

## Perspektywy rozwoju elektroenergetycznych układów przesyłowych dużych mocy

**Streszczenie.** W artykule omówiono i porównano wybrane cechy wysokonapięciowych układów przesyłowych, tj. klasycznych linii WN i NN, napowietrznych linii wielonapięciowych, linii HVDC oraz hybrydowych. Problem przesyłu dużych mocy na znaczne odległości występuje w wielu krajach Europy i świata, głównie ze względu na pojawiające się duże koncentracje mocy wytwórczych m.in. w morskich farmach wiatrowych. Problemy te znajdują również odzwierciedlenie w przedstawionym do opiniowania planie rozwoju sieci przesyłowej w Polsce na lata 2023-2032, który zakłada m.in. budowę lądowego połączenia HVDC z północy na południe KSE.

**Abstract.** The article discusses and compares selected features of high-voltage transmission systems, i.e. classic HVAC lines, overhead multi-voltage lines, HVDC and hybrid lines. The problem of large power transmission over long distances occurs in many countries in Europe and the world, mainly due to the emerging large concentrations of production capacities, e.g. in offshore wind farms. These problems are also reflected in the development plan of the transmission network in Poland for 2023-2032, which among others concerns construction of an onshore HVDC connection from the north to the south of the Polish power system. (**Prospects for the development of high-power power transmission systems**)

**Słowa kluczowe:** linie napowietrzne, linie HVDC, linie wielonapięciowe, linie hybrydowe HVAC/HVDC, sieć przesyłowa.

**Keywords:** overhead lines, HVDC lines, multi-voltage lines, HVAC/HVDC hybrid lines, power network.

### Wprowadzenie

Do transportu energii elektrycznej z miejsc wytwarzania do centrów odbiorczych służy sieć przesyłowa. W dzisiejszych systemach przesyłowych są to głównie trójfazowe linie prądu przemiennego HVAC (ang. *High Voltage Alternating Current*). Zmiany w strukturze systemu wytwórczego oraz często koncentracja mocy wytwórczej m.in. w postaci morskich farm wiatrowych, będą skutkowały zmianami przepływu mocy, a w następstwie, wzrostem obciążenia sieci przesyłowej, co może prowadzić do powstawania ograniczeń sieciowych. W celu zapobiegnięcia tym ograniczeniom koniecznym byłoby wybudowanie znacznej ilości nowych połączeń liniowych oraz stacji elektroenergetycznych, co nie jest możliwe do osiągnięcia z uwagi na uwarunkowania ekonomiczne, społeczne i środowiskowe. Z drugiej strony, istnieje niepodważalna potrzeba zapewnienia bezpiecznej pracy systemu elektroenergetycznego w perspektywie wciąż rosnącego zapotrzebowania na moc i energię elektryczną oraz zmian zachodzących w sektorze wytwórczym. Rozbudowa systemu przesyłowego gwarantuje przepływ tej mocy wieloma niezależnymi drogami. Aktualnie podejmuje się szereg działań prowadzących do zwiększenia zdolności przesyłowych istniejącej infrastruktury sieciowej (wymiany przewodów na wysokotemperaturowe, czy stosowanie obciążalności dynamicznej przewodów), lecz metody te, choć efektywne, nie są wystarczające w dalszej perspektywie.

Operatorzy systemów przesyłowych (OSP) poszukują zatem rozwiązania, które zapewni wystarczalność i elastyczność systemów przesyłowych oraz będzie akceptowalne przez opinię publiczną. Jednym z nich jest stosowanie wielotorowych, wielonapięciowych linii prądu przemiennego (WWLN). Alternatywą dla przesyłu prądem przemiennym są linie przesyłowe prądu stałego (HVDC, ang. *High Voltage Direct Current*), które zapewniają możliwość sterowania przepływem mocy i niezależność od rozprzyszczenia w sieci HVAC. Również w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) obserwuje się ten trend. Przekazany do opiniowania plan rozwoju sieci przesyłowej na lata 2023-2032 [1] przewidywał budowę pierwszego w Polsce napowietrzego połączenia prądu stałego HVDC. Kolejnym rozwiązaniem, które skupia coraz większą uwagę są linie hybrydowe HVAC/HVDC.

