

Narażenia piorunowe napowietrznych linii najwyższych napięć a optymalizacja ochrony odgromowej i prac pod napięciem ¹⁾

Lightning hazard of EHV overhead lines and optimization of lightning protection and live working

Plan przesyłowych sieci elektroenergetycznych najwyższych napięć – NN w Polsce przedstawiono na rysunku 1. Całkowita długość linii elektroenergetycznych w Polsce [1] wynosi 6642 km linii 220 kV oraz 4720 km linii 400 kV (stan na dzień 31 grudnia 2016 r.).

Zgodnie ze standardami technicznymi PSE S.A. i wymaganiami norm międzynarodowych napowietrzne linie elektroenergetyczne NN powinny być chronione przed bezpośrednimi wyładowaniami piorunowymi oraz przed skutkami oddziaływań przepięć atmosferycznych [1, 3-4]. W celu minimalizacji szkód piorunowych linie napowietrzne są wyposażane w przewody odgromowe zapewniające odpowiedni kąt strefy ochrony (dla zewnętrznych przewodów fazowych $\leq 20^\circ$, a wewnętrzny kąt ochronny $\leq 45^\circ$). Skuteczna ochrona odgromowa napowietrznych linii elektroenergetycznych NN wymaga także efektywnego uziemienia słupów linii i zapewnienia właściwej wartości rezystancji uziemienia przez cały okres ich eksploatacji.

Dane o wyłączeniach linii NN spowodowanych przez doziemne wyładowania atmosferyczne są gromadzone przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne i zawierają informacje m.in. o liczbie wyłączeń poszczególnych linii 220 kV i 400 kV, czasie trwania wyłączenia.

Dane o wyładowaniach piorunowych są dostępne z obszaru Polski dzięki rejestracjom za pomocą w pełni zautomatyzowanego systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych LLS (ang. *Lightning Location System*) – LINET zainstalowanego w Polsce w roku 2006, a obecnie zintegrowanego z ok. 100 antenami rejestrującymi wyładowania na obszarze całej Europy [5]. Dane z tego systemu są dostępne zarówno w postaci zarchiwizowanej jak i w czasie rzeczywistym (on-line).



Rys.1. Lokalizacja istniejących oraz planowanych linii przesyłowych NN na obszarze Polski – 400 kV w kolorze czerwonym, 220 kV w kolorze zielonym

Dane zarchiwizowane mogą być szczególnie przydatne m.in. do:

- korelacji zarejestrowanych wyładowań doziemnych z poszczególnymi wyłączeniami wybranych linii oraz wpływu parametrów prądów pioruna na zarejestrowane wyłączenia linii (krótko- i długotrwałe),
- oszacowania prawdopodobieństwa wyłączeń linii NN spowodowanych przez wyładowania atmosferyczne na podstawie danych archiwalnych w zależności od poziomu wytrzymałości udarowej izolacji linii oraz ich lokalizacji na obszarze Polski,

¹⁾ Opracowano na podstawie referatu przygotowanego na konferencję OPE'2017.

- porównania statystycznych danych wyłączeń linii NN spowodowanych przez wyładowania atmosferyczne z oszacowanymi spodziewanymi liczbami oraz czasami trwania wyłączeń,
- szybkiej lokalizacji uszkodzeń w liniach przesyłowych NN spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi i związanej z tym optymalizacji pracy służb eksploatacyjnych,
- potwierdzenia wyładowania piorunowego, jako przyczyny wyłączenia linii – minimalizacja ewentualnego czasu trwania wyłączenia linii oraz kosztów z tym związanych.

Natomiast dane w czasie rzeczywistym z systemów automatycznej rejestracji wyładowań piorunowych mogą być użyteczne do optymalizacji i racjonalizacji wykonywania prac na liniach elektroenergetycznych NN w technologiach bezwyłączeniowych (tzw. prace pod napięciem – PPN), zwłaszcza do obserwacji przemieszczania się wyładowań doziemnych i ostrzegania brygad wykonujących PPN oraz optymalizacji procedur ostrzegania i zabezpieczania miejsc pracy.

Ryzyko narażeń piorunowych linii napowietrznych NN i statystyki wyładowań doziemnych w Polsce

Liczbę wyładowań piorunowych N_L w napowietrzną linię elektroenergetyczną w ciągu roku można określić według wzoru:

$$N_L = N_G \cdot A_L \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

gdzie: N_G – roczna liczba wyładowań piorunowych przypadających na 1 km² powierzchni na danym obszarze; A_L – powierzchnia zbierania wyładowań przez linię, m².

Dla napowietrznej linii elektroenergetycznej zlokalizowanej na płaskim terenie, powierzchnię zbierania wyładowań przez linię A_L można określić jako przecięcie między powierzchnią ziemi i linią prostą nachyloną pod kątem 33°, przechodzącą przez przewód odgromowy wzdłuż całej długości linii L . Wartość A_L można wyznaczyć w sposób graficzny lub matematycznie w zależności od geometrii stupa linii i liczby przewodów odgromowych.

Dla typowych konstrukcji stupów oraz sposobu zawieszenia przewodów odgromowych (patrz rys. 2), powierzchnię zbierania wyładowań przez linię A_L może być obliczona z zależności:

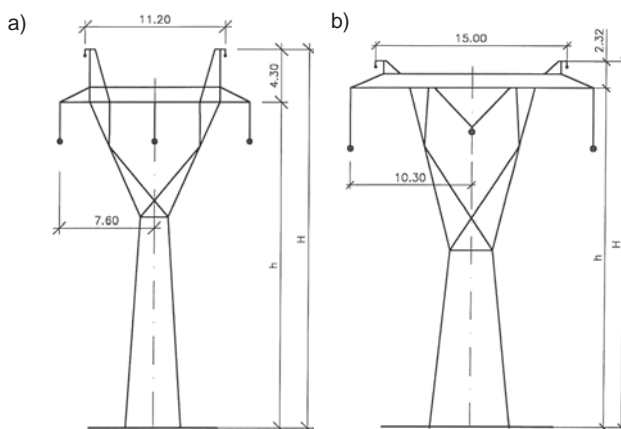
$$A_L = (6H + W) \cdot L \quad (2)$$

gdzie: H – wysokość zawieszenia przewodów odgromowych nad powierzchnią ziemi, W – szerokość stupa, L – długość linii.

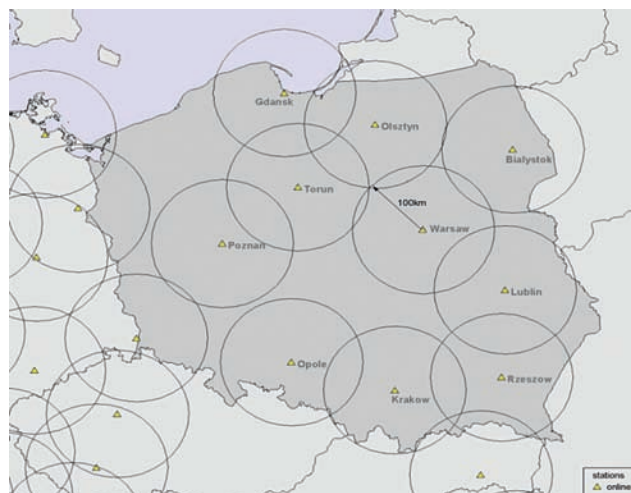
Typowe wysokości stupów są zawarte w granicach dla linii 220 kV – $H = 28-30$ m, a dla 400 kV – $H = 30-32$ m. Biorąc pod uwagę średni zwis przewodów odgromowych średnia odległość przewodów odgromowych od ziemi może w praktyce być mniejsza o około 10%. Uwzględnienie tego faktu może prowadzić do zmniejszenia liczby wyładowań N_L w podobnej skali, w zależności od poziomu napięcia oraz profilu linii.

Dane o wartościach N_G na obszarze Polski możliwe są do pozyskania z systemu LINET, którego 10 anten (sensorów) jest zainstalowanych na terenie Polski (rys. 3), zarchiwizowanych od roku 2006. Dane takie zawierają także informacje o:

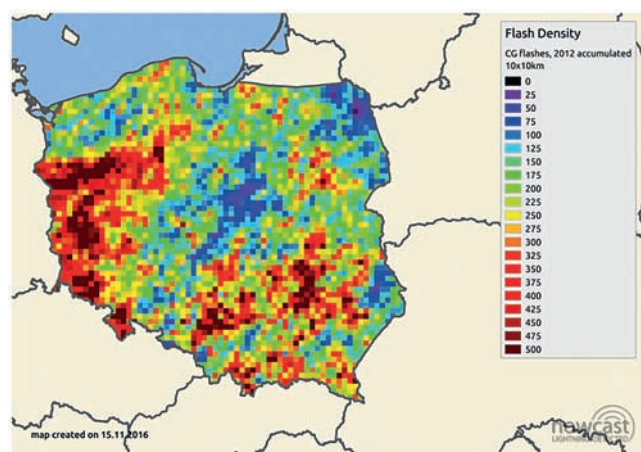
- czasie i miejscu wystąpienia wyładowań doziemnych z dokładnością 100-200 m, w zależności od regionu Polski,
- rodzaju wyładowania (doziemne lub między chmurami), biegunowości oraz wartości szczytowej prądu poszczególnych udarów wyładowania.



Rys. 2. Typowe kształty stupów stosowanych w liniach jednorowych: a) 220 kV, b) 400 kV



Rys. 3. Lokalizacja anten systemu LINET na obszarze Polski



Rys. 4. Mapa gęstości wyładowań doziemnych na obszarze Polski w roku 20012 utworzona na podstawie danych z systemu LINET (dzięki uprzejmości nowcast.de)

Przykładowa mapa gęstości wyładowań doziemnych na obszarze Polski na podstawie danych z systemu LINET dla roku 2012 została przedstawiona na rysunku 4 [4].

Oszacowane liczby bezpośrednich wyładowań piorunowych N_L wg zależności (1) i (2) oraz danych z systemu LINET w napowietrzne linie 220 kV i 400 kV na 100 km ich długości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Oszacowane roczne liczby bezpośrednich trafień wyładowań w linie 220 kV i 400 kV

Region Polski	Gęstość wyładowań N_G	Roczna liczba trafień w linię N_L	
	1/km ² × rok	na 100 km długości linii	
Północno-wschodni	1,0 - 2,0	220 kV	17 - 38
		400 kV	20 - 40
Centralny	2,0 - 2,5	220 kV	34 - 48
		400 kV	39 - 52
Południowo-zachodni	2,5 - 4,5	220 kV	48 - 88
		400 kV	52 - 93
Średnia roczna dla Polski		220 kV	33 - 58
		400 kV	37 - 62

Wyłączenia linii przesyłowych NN w Polsce spowodowane wyładowaniami piorunowymi w latach 2010-2016

Liczba wyłączeń linii elektroenergetycznych 220 kV i 400 kV, które zostały zarejestrowane przez PSE S.A. [5] w latach 2010-2016 przedstawiono w tabeli 2. Z analizowanych danych wynika również, że w okresie tym znaczna większość wyłączeń były to przypadki wyłączeń pojedynczych linii. Niemniej jednak zarejestrowano także, że wybrane linie w wyniku wyładowania piorunowego wyłączane były 5-krotnie – linia 220 kV oraz 8-krotnie – linia 400 kV.

Trwałe wyłączenie linii zostało zdefiniowane jako wyłączenie, które trwa dłużej niż 1 minuta (w którym automatyka zabezpieczeniowa nie dokonała ponownego skutecznego załączenia linii – SPZ WZ).

Tabela 2

Zarejestrowana liczba wyłączeń linii elektroenergetycznych 220 kV i 400 kV spowodowanych wyładowaniami piorunowymi

Rok	Liczba zarejestrowanych wyłączeń (trwałych i przemijających) N_{RLF}			
	linie 220 kV		linie 400 kV	
	trwałe	przemijające	trwałe	przemijające
2010	4	15	5	8
2011	6	21	2	16
2012	7	12	5	12
2013	1	9	0	7
2014	6	17	2	18
2015	15	22	11	3
2016	11	16	4	15
Razem	50	112	29	79
Średnio rocznie	7,1	16	4,1	11,3
Razem	162		108	
Wszystkie wyłączenia na 100 km długości linii/rok	0,29		0,28	

W znacznej większości wyłączenia linii były usuwane w wyniku pozytywnego zadziałania automatyki SPZ – zakwalifikowano je jako wyłączenia przemijające.

Mając na uwadze dane ujęte w tabeli 1 dotyczące oszacowanej liczby wyładowań piorunowych N_L w linię NN można dokonać obliczenia prawdopodobieństwa P bezpośrednio wyładowania w linię NN, które powodować może wyłączenia przemijające oraz wyłączenia trwałe linii.

Wykorzystując dane dotyczące zarejestrowanych wyłączeń linii wskutek wyładowań i piorunowych prawdopodobieństwo P może być oszacowane z zależności:

$$P = N_{RLF} / N_L \quad (3)$$

Dla linii elektroenergetycznych NN średnia wartość prawdopodobieństwa wyładowania piorunowego powodującego wyłączenie linii oszacowano na podstawie danych z PSE S.A. obejmujących lata 2010-2016 na poziomie:

- $P = 5 \cdot 10^{-3} - 8,8 \cdot 10^{-3}$ dla linii 220 kV,
- $P = 4,5 \cdot 10^{-3} - 7,5 \cdot 10^{-3}$ dla linii 400 kV.

Na podstawie powyższych analiz można stwierdzić, że skuteczność ochrony odgromowej linii przesyłowych NN jest duża i ryzyko uszkodzenia linii przesyłowych dla warunków klimatycznych występujących w Polsce można określić jako umiarkowane.

Niemniej jednak wyróżnić można obszary Polski, gdzie gęstość wyładowań piorunowych jest większa. W szczególności wymienić można: zachodnio-południową część kraju, południową część Mazowsza, rejon Świętokrzyskiego i rejon Śląska (patrz rys. 4). Tym samym brygady pracujące na liniach pod napięciem powinny być poinformowane o nieco wyższym stopniu narażenia na wyładowania atmosferyczne niż w pozostałych częściach kraju. Należałoby rozważyć przy rozwoju techniki PPN na liniach przesyłowych możliwości zastosowania iskierników ochronnych dla prac w strefach podwyższonego ryzyka wyładowań atmosferycznych.

Wyładowania atmosferyczne a realizacja prac na liniach w technologiach bezwyłączeniowych – PPN

Jedną z podstawowych zasad prac pod napięciem, wynikającą głównie z możliwości analizy i doboru bezpiecznych odległości zbliżenia, jest takie dostosowanie warunków pracy, aby statystyczne przebiegi pojawiające się w miejscu pracy nie przewyższały wartości wymaganego napięcia wytrzymywanego. Dotyczy to przebiegów łączeniowych oraz atmosferycznych, które stanowią najbardziej ostre narażenia napięciowe.

W normie PN-EN 61472 [6] dotyczącej obliczania odległości zbliżenia podczas prac pod napięciem proponuje się, aby do zakazu wykonywania pracy przy minimalnych odległościach zbliżenia w określonych warunkach były brane pod uwagę niektóre czynniki środowiskowe. Na przykład, praca pod napięciem nie powinna być dozwolona w czasie występowania w pobliżu burzy, podczas silnego deszczu lub gdy na powierzchni sprzętu izolowanego (np. drążków izolacyjnych o gładkiej powierzchni) występuje ciągła warstwa wilgoci.

Nie należy wykonywać pracy na linii, w pobliżu linii lub w pobliżu urządzeń będących pod napięciem, lub bez napięcia, jeśli w najbliższej okolicy (do 10 km) dostrzega się wyładowania atmosferyczne. Oddalone od miejsca pracy i niezauważalne dla pracowników wyładowania atmosferyczne mogą spowodować przepięcia w urządzeniach będących pod napięciem. Przepięcie atmosferyczