

Wykorzystanie nowoczesnych konstrukcji wsporczych linii napowietrznych w celu ograniczenia pola elektromagnetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia związane ze stanem infrastruktury sieci rozdzielczej 110 kV w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Wskazano na możliwość zastosowania nowoczesnych konstrukcji wsporczych, w tym rurowych słupów kompaktowych oraz innych konstrukcji ze zmniejszoną odległością między fazami. Przeprowadzono obliczenia rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu kilku wybranych tego rodzaju konstrukcji wsporczych oraz porównano je z rozkładami pola w otoczeniu słupów kratowych. Określono obszary oddziaływania składowej elektrycznej i magnetycznej pola dla różnych konstrukcji wsporczych linii.

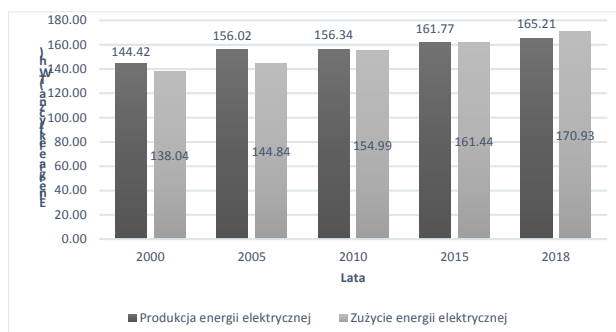
Abstract. The article presents issues related to the condition of the 110 kV distribution network infrastructure in the National Power System. The possibility of using modern supports, including compact lines and other monopole supports with a reduced distance between the phases, is indicated. Calculations of the electric and magnetic field distributions in the vicinity of several selected supports of this type were carried out and compared with the field distributions in the vicinity of a traditional electricity pylon. The areas of interaction of the electric and magnetic components of the field were determined for different supports of overhead lines. (The use of modern supports of overhead lines to limit the electromagnetic field)

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, linie napowietrzne, konstrukcje wsporcze, oddziaływanie pola

Keywords: electromagnetic fields, overhead power lines, supports, exposure.

Wstęp

Istniejąca infrastruktura przesyłowa Operatora Systemu Przesyłowego (OSP) - Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE S.A.) oraz Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD) jest niewystarczająca, by sprostać potrzebom rozwijającej się gospodarki i rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Na przełomie ostatnich 20 lat zużycie energii w Polsce wzrosło o ponad 23%, a jej produkcja o niewiele ponad 14% (rys.1). Wzrost zużycia energii sięga ok. 2% rocznie, a w przypadku największych aglomeracji nawet 6%. W 2018 r. po raz pierwszy zapotrzebowanie na energię elektryczną przekroczyło poziom 170 TWh [1].

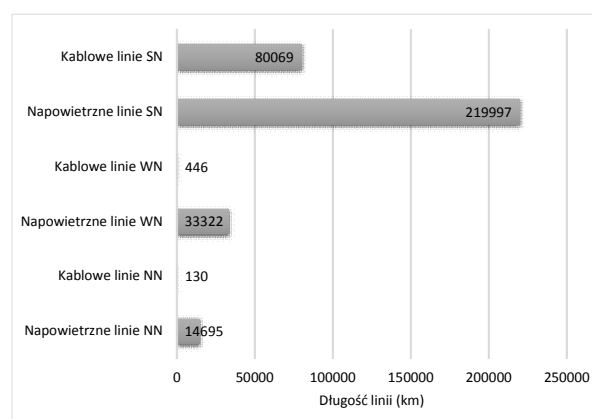


Rys.1. Produkcja i zużycie energii elektrycznej w Polsce od roku 2000

Sieć przesyłowa PSE S.A. według stanu na 1 stycznia 2019 r. ma niewiele ponad 14,5 tys. km długości. Większość linii przesyłowych wybudowano w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. W Polsce obecnie eksploatowanych jest 7755 km linii o napięciu 220 kV i 6826 km linii o napięciu 400 kV. Część linii przesyłowych na napięcie 400 kV może być jeszcze eksploatowanych przez kilkanaście lat, jednak w przypadku linii 220 kV czas ten jest wyjątkowo krótki. Wymagają one pilnej modernizacji i przebudowy na napięcie 400 kV. W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) do przesyłu energii elektrycznej wykorzystuje się głównie linie napowietrzne. Linie kablowe stanowią ok. 1% długości wszystkich linii napowietrznych WN i ok. 3,6% długości wszystkich linii napowietrznych SN. Zestawienie długości

poszczególnych linii w zależności od napięcia przedstawiono na rysunku 2.