### Układy przesyłowe dużych mocy

#### Klasyczne linie HVAC

Przez klasyczne linie HVAC rozumie się linie jednotorowe lub dwutorowe o określonym poziomie napięcia znamionowego. Każdy tor prądowy tworzą trzy przewody fazowe stanowiące wspólny układ trójfazowy o częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz. Na sieć przesyłową HVAC składają się linie elektroenergetyczne najwyższych napięć (400 i 220 kV), stacje transformatorowe i rozdzielcze, tworzące zamknięty układ przesyłowy. Z uwagi na fakt, że technologia prądu przemiennego stanowi podstawę obecnych systemów światowych, znane są szerokie i bogate doświadczenia inwestycyjne, prawne, eksploatacyjne oraz techniczne tej technologii. Największymi wyzwaniami tej technologii są niska sterowalność przepływami oraz zarządzanie ograniczeniami sieciowymi. Sterowanie przepływami mocy może być zrealizowane w ograniczonym zakresie przez zmianę punktów pracy poszczególnych generatorów, ponieważ krajowe sieci przesyłowe tworzą większe układy np. sieć europejską, zarządzaną przez stowarzyszenie ENTSO, a dodatkowo działają w warunkach rynku energii elektrycznej. Ograniczoną zmianę przepływu mocy można uzyskać poprzez zastosowanie przesuwników fazowych. Przykładem mogą być przesuwniki fazowe na granicy polsko-niemieckiej w stacji Mikułowa [2], ale też w wielu krajach Europy i świata.

#### Wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne

WWLN są to napowietrzne linie prądu przemiennego, w których na wspólnej konstrukcji wsporczej prowadzi się trzy torowe o różnych napięciach znamionowych. Rozwiązanie takie można spotkać m.in. w Polsce, Holandii, Niemczech, Czechach, Austrii, USA. Podstawową zaletą tego typu rozwiązania jest intensyfikacja terenu zajmowanego przez linie napowietrzne (LN). Przykładowo, prowadzenie trzech klasycznych jednotorowych, jednonapięciowych LN o napięciach 110 kV, 220 kV, 400 kV wymaga wygospodarowania terenu o sumarycznej szerokości 150 m. Poprowadzenie tych torów prądowych na wspólnej konstrukcji wsporczej, przy zachowaniu wolumenu przesyłanej mocy, pozwala zaoszczędzić sumarycznie 80 m szerokości terenu [3]. Ponadto WWLN nie wykazują zwiększonych poziomów natężenia pola

elektromagnetycznego (PEM) w swoim otoczeniu w porównaniu do tradycyjnych linii HVAC [3,4,5].

Praca niesymetrycznych impedancyjnie WWLN wymaga analiz wzajemnego oddziaływania torów z uwagi na pojawiające się niesymetrie napięć i prądów, których przyczyną jest niesymetria geometryczna linii [4,5]. Wyłączenie całej relacji WWLN stanowi znacznie większy ubytek w strukturze sieci w porównaniu z wyłączeniem linii klasycznej, stąd konieczny jest rozwój i dostosowanie obecnych metod prac pod napięciem do tego typu konstrukcji. Ponadto, niebezpieczeństwo wystąpienia zakłóceń międzysystemowych oraz dodatkowe sprzężenia pomiędzy torami prądowymi (z wielokrotnieniem wzajemnych oddziaływań torów prądowych o różnych napięciach znamionowych) wymuszają potrzebę modyfikacji algorytmów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ).

### Napowietrzne linie prądu stałego HVDC

Linie napowietrzne prądu stałego występują m.in. w Argentynie, Brazylii, Chinach, Danii, Indiach, Szwecji. Obecne układy HVDC spotyka się najczęściej w konfiguracji punkt-punkt, łączące dwa wybrane węzły w systemie elektroenergetycznym. Układ taki składa się z dwóch stacji przekształtnikowych i umieszczonego między nimi odcinka linii napowietrznej lub kablowej. Konfiguracje układów HVDC są różnorodne [6,7], jednak najczęściej, najnowsze instalacje układów przesyłowych spotyka się jako bipolarne systemy o napięciu znamionowym do 500 kV. W układzie bipolarnym wykorzystuje się co najmniej dwa przekształtniki na każdym terminalu sieciowym oraz stosuje się co najmniej dwa przewody o biegunowościach dodatniej i ujemnej, które traktuje się jako niezależne obwody. Dodatkowo w takim układzie najczęściej występuje również metalowy przewód powrotny w postaci niskonapięciowego izolowanego przewodnika neutralnego. W Europie uważa się za bardzo mało prawdopodobne, aby linie HVDC zostały zbudowane bez przewodu powrotnego (co wymaga rozległego i kosztownego uziemienia), ponieważ prądy doziemne nie są pożądane [8]. Atutem zastosowania przewodu powrotnego jest możliwość jego wykorzystania jako zapasowego ciągu w przypadku awarii jednego z biegunów. Wyposażenie systemu przesyłowego HVDC jest złożone i prawie każdy projekt jest realizowany jako dedykowany. Rodzaje technologii, warianty przesyłu, jak i specyfikacje i typy sprzętu są zróżnicowane, a zarządzanie technologią i sprzętem stanowią wyzwanie, również z uwagi na brak doświadczeń krajowych [9]. Nie należy zapomnieć o konieczności stosowania filtrów z uwagi na generowane przez przekształtniki wyższe harmoniczne. Technologia ta uznawana jest za kosztowną w porównaniu z systemami HVAC i staje się opłacalna, gdy planuje się przesył energii elektrycznej na znaczne odległości np. z odległych zasobów, takich jak elektrownie wodne, duże farmy wiatrowe, elektrownie jądrowe [10]. Szacuje się, że inwestycja staje się opłacalna jeżeli rozważa się długość ciągu co najmniej 500 km [11]. Nie ma za to ograniczeń odległości przesyłu ze względu na brak zjawisk falowych i strat mocy biernej [12]. Technologia nie wymaga również pracy synchronicznej i nie występują problemy związane ze stabilnością napięciową.

Zjawiska związane z pracą systemów HVDC skutkują m.in. dryfem jonów w całym obszarze międzyelektrodowym, który może prowadzić do wzmocnienia pola elektrycznego na poziomie gruntu [8], co może prowadzić do zwiększonych obaw społeczeństwa. Z drugiej strony poziom napięcia LN HVDC rzutuje na jej zdolności przesyłowe, co jest główną motywacją do konwersji. Należy mieć na uwadze, że wybór napięcia LN HVDC jest zawsze

kompromisem pomiędzy zdolnością przesyłową a efektami środowiskowymi, a wraz z tym akceptacją społeczną. Jeśli napięcie zostanie wybrane zbyt konserwatywnie, wzrost wydajności będzie niewielki. Przykładowo, zakładając konwersję dwutorowej linii 400 kV prądu przemiennego w linię napowietrzna prądu stałego w układzie bipolarnym z metalowymi przewodami powrotnymi, bez jakichkolwiek zmian konstrukcyjnych, w tym liczby wiązek tworzących przewody robocze, wzrost zdolności przesyłowej wyniesie:

$$(1) \quad \frac{P_{HVDC}}{P_{HVAC}} = \frac{2I_{HVDC}U_{HVDC}}{3I_{HVAC}\frac{U_{HVAC}}{\sqrt{3}}} \approx 1,15 \frac{U_{HVDC}}{U_{HVAC}}$$

zatem będzie nierentowny, jeżeli napięcie HVDC nie będzie wybrane wyższe niż napięcie międzyfazowe HVAC. Jednak efektywny wzrost zdolności przesyłowych może być znacznie wyższy, ponieważ linia prądu stałego punkt-punkt może być w pełni obciążona, podczas gdy typowe linie prądu przemiennego rzadko są obciążone powyżej 50% ze względu na kryterium N-1. W celu zagwarantowania minimalnego wzrostu zdolności przesyłowych powyżej 20%, przewidywane napięcie układów prądu stałego jest wybierane jako 420 kV [8].

### Linie hybrydowe HVAC/HVDC

OSP wykazują coraz większe zainteresowanie liniami hybrydowymi HVAC/HVDC. W liniach tych na wspólnej konstrukcji wsporczej prowadzone są niezależne tory prądu przemiennego oraz stałego. Często tego typu rozwiązanie powstaje przy wykorzystaniu istniejącej linii dwutorowej, w której jeden z torów zostaje przekształcony dla przesyłu HVDC. Drugim możliwym rozwiązaniem w tej technologii jest przesył energii elektrycznej zarówno prądem przemiennym jak i stałym, który odbywa się jednym, wspólnym, torem prądowym [13,14]. W układzie tym, na początku linii, do składowej przemiennej dodawana jest składowa stała napięcia, która zostaje następnie usunięta na jej końcu. Przewodem powrotnym dla prądu stałego jest ziemia. Współczesne technologie linii hybrydowych opierają się na pierwszym opisanym wariantcie (Szwajcaria, Chiny, Niemcy), zatem dalsza analiza będzie skupiać się na tym rozwiązaniu.

Hybrydowe LN wykorzystują te same komponenty, co linie HVAC lub HVDC i chociaż nie ma specjalnych wymagań dotyczących przewodów i słupów to izolatory powinny być zaprojektowane do hybrydowego napięcia HVAC/HVDC. Maksymalne napięcie robocze musi być odpowiednio dobrane, aby utrzymać wymagane wewnętrzne i zewnętrzne odstępstwa elektryczne i uniknąć przekroczenia poziomów hałasu i jonizacji powietrza związanych z efektem koronowym [15].

W hybrydowych systemach HVAC/HVDC występują interakcje między liniami HVAC i HVDC, co skutkuje dodatkowymi zjawiskami i efektami. Przykładowo, w hybrydowym przesyśle HVAC/HVDC efekty koronowe obu typów przesyłu występują równolegle. Na przykład dodatni biegun prądu stałego może przyczyniać się do powstawania hałasu przy dobrej pogodzie, podczas gdy fazy prądu przemiennego zwiększają hałas przy złej pogodzie. Dodatkowo należy rozważać stany przejściowe oddziałujące na sieć HVAC od sieci HVDC i odwrotnie. Prądy płynące w LN HVAC wytwarzają zmienne w czasie pole magnetyczne w pobliżu przewodów LN HVDC, co skutkuje większym napięciem przemiennym indukowanym na przewodach LN HVDC. Na skutek zwarcia w LN HVDC, w równoległym torze HVAC pojawia się składowa aperiodyczna prądu, która może powodować nasycenie transformatorów oraz przekładników. Ponadto, wzajemne

oddziaływanie torów w LN HVAC/HVDC może powodować dodatkowe straty, wysoki poziom harmonicznych oraz nieprawidłowe działanie zabezpieczeń w sieci HVAC [16,17]. Z uwagi na występujące sprzężenie od toru HVDC, nie można wprost stosować typowych algorytmów EAZ do ochrony toru HVAC [18]. Wzajemny wpływ między obwodami AC i DC wymaga specyficznej konfiguracji systemów zabezpieczeń [19,20,21,22].

Koncepcja hybrydowych linii HVAC/HVDC łączy zalety linii prądu przemiennego i stałego w istniejącej, wspólnej infrastrukturze wieżowej, podczas gdy efekt wizualny po konwersji jest znikomy (tab. 1). Fizyczne właściwości sieci HVAC nie pozwalają na szerszą skalę sterować przepływem energii tak, aby przekierowywać go z linii mocno obciążonych na linie słabiej obciążone. Zauważono, że w wyniku wprowadzenia do systemu linii hybrydowych, linie prądu przemiennego były poddawane mniejszym obciążeniom. Tor HVDC zapewnia lepszą kontrolę przepływu mocy, np. w odniesieniu do przepływów tranzytowych, jak również zapewnia poprawę warunków napięciowych za pomocą przekształtników po obu stronach ciągu. Skutkuje także redukcją całkowitych kosztów eksploatacji systemu, mimo że straty przesyłu wzrastają z powodu strat przekształtnika, maleją w sieci HVAC [23].

### Porównanie układów przesyłowych dużych mocy

W tabeli 1 zestawiono porównanie wybranych cech analizowanych układów przesyłowych dużych mocy, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki stosowanych w nich linii napowietrznych.

Nakład inwestycyjny wiązany z budową LN HVDC w układzie bipolarnym o napięciu  $\pm 500$  kV o takiej samej zdolności przesyłowej co klasyczna linia dwutorowa o napięciu znamionowym 500 kV jest około połowę mniejszy niż dla linii tradycyjnej. Rozważając linię

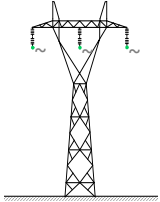
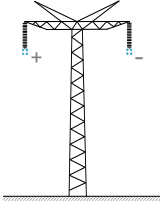
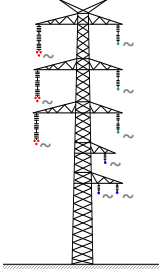
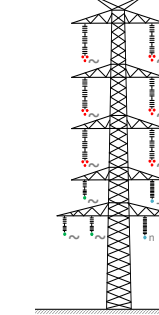
hybrydową, w której skład wchodzi jeden tor prądu przemiennego 500 kV oraz układ bipolarny  $\pm 500$  kV, zdolność przesyłowa takiej linii jest 1,5 razy większa niż klasycznej linii dwutorowej 500 kV, a nakład inwestycyjny stanowi 1,2 wartości nakładu inwestycyjnego potrzebnego do budowy linii klasycznej [6,24].

Przejęcie obciążenia przez LN HVDC będzie również okupione pojawieniem się strat przesyłowych, ale dzięki temu zostaje odciążona sieć HVAC, co w szerszej perspektywie spowoduje redukcję sumarycznych strat mocy w sieci, a także staje się narzędziem do optymalizacji strat w systemie oraz likwidacji ograniczeń przesyłowych w sieci HVAC.

Dodatkowo urządzenia przekształtnikowe umieszczone na końcach linii HVDC mają zdolność płynnej regulacji mocy biernej w sieci HVAC, co wpływa na poprawę warunków napięciowych zarówno łącza HVDC jak i obszarów sieci HVAC wokół tych stacji.

Chociaż istnieją różne ograniczenia prawne dotyczące słyszalnego hałasu oraz pól magnetycznych i elektrycznych prądu przemiennego, większość krajów nie wprowadziła jeszcze ograniczeń dla pól elektrycznych prądu stałego, czy też generowanych prądów jonowych. Nie oczekuje się, że oba te efekty spowodują jakiegokolwiek problemy zdrowotne na realistycznym poziomie, jednak ich obecność może być postrzegana jako uciążliwa i nasilić obawy społeczne przed budową LN. Na przykład silne pola elektryczne od linii hybrydowych, na poziomie gruntu, mogą powodować uczucie „elektryzowania włosów”, a tym samym irytację opinii publicznej. Głównymi czynnikami sprzeciwu publicznego są problemy zdrowotne, zakłócenia krajobrazu i słyszalny hałas, dlatego każdy projekt LN powinien być wykonany bardzo ostrożnie pod kątem oddziaływania PEM oraz hałasu i ich percepcji.

Tabela 1. Porównanie wybranych cech LN pracujących w różnych układach przesyłowych dużych mocy [25+32]

Wizualizacja					
Cecha		LN HVAC	LN HVDC	WWLN HVAC	LN Hybrydowa HVAC/HVDC
techniczne i prawne	MM	odniesienie	↗	↗	↑
	RPM	odniesienie	↑	≈	↑
	ST	odniesienie	↘	≈	↓
	PiN	odniesienie	nie zdefiniowano	jak dla LN HVAC	nie zdefiniowano
środowiskowe i społeczne	PE	odniesienie	↑	≈	↗
	PM	odniesienie	≈	≈	↗
	H	odniesienie	↑	↗	↑
	K	odniesienie	↘	↘	↘
	OP	odniesienie	↑	↑	↑
Największe wyzwania		<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ coraz bardziej utrudniona rozbudowa z uwagi na sprzeciw społeczny</li> <li>❖ ograniczone metody sterowania przepływem mocy, w tym występowanie ograniczeń sieciowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ brak przepisów regulujących dopuszczalne poziomy natężenia PEM oraz innych parametrów środowiskowych i technicznych</li> <li>❖ dostępność aparatury stałoprądowej, w tym jej koszt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ złożoność modeli matematycznych</li> <li>❖ komplikacja algorytmów EAZ i metod prowadzenia prac pod napięciem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ zwiększona trudność prowadzenia prac analityczno-rozwojowych z uwagi na wielość wzajemnych sprzężeń, w tym m.in. komplikacja modeli matematycznych i algorytmów EAZ</li> <li>❖ relatywnie nowa i innowacyjna technologia może budzić zwiększone obawy opinii publicznej</li> </ul>

MM – złożoność modelu matematycznego; RPM – regulacja przepływów mocy; ST – straty mocy; PiN – przepisy i normy krajowe PE/PM – natężenie pola elektrycznego/magnetycznego; H – hałas; K – wpływ na krajobraz; OP – obawy opinii publicznej

## Podsumowanie

Obserwuje się wzrost zainteresowania OSP możliwością konwersji istniejących systemów przesyłowych prądu przemiennego na systemy prądu stałego. Ze względu na wysoką elastyczność sterowania, technologia prądu stałego jest zdecydowanie preferowana do przesyłu energii elektrycznej na duże odległości. Systemy HVAC zapewniają prostą transformację poziomów napięcia dostosowanych do potrzeb odbiorców. Koncepcja hybrydowych LN HVAC/HVDC łączy w sobie zalety LN HVAC i HVDC, lecz mnożą się także wyzwania związane z ich rozwojem. Wybór preferowanej technologii przesyłu musi uwzględniać szereg czynników, przy czym najważniejsze zdają się być kwestie środowiskowo-społeczne, z których decydującymi są: wpływ na problemy zdrowotne wynikające z oddziaływania PEM, zakłócenia krajobrazu oraz słyszalny hałas. W przypadku linii hybrydowych, skutki te mogą być odbierane jako uciążliwe i powodować irytację opinii publicznej i negatywnie wpłynąć na akceptację tego typu rozwiązania. Systemy przesyłowe oparte na LN HVDC wykazują wiele przydatnych cech z punktu widzenia operatora systemu przesyłowego. Koniecznym jest aktualizacja i doszczegółowienie przepisów w ujęciu zachowania dopuszczalnych poziomów natężenia PEM oraz hałasu, a także przeprowadzenie spotkań informacyjnych dla społeczeństwa.

Na świecie zauważa się jeszcze jeden trend. Coraz częściej rozważa się i wdraża rozwiązania kablowe dla każdego z omówionych typów technologii przesyłu dużych mocy. Jest to podyktowane najczęściej aspektami społecznymi, gdzie rozbudowa infrastruktury napowietrznej jest ograniczana z uwagi na jej duże zagęszczenie w danym obszarze lub gdy przebieg danego połączenia wkracza na tereny objęte szczególną ochroną (np. parki narodowe). Takie rozwiązanie pozornie pozwala na ograniczenie oddziaływania sieci na krajobraz, jednak nadal intensywnie w niego ingeruje pozostawiając trwały ślad w postaci wycinki roślinności czy konieczności stosowania studzienek wentylacyjnych dla tuneli kablowych. Nie występuje oddziaływanie pochodzące od pola elektrycznego, natomiast natężenie pola magnetycznego na poziomie gruntu dla tego typu rozwiązań jest wyższe niż dla linii napowietrznych. Jest to rozwiązanie charakteryzujące się niższą awaryjnością niż rozwiązanie napowietrzne, jednak czas znalezienia i usunięcia ewentualnej awarii jest zdecydowanie dłuższy i liczony w dniach, a nawet tygodniach. Rozwiązanie takie jest kosztowne i nie znajduje zastosowania dla niestabilnych terenów (np. pogórnicych).

**Autorzy:** dr inż. Agnieszka Dziendziel, E-mail: Agnieszka.Dziendziel@polsl.pl, dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. PŚ, E-mail: Henryk.Kocot@polsl.pl, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.

## LITERATURA

- [1] Projekt planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2023-2032. PSE S.A., 06.2022.
- [2] Kocot H., Korab R., Przygodzki M., Żmuda K.: Dobór głównych parametrów przesuwników fazowych dla zachodnich połączeń transgranicznych KSE. Przegląd Elektrotechniczny 04/2014.
- [3] Dziendziel A., Kocot H.: Korzyści i wyzwania związane z rozwojem wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych WN i NN. Przegląd Elektrotechniczny 03/2022.
- [4] Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines. Energies 2021, 14, 421.
- [5] Dziendziel A.: Wielotorowe, wielonapięciowe elektroenergetyczne linie napowietrzne wysokich i najwyższych napięć. Rozprawa doktorska 2022.
- [6] Bahrman M.P., Johnson B.K.: The ABCs of HVDC Transmission Technologies. An Overview of High Voltage Direct Current Systems and Applications. IEEE Power & Energy Magazine, 3, 32-44.
- [7] Okba M.H., Saied M.H., Mostafa M.Z., Abdel-Moneim T.M.: High Voltage Direct Current Transmission A Review, Part I. IEEE Energytech 2012.
- [8] Hedtker S., Pfeiffer M., Franck C.M., Dermont C., Stadelmann I., Jullier J.: HVDC & hybrid HVAC/HVDC overhead line conversion: An acceptance case study. CIGRE 2018, B2-302.
- [9] Liu K., Wang Z., Yang G.: Overview of Operation Challenges in HVDC Projects. IEEE ICDSBA 2020.
- [10] Rudervall R., Charpentier J.P., Sharma R.: High Voltage Direct Current Transmission Systems Technology Review Paper. Energy Week 2000.
- [11] Meah K., Ula S.: Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems. IEEE General Meeting Power & Energy Society 2007.
- [12] May T.M., Yeap Y.M., Ukil A.: Comparative Evaluation of Power Loss in HVAC and HVDC Transmission Systems. IEEE TENCON 2016.
- [13] Antosiewicz B., Biczek P.: Symulacja pracy hybrydowej linii elektroenergetycznej. VIII Konferencja Naukowo-techniczna i-MITEL 2014.
- [14] Popczyk J., Elektroenergetyczne układy przesyłowe. Skrypty uczelniane, nr 1196, Politechnika Śląska, 1984
- [15] European association for the cooperation of transmission system operators (TSOs) for electricity: www.entsoe.eu
- [16] Bodal S., Bremnes J.J., Vogt S., Koreman C.G.A., Matias E., Andersson H.S.: Interaction between parallel HVDC and a.c. overhead lines. CIGRE 2016, B4-128.
- [17] Novitskiy A., Westermann D.: DC Components in the AC Networks Containing AC/DC Hybrid Transmission Lines. IEEE EEEIC 2016.
- [18] Zhao W., Shi S., Wang Z., Dong X.: AC transmission line fault current analysis in 220kV AC/DC hybrid system. DRPT Conference 2015.
- [19] Prommetta J., Schindler J., Jaeger J., Keil T., Butterer C., Ebner G.: Protection Coordination of AC/DC Intersystem Faults in Hybrid Transmission Grids. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 6, 2020.
- [20] Nazarcik T., Muzik V.: Modelling of the Mutual Influence of the Parallel AC/DC Circuits on the Hybrid Power Transmission Line. IEEE EIconRusNW 2018.
- [21] Murillo J.A., Rios M.A.: Analysis of DC Faults into Hybrid HVAC/HVDC Systems. IEEE COMPEL 2021.
- [22] Sun Q., Shi Q., Siew W.H., Liu H., Li Q.: The induced overvoltage between DRV AC and DC transmission lines built on the same tower under fault conditions. IUPEC 2009.
- [23] Stanojev O., Garrison J., Hedtker S., Franck C.M., Demiray T.: Analysis of a Hybrid HVAC/HVDC Transmission Line: a Swiss Case Study. IEEE Power Tech Conference 2019.
- [24] Rahman S., Khan I., Alkhamash H.I., Nadeem M.F.: A Comparison Review on Transmission Mode for Onshore Integration of Offshore Wind Farms: HVDC or HVAC. Electronics 2021, 10, 1489.
- [25] 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)
- [26] www.emf-portal.org
- [27] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): www.icnirp.org
- [28] Raport CESI: Audyt alternatyw dla tworzenia linii bardzo wysokiego napięcia między Cotentin i Maine (w języku francuskim), 2005.
- [29] Lundkvist J., Gutman I., Weimers L.: Feasibility study for converting 380 kV AC lines to hybrid AC / DC lines. EPRI HVDC & Flexible AC Transmission Systems Conference 2009.
- [30] Hedtker S., Pfeiffer M., Franck C.M., Zaffanella L., Chan J., Bell J.: Audible noise of hybrid AC/DC overhead lines: Comparison of different prediction methods and conductor arrangements. EPRI HVDC & Flexible AC Transmission System Conference 2015.
- [31] World Health Organization (WHO): www.who.int
- [32] Kocot H., Dziendziel A.: Perspektywy rozwoju elektroenergetycznych układów przesyłowych dużych mocy, Gdańskie Dni Elektryki, Gdańsk 2022.