linii X_{SD} .

W przypadku linii 15 kV oddziaływanie linii 400 kV jest tak silne, że wartości napięć fazowych praktycznie w każdej sytuacji nie mieszczą się w dopuszczalnym zakresie od 0,9 do 1,1 napięcia znamionowego (rysunek 9). Pomimo tego, wartości wskaźnika W_A zawierają się w dopuszczalnym przedziale od 0-2%. Otrzymane wyniki pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie, że napowietrzne linie 15 kV nie powinny być lokalizowane w pasach technologicznych linii 400 kV.



Rys.9. Wartości napięć fazowych w linii dystrybucyjnej 15 kV w zależności od długości odcinka zbliżenia L_Z oraz odległości między osiami linii X_{SD} .

Ocenę zagrożenia porażeniowego podczas wykonywania prace eksploatacyjnych na liniach dystrybucyjnych linii dystrybucyjnej przeprowadzono dla trzech wariantów: E1 - linia odłączona i nieuziemiona, E2 – linia odłączona i uziemiona jednostronnie, E3 – linia odłączona i uziemiona dwustronnie. Rozważono stan pracy normalnej oraz stan zwarcia w linii 400 kV. Podstawą oceny skutków oddziaływania były wartości prądów rażeniowych I_{DR} przedstawione na rysunku 10.



Rys.10. Największe wartości prądów rażeniowych I_{DR} w wariantach E1, E2, E3 eksploatacji linii dystrybucyjnej

Przeprowadzone badania wykazały, że również podczas eksploatacji linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych należy liczyć się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że możliwa jest lokalizacja linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii 400 kV, ale tylko w przypadku linii o napięciu znamionowym 110 kV. W przypadku linii średnich napięć 15 kV lokalizacja taka nie jest możliwa ze względu na niedopuszczalne pogorszenie parametrów określających jakość napięcia zasilającego.

W zależności od odległości między osiami linii najdłuższe odcinki zbliżeń linii 110 kV w pasach technologicznych linii 400 kV nie powinny przekraczać długości 5÷10 km. Dla dłuższych odcinków zbliżeń należy liczyć się z pogorszeniem parametrów jakościowych.

Stwierdzono, że wykonywane prace budowlane i montażowe odbywać się mogą w warunkach dużego

zagrożenia porażeniowego, szczególnie podczas rozciągania przewodów i montażu osprzętu łańcuchów izolatorowych. Spodziewane wówczas wartości prądów rażeniowych mogą wielokrotnie przekraczać próg wystąpienia fibrylacji komór serca. Z tych powodów wszelkie prace budowlane na liniach dystrybucyjnych zbliżonych do linii przesyłowych powinny być traktowane jako prace pod napięciem i powinny być wykonywane z wykorzystaniem odpowiednich technologii, np. prac pod napięciem. Alternatywą mogłoby być czasowe wyłączenie linii przesyłowej, jednak ze względów na niezawodność systemu przesyłowego uzyskanie na to zgody jego operatora jest praktycznie niemożliwe. Powyższe wnioski dotyczą również eksploatacji linii dystrybucyjnych już wybudowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych.

Autorzy: dr inż. Konrad Kochanowicz, TD Energo sp. z o.o., al. Adolfa Dygasińskiego 29, 30-820 Kraków, E-mail: konrad.kochanowicz@tdenergo.pl; dr hab. inż. Wiesław Nowak prof. AGH, AGH w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl; dr inż. Rafał Tarko, AGH w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: rtarko@agh.edu.pl;

LITERATURA

- [1] PN-EN 50341-1:2013-03: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne
- [2] PN-EN 50341-2-22:2022-06: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 2–22: Krajowe warunki normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN 50341-1:2012)
- [3] Tarko R., Kochanowicz K., Nowak W., Szpyra W., Wszolek T.: Reduction of the Environmental Impact of Electric Field Generated by High Voltage Power Transmission Lines, *Energies* 2021, 14(19), 6388
- [4] Kochanowicz K., Nowak W., Tarko R.: Ograniczanie zasięgu oddziaływania pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez elektroenergetyczne linie przesyłowe. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 98, Nr 10/2022
- [6] Nowacki T., Nadolny Z., Rakowska A.: Analiza pola elektrycznego i magnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości w aspekcie oddziaływania na monterów w czasie wykonywania prac pod napięciem metodą na wysokim potencjale na linii 220 kV. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2004, Nr 1k, s. 168–171
- [7] Horton R., Wallace K.: Induced voltage and current in parallel transmission lines: Causes and concerns. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4), 2339–2346
- [8] Łopatkiewicz R., Nadolny Z., Rakowska A.: Pole elektryczne w strefie przebywania montera wykonującego prace pod napięciem na linii 400 kV. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2010, R. 86, Nr 11b, s. 258–261
- [9] He Y., Wei B., Jiang A., Wang L., Fu Z.: Study on assessment and countermeasures of induced voltage on distribution lines under EHV/UHV transmission lines. 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 1582–1587
- [10] IEEE Power Engineering Society: IEEE Guide to the Installation of Overhead Transmission Line Conductors, IEEE Std 524™–2003
- [11] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz.U. 2023 poz. 819