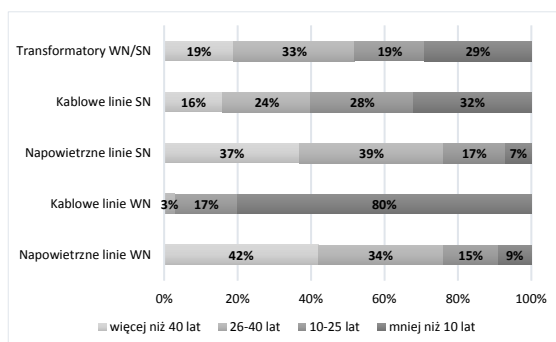
W przypadku istniejącej w Polsce sieci dystrybucji energii elektrycznej, największy stopień zużycia wykazują napowietrzne linie 110 kV i linie średniego napięcia (rys.3). Około 76% tych linii wybudowano ponad 25 lat temu, z czego 42% wszystkich linii 110 kV i 37% linii SN zbudowano ponad 40 lat temu. Od tamtego czasu, ze względu na bariery prawne oraz brak odpowiednich środków, w większości przypadków nie były one wymieniane lub modernizowane, a przechodziły jedynie wymagane przeglądy i remonty. Podobna sytuacja dotyczy stacji transformatorowych WN/SN (ponad 52% ma ponad 25 lat) wyposażonych w aparaturę napowietrzną narażoną na bezpośrednie działanie czynników powodujących częstsze awarie oraz szybsze zużycie.



Rys.2. Długości linii elektroenergetycznych w Polsce w przeliczeniu na jeden tor na koniec 2018 r.

W latach 2019-2027 PSE S.A. ma zamiar zrealizować jeden z najbardziej ambitnych w Europie programów inwestycyjnych w elektroenergetyczną infrastrukturę przesyłową. Zamierza wydać na ten cel 11 mld zł, z czego około 90 proc. przeznaczone zostanie na rozbudowę i modernizację sieci. W efekcie realizacji planu w ciągu najbliższych czterech lat powstanie ponad 2700 km nowych sieci najwyższych napięć, a ponad 1700 km już istniejących linii zostanie zmodernizowanych. Zbudowanych

ma zostać również siedem nowych stacji elektroenergetycznych, a kolejnych 48 ulegnie rozbudowie lub zmodernizowaniu [1].



Rys.3. Struktura wiekowa wybranych elementów sieci Operatorów Systemów Dystrybucyjnych

Poprawa bezpieczeństwa energetycznego, zapewnienie ciągłości i jakości dostaw energii elektrycznej oraz przylączenie do sieci nowych podmiotów to główne cele realizowane przez krajowych Operatorów Systemów Dystrybucyjnych. Spółka Enea Operator w roku 2018 wydała na ten cel prawie 1 mld zł, a w latach 2020-2023 planuje wydawać średnio ok. 1,4 mld zł rocznie. W latach 2014-2018 Enea Operator zainwestowała prawie 4,7 mld zł w bezpieczeństwo energetyczne północno-zachodniej części Polski. PGE Dystrybucja wydała w tym samym okresie na rozwój infrastruktury energetycznej we wschodniej i centralnej Polsce prawie 8,5 mld złotych. Spółka Tauron Dystrybucja na podobne inwestycje w południowej i południowo-zachodniej części Polski wydała w roku 2018 ponad 2 mld zł [1].

W ramach prowadzonych inwestycji wszyscy Operatorzy Systemów Dystrybucyjnych realizują zadania związane z budową, rozbudową lub modernizacją Głównych Punktów Zasilania (GPZ), linii 110 kV oraz sieci SN i nn.

Szczególne znaczenie przy projektowaniu nowych linii napowietrznych ma ich przebieg, który wpływa na lokalny krajobraz oraz parametry techniczne (rodzaj słupów, przewodów oraz izolatorów), które mają wpływ na wartości wytwarzanego pola elektromagnetycznego oraz hałasu. Budowa linii wysokiego napięcia wiąże się praktycznie zawsze z licznymi protestami ludności zamieszkującej tereny, przez które przechodzić ma trasa linii. Podstawową przyczyną tych protestów jest obawa przed oddziaływaniem pola elektrycznego, magnetycznego i hałasu wytwarzanego przez przewody fazowe linii oraz spadkiem wartości gruntów i utratą walorów krajobrazowych terenu, przez który przebiega linia napowietrzna. W przypadku budowy lub modernizacji linii o napięciu 110 kV, których trasy niejednokrotnie zlokalizowane są w bardzo bliskich odległościach od budynków mieszkalnych w centrach miast, trudno uzyskać akceptację społeczną co to tego typu inwestycji. Ich realizacja wymaga więc projektowania nowych linii napowietrznych według obowiązujących standardów [7, 8], a następnie budowania ich z zastosowaniem najnowszych technologii.

W niniejszym artykule przedstawiono kilka niestandardowych konstrukcji wsporczych, które już są lub mogą w przyszłości zostać wykorzystane w budowie nowych napowietrznych linii elektroenergetycznych o napięciu 110 kV. Oceniono również poziomy pola elektrycznego i magnetycznego wytwarzanego przez takie linie oraz porównano je z wartościami pól wytwarzanych w

otoczeniu linii napowietrznych budowanych z użyciem tradycyjnych, kratowych słupów. Zastosowanie tych innowacyjnych rozwiązań może zdaniem autora doprowadzić do zwiększenia akceptacji społecznej podczas budowy linii napowietrznych.

Sąsiedztwo linii napowietrznych - źródło konfliktów.

Pojawiające się od wielu lat doniesienia o możliwym niekorzystnym wpływie na zdrowie ludzi pól elektromagnetycznych są przyczyną wielu niepokojów i interwencji mieszkańców, których budynki zlokalizowane są w pobliżu linii napowietrznych. Problem ten występuje szczególnie na obszarach silnie zurbanizowanych w aglomeracjach miejskich. To właśnie na tych terenach obserwuje się znaczny wzrost zużycia energii elektrycznej. Konieczność zaspokojenia zapotrzebowania na energię elektryczną dużych ośrodków miejskich oraz odbiorców przemysłowych stanowi poważne wyzwanie dla Operatorów Systemów Dystrybucyjnych, których zadaniem jest między innymi projektowanie i budowa nowych linii o napięciu 110 kV stanowiących trzon rozdzielczej sieci zasilającej na terenach dużych miast. W związku z tym, że nie dopracowano się w Spółkach Dystrybucyjnych standardów w zakresie określenia szerokości „pasa technologicznego” dla linii o napięciu 110 kV, ich proces projektowania w obszarach zurbanizowanych, w szczególności na terenach zabudowy mieszkaniowej, narażony jest na poważne konflikty, związane z ustanowieniem służebności przesyłu oraz obawą ludzi o swoje zdrowie.

Problemy z lokalizacją linii napowietrznych 110 kV ujawniają się w sytuacjach, gdy projektuje się je, ze względu na brak miejsca, na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową. Z punktu widzenia wzajemnego sąsiedztwa linii napowietrznej i budynku mieszkalnego kluczowe staje się ustalenie, czy na terenie lokalizacji zabudowy mieszkaniowej, natężenie pola elektrycznego, którego źródłem są przewody linii napowietrznej (wyznaczone na wysokości 2 m npt), nie przekracza wartości 1 kV/m, a natężenie pola magnetycznego nie jest większe od 60 A/m [2]. W przypadku linii istniejących w celu sprawdzenia dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, należy zgodnie z rozporządzeniem [3] wykonać pomiary składowej elektrycznej i magnetycznej pola o częstotliwości 50 Hz. Dla linii projektowanych nie ma praktycznej możliwości wykonania takich pomiarów. Analizę rozkładu poszczególnych składowych pola elektromagnetycznego należy więc przeprowadzić metodami obliczeniowymi, pamiętając, że wspomniane wyżej wartości dopuszczalne sprecyzowane w rozporządzeniu [2], to poziomy, które nie mogą być przekroczone przy uwzględnieniu maksymalnych parametrów pracy linii.

Na etapie projektowania niezwykle trudno jest ocenić, czy i w jakim stopniu linia napowietrzna spowoduje obniżenie walorów krajobrazu, tym bardziej, że indywidualne odczucia poszczególnych osób są w tym względzie subiektywne i często znacznie różnią się od siebie. Linie napowietrzne na stałe wpisały się w nasze otoczenie i stały się powszechnym elementem środowiska kulturowego, tak w Polsce, jak i we wszystkich krajach świata. Pomimo tej powszechności słupy linii napowietrznych uznawane są za jedno z elementów przestrzennych w największym stopniu obniżających walory krajobrazowe. Są też zazwyczaj najgorzej ocenianym antropogenicznym elementem krajobrazu kulturowego. Te stalowe konstrukcje kratowe, w przypadku linii 110 kV o wysokościach od ok. 16 m do ok. 40 m, widoczne z dużych odległości, wpływają na krajobraz dość negatywnie.

W Polsce obecnie eksploatowanych jest ponad 33 tys. km linii o napięciu 110 kV. Prawie połowa z nich to konstrukcje, których wiek przekracza 40 lat. Na przestrzeni minionych dziesięcioleci XX wieku w projektowaniu linii i ich konstrukcji wsporczych obowiązywały różne normy i przepisy. Poszczególne serie stalowych, kratowych słupów były projektowane w oparciu o aktualne wówczas normy [4,5,6], których okres obowiązywania już minął. Wiele z tych słupów nie spełnia aktualnych wymagań w tym zakresie [7,8], choć mogą być eksploatowane, o ile ich stan techniczny na to pozwala. Większość tych konstrukcji wymaga jednak pilnej modernizacji, bądź budowy zupełnie nowych linii. Proces ten powinien zostać przeprowadzony z użyciem najnowszej technologii, pozwalającej na zmniejszenie kosztów materiałowych budowy linii, ograniczeniu ich wpływu na środowisko oraz zwiększeniu jakości dostaw energii elektrycznej.

Nowoczesne konstrukcje wsporcze stosowane w budowie linii napowietrznych 110 kV

Jedną z największych przeszkód w dostarczaniu energii elektrycznej o odpowiednich parametrach do miast i ośrodków przemysłowych jest stara i nieefektywna infrastruktura sieci rozdzielczej. Konstrukcje wsporcze (głównie stalowe słupy kratowe) opierają się na projektach z pierwszej połowy XX wieku. Budowane na nich linie napowietrzne nie są w stanie sprostać obecnemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną.

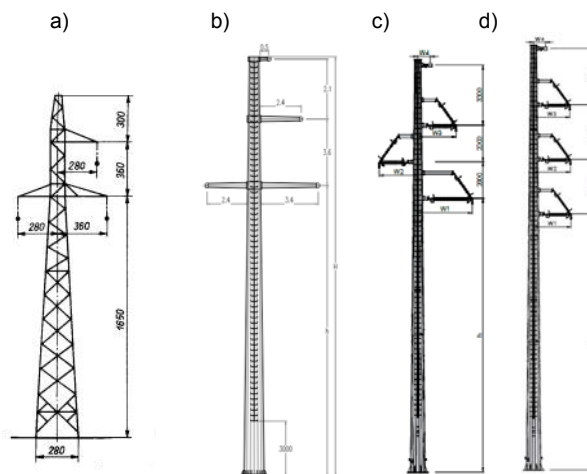
W ciągu ostatnich kilkunastu lat powstało wiele projektów innowacyjnych konstrukcji wsporczych stosowanych w budowie linii napowietrznych. Zagadnienia te stały się tematem spotkania przedstawicieli 17 państw w ramach działania Komitetu Studiów CIGRE. Prace Grupy Roboczej B2-08 zostały zakończone wydaniem w lutym 2010 r. Broszury Technicznej CIGRE TB nr 416 [9] oraz opublikowaniem kilka miesięcy później 64-stronicowego aneksu [10]. W publikacji [9] przedstawione zostały konstrukcje wsporcze bazujące głównie na słupach rurowych (monopalach), które miały za zadanie być bardziej atrakcyjnymi wizualnie i lepiej wkomponować się w otaczający je krajobraz.

Na całym świecie zostało zbudowanych tysiące kilometrów linii z wykorzystaniem takich właśnie słupów. W Polsce też od kilkunastu lat buduje się linie napowietrzne o napięciu 110 kV z wykorzystaniem słupów rurowych [11].

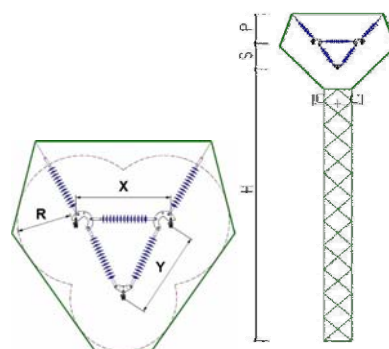
W krajach europejskich często stosowanym rozwiązaniem są linie kompaktowe, czyli takie, w których w maksymalny sposób zmniejszono gabaryty zachowując wszelkie wymagane parametry mechaniczne i elektryczne. Stało się to możliwe dzięki wyeliminowaniu tradycyjnych poprzeczników słupa i zastąpieniu ich poprzecznikami izolacyjnymi. Jako elementy izolacyjne poprzeczników stosuje się najczęściej izolatory kompozytowe, wykonane z żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknem szklanym [12,13,14]. Pierwsze rozwiązania poprzeczników z wykorzystaniem izolatorów kompozytowych zostały opracowane przez firmę Pfisterer [13]. W Polsce pierwszą linią kompaktową na napięciu 110 kV była linia o długości 2,5 km wybudowana w Krakowie w roku 2005 [12].

Na rysunku 4 przedstawiono sylwetki czterech słupów przelotowych linii 110 kV w wykonaniu kratowym, rurowym oraz kompaktowym. Stosowanie słupów serii SRFV1 umożliwia znaczne zmniejszenie powierzchni zajmowanej przez takie konstrukcje wsporcze oraz ograniczenie powierzchni całej linii zbudowanej w oparciu o te słupy. Dzięki zastosowaniu poprzeczników izolacyjnych, odległości przewodów fazowych od konstrukcji słupa (W1, W2 i W3) są mniejsze od 2,2 m.

Dążenie do ograniczania gabarytów linii napowietrznych przyczyniło się do prowadzenia badań nad nowymi konstrukcjami wsporczymi. Ciekawą propozycją są słupy dla napowietrznych linii przesyłowych o napięciu 138 kV ze zmniejszoną odległością między fazami [15]. Brazylijscy naukowcy opracowali stalową konstrukcję słupa z metalową głowicą, do której przymocowane są izolatory polimerowe o drodze przeskołu łuku 1165 mm i 1755 mm, a przewody fazowe rozmieszczone są w układzie odwróconego trójkąta (rys.5).



Rys.4. Sylwetki słupów jednorzędowych linii 110 kV, a) kratowy słup stalowy serii B2, b) słup rurowy serii EWN [11], c) kompaktowy słup rurowy serii SRFV1 typ P2 [14], d) kompaktowy słup rurowy serii SRFV1 typ P3 [14]



Rys.5. Słup typu Delta dla napowietrznych linii o napięciu 138 kV [15]

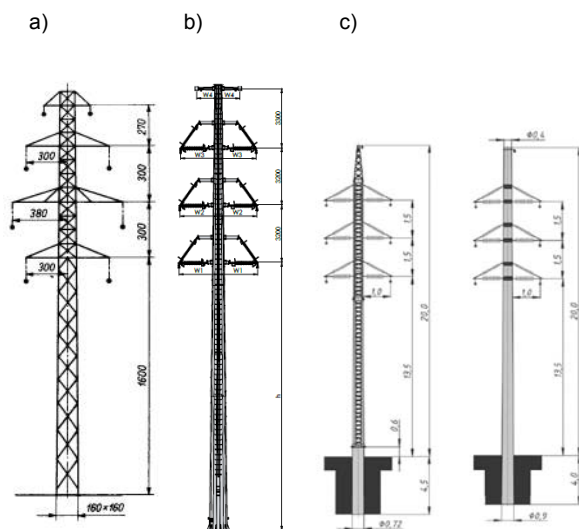
W pracy [15] zaproponowano konstrukcje o dwóch różnych wysokościach całkowitych 17 lub 27 m i czterech układach głowicy, różniących się odległościami X i Y między punktami zawieszenia przewodów oraz minimalną odległością R między fazami a metalową konstrukcją głowicy. Wymiary te zestawiono w tabeli 1. Wyniki badań tych konstrukcji wsporczych zestawione w pracy [15] świadczą o ich zaletach w porównaniu do tradycyjnych układów przesyłowych.

Tabela 1. Wymiary głowic słupów typu Delta

Typ słupa	Odległość X [mm]	Odległość Y [mm]	Odległość R [mm]
Delta 1	2080	1893	1165
Delta 2	2080	1893	1755
Delta 3	2780	2593	1165
Delta 4	2780	2593	1755

W przypadku linii dwutorowych ciekawe wydają się propozycje słupów opracowane przez firmę Valmont [14]. Do słupów tych można stosować łańcuchy izolatorowe będące jednocześnie wysięgnikami izolacyjnymi firmy Pfisterer. W ten sposób powstały konstrukcje serii SRFV2 (rys. 6b), w których długości poprzeczników wynoszą od 2,2 do 3,1 m.

Zmniejszenie odległości izolacyjnych do wartości minimalnych doprowadziło do powstania konstrukcji wsporczych wykorzystywanych w budowie tzw. linii ultrakompaktowych [16]. W liniach tych o napięciu 110 kV odległość przewodów od konstrukcji słupa wynosi 1 m, a odległość między przewodami – 1,5 m. Sylwetki tych słupów przedstawiono na rys. 6c [16].



Rys.6. Sylwetki słupów dwutorowych linii 110 kV, a) kratowy słup stalowy serii O24, b) kompaktowy słup rurowy serii SRFV2 typ P [14], c) słupy ultrakompaktowe [15]

Rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii 110 kV

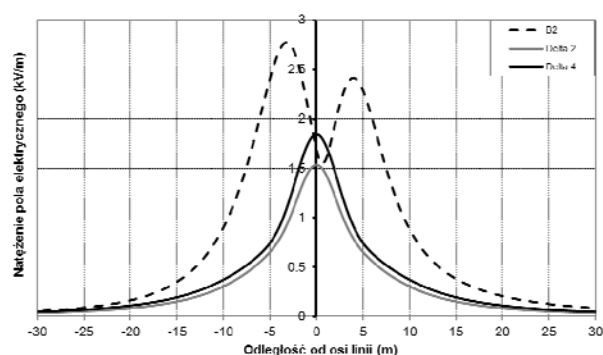
Powszechność występowania linii napowietrznych o napięciu 110 kV, które są źródłem zarówno pola elektrycznego i magnetycznego niskiej częstotliwości (50 lub 60 Hz), powoduje, że zainteresowanie tematyką wpływu tych pól na zdrowie ludzi systematycznie wzrasta. Interesują się nią nie tylko naukowcy, lecz przede wszystkim społeczności lokalne, których przedstawiciele mieszkają lub – z racji projektowanych nowych linii napowietrznych – będą zamieszkiwać w ich sąsiedztwie. Autor artykułu sprawdził więc jakie maksymalne poziomy pola elektrycznego i magnetycznego mogą wystąpić w otoczeniu linii napowietrznych budowanych z wykorzystaniem różnych konstrukcji wsporczych.

W tym celu wykonano symulacje rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w przekrojach prostokątnych do osi linii napowietrznych budowanych przy użyciu tradycyjnych kratowych, rurowych oraz niestandardowych słupów. Obliczenia wykonano przy użyciu programu komputerowego PolE-M opracowanego w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej. W obliczeniach dla linii jednotorowych na słupach przelotowych serii B2, SRFV1 oraz Delta 2 i Delta 4 przyjęto dla każdego przypadku następujące założenia: maksymalne napięcie na przewodach linii 123 kV, przewody 1xAFL-6 240 mm² o obciążalności 735 A, minimalna odległość przewodów od ziemi $h = 6$ m. Zestawienie obliczonych maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, które występują

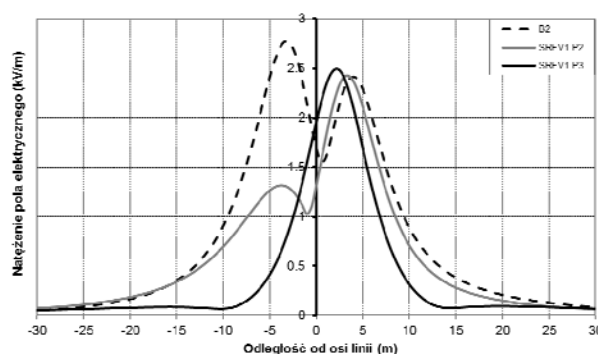
w otoczeniu linii jednotorowych o napięciu 110 kV przedstawiono w tabeli 2, natomiast odpowiednie rozkłady natężenia pola elektrycznego na rysunkach 7 i 8 oraz magnetycznego na rysunkach 9 i 10.

Tabela 2. Obliczone maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występujące w otoczeniu jednotorowych linii napowietrznych o napięciu 110 kV

Rodzaj słupów linii	Maks. wartość natężenia pola E [kV/m]	Maks. wartość natężenia pola H [A/m]	Szerokość obszaru, w którym $E > 1$ kV/m [m]	Minimalna odległość przewodów od ziemi, dla której $E < 1$ kV/m [m]
B2	2,77	25,40	-9,5 ÷ 9,4	10,3
Delta 2	1,54	9,03	± 2,8	7,3
Delta 4	1,84	11,31	± 3,5	8,1
SRFV1 typ P2	2,42	18,90	-7,3 ÷ 8,4	9,5
SRFV1 typ P3	2,49	16,16	-2,4 ÷ 6,8	10,1



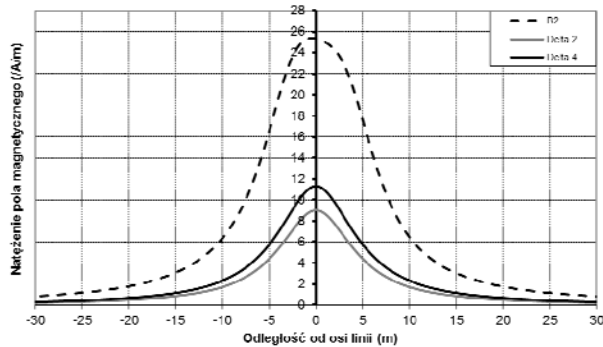
Rys.7. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii jednotorowych 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii B2 oraz niestandardowych słupach Delta 2 i Delta 4. Obliczenia przeprowadzono przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $U_{\text{dop}}=123$ kV)



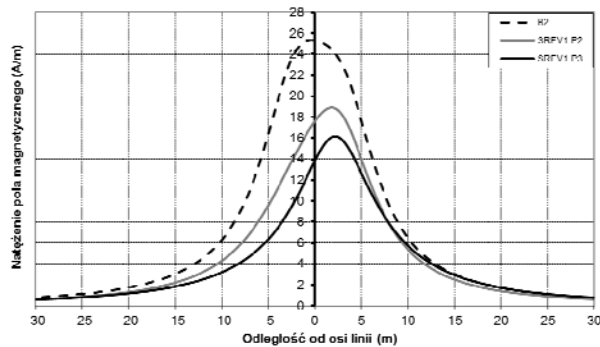
Rys.8. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii jednotorowych 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii B2 oraz kompaktowych słupach rurowych serii SRFV1. Obliczenia przeprowadzono przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $U_{\text{dop}}=123$ kV)

Obliczenia dla linii dwutorowych na słupach przelotowych serii O24, SRFV2 oraz słupach ultrakompaktowych wykonano przy tych samych założeniach, które przyjęto do obliczeń dla linii jednotorowych. Dodatkowo w celu wykazania, że na rozkład pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii dwutorowych wpływa nie tylko rodzaj słupów, skutkujący zmianą geometrii rozmieszczenia przewodów, ale również

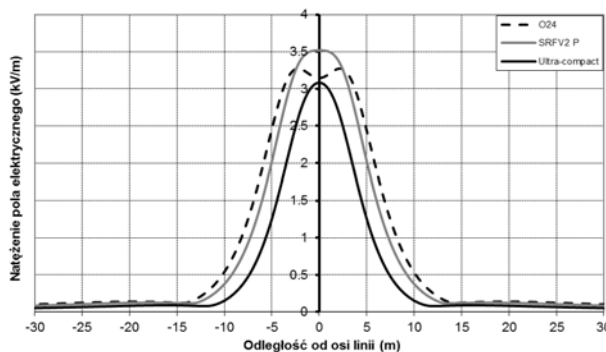
układ faz, przeprowadzono serię obliczeń dla symetrycznego oraz przeciwnego układu faz. Zestawienie obliczonych maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, które występują w otoczeniu linii dwutorowych o napięciu 110 kV przedstawiono w tabeli 3, natomiast odpowiednie rozkłady natężenia pola elektrycznego na rysunkach 11 i 12 oraz magnetycznego na rysunkach 13 i 14.



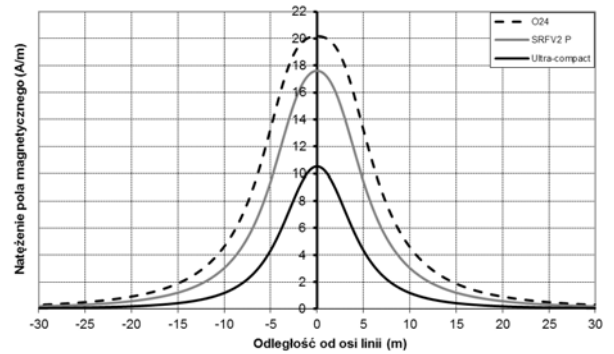
Rys.9. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu linii jednotorowych 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii B2 oraz niestandardowych słupach Delta 2 i Delta 4. Obliczenia przeprowadzono przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $I_{\max}=735$ A)



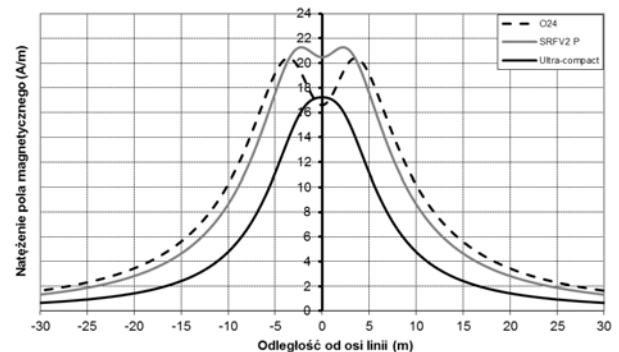
Rys.10. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu linii jednotorowych 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii B2 oraz kompaktowych słupach rurowych serii SRFV1. Obliczenia przeprowadzono przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $I_{\max}=735$ A)



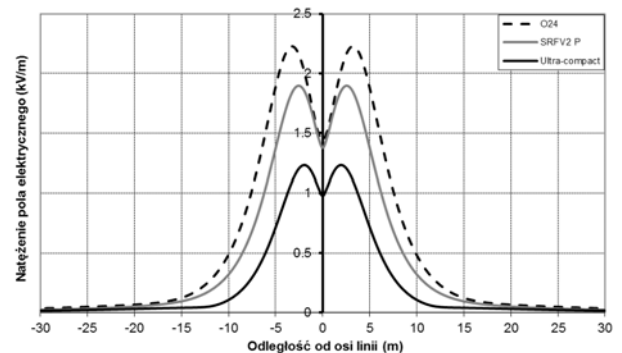
Rys.11. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu dwutorowych linii 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii O24, kompaktowych słupach rurowych serii SRFV2 oraz słupach ultrakompaktowych. Obliczenia przeprowadzono przy symetrycznym układzie faz oraz najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $U_{rdp}=123$ kV)



Rys.12. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu dwutorowych linii 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii O24, kompaktowych słupach rurowych serii SRFV2 oraz słupach ultrakompaktowych. Obliczenia przeprowadzono przy przeciwnym układzie faz oraz najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $U_{rdp}=123$ kV)



Rys.13. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu dwutorowych linii 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii O24, kompaktowych słupach rurowych serii SRFV2 oraz słupach ultrakompaktowych. Obliczenia przy symetrycznym układzie faz oraz najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $I_{\max}=735$ A)



Rys.14. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu dwutorowych linii 110 kV na tradycyjnych słupach kratowych serii O24, kompaktowych słupach rurowych serii SRFV2 oraz słupach ultrakompaktowych. Obliczenia przeprowadzono przy przeciwnym układzie faz oraz najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maks. zwis przewodów, $I_{\max}=735$ A)

Tabela 3. Obliczone maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występujące w otoczeniu dwutorowych linii napowietrznych o napięciu 110 kV

Rodzaj słupów linii	Maks. wartość natężenia pola E [kV/m]	Maks. wartość natężenia pola H [A/m]	Szerokość obszaru, w którym $E > 1$ kV/m [m]	Minimalna odległość przewodów od ziemi, dla której $E < 1$ kV/m [m]
Układ faz symetryczny				
O24	3,27	20,41	$\pm 8,1$	14,6
SRFV2	3,52	21,28	$\pm 7,2$	14,0
Ultra compact	3,08	17,24	$\pm 5,5$	11,5
Układ faz przeciwny				
O24	2,23	20,19	$\pm 7,5$	8,6
SRFV2	1,90	17,62	$\pm 6,2$	8,0
Ultra compact	1,23	10,54	$\pm 3,5$	6,5

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane ze stanem infrastruktury sieci rozdzielczej 110 kV w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym oraz wskazano na możliwość zastąpienia, podczas budowy nowych linii napowietrznych 110 kV, tradycyjnych stalowych, kratowych konstrukcji wsporczych, kompaktowymi słupami rurowymi lub innymi słupami, w których zastosowano zmniejszone odstępki elektroizolacyjne, w tym odległości między fazami. Linie takie mają szansę na uzyskanie większej akceptacji społecznej ze względu na mniejszy wpływ na krajobraz oraz mniejsze poziomy pola elektrycznego i magnetycznego, jakie wystąpią w ich otoczeniu.

Wyniki obliczeń wskazują, że zastosowanie słupów typu Delta w budowie jednotorowych linii napowietrznych 110 kV spowoduje prawie dwukrotne obniżenie poziomu natężenia pola elektrycznego oraz prawie trzykrotne obniżenie natężenia pola magnetycznego w porównaniu do wartości pól wytwarzanych w otoczeniu linii napowietrznych wykonanych z użyciem tradycyjnych słupów kratowych. Stosując słupy typu Delta można też w znaczący sposób ograniczyć szerokość obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego przekroczy wartość 1 kV/m (wartość dopuszczalna dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową) lub zachowując w każdym przęśle takiej linii odległość przewodów od ziemi większą niż 7,3 m, spowodować, że w żadnym miejscu pod linią natężenie pola elektrycznego nie przekroczy wartości 1 kV/m.

Porównując rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii dwutorowych na słupach tradycyjnych, kompaktowych oraz ultrakompaktowych można zauważyć istotny wpływ układu faz na wartości obu składowych pola elektromagnetycznego. Przy symetrycznym rozmieszczeniu faz, niezależnie od konstrukcji słupa, maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego są do siebie zbliżone. Istotne różnice w rozkładach pól widać przy przeciwnym układzie faz. Dla linii ultrakompaktowej natężenie pola elektrycznego i magnetycznego jest prawie dwukrotnie mniejsze od wartości obu składowych pola występujących w otoczeniu dwutorowej linii na słupach tradycyjnych.

Oznacza to, że linie ultrakompaktowe powinny być budowane na obszarach miejskich, gdzie istnieją istotne ograniczenia w pozyskaniu terenu pod infrastrukturę energetyczną. Szczególnie istotny jest fakt, że pod taką linią szerokość obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć dopuszczalną wartość 1 kV/m wynosi tylko 7 m (po 3,5 m od osi linii), a przy zachowaniu odległości przewodów od ziemi większej od 6,5 m obszar taki w ogóle nie wystąpi.

Autor: dr inż. Marek Jaworski, Politechnika Wrocławska, Katedra Energoelektryki, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: marek.jaworski@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Energetyka, Dystrybucja i przesył, *Raport PTPIREE*, Poznań (2019)
- [2] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, Dz.U. z 2019 r. poz. 2448.
- [3] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 17 lutego 2020 r. w sprawie sposobów sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, Dz.U. z 2020 r. poz. 258
- [4] PN-75/E-5100 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa
- [5] PN-E-05100-1: 1998 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa
- [6] PN-EN 50341-1:2005 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne
- [7] PN-EN 50341-1:2012 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [8] PN-EN 50341-2-22:2016 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski
- [9] Innovative solutions for overhead line supports, *CIGRE TB* (2010), nr 416
- [10] Innovative solutions for overhead line supports, *Anex CIGRE TB* (2010) nr 416
- [11] Katalog słupów rurowych dla napowietrznych linii elektroenergetycznych 110 kV, *Elmonter*, (2018)
- [12] Smolarczyk A. Tuzim M., Szewczyk M., Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne kompaktowych linii napowietrznych wysokich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 12, 68-73
- [13] Dudek D., Linia kompaktowa 110 kV na słupach rurowych wg wymagań nowych norm PN-EN 50431-3-22-2010. Porównanie parametrów technicznych z typowymi konstrukcjami 110 kV – zalety i wady. *Mat. X Konferencji Naukowo-Technicznej i_Mitel* (2018)
- [14] Katalog słupów rurowych w układzie kompaktowym dla napowietrznych linii elektroenergetycznych 110 kV, *Valmount Structures Pfisterer*
- [15] Sousa W.E., Boaventura W.C., Assis S.C., Electrical Performance of a Compact Arrangement of Conductors for 138 kV Overhead Transmission Lines, *IEEE Latin America Transactions*, 16 (2018), n.1, 96-105
- [16] Vojtovich R.A., Lavrov Y.A., Petrova N.F., Tolstobrova L.I., Conditions for Conducting Repair Work under Voltage on Ultra-compact Overhead Transmission Lines 110 kV, *14 th International Scientific-Technical Conference APEIE* (2018), 478-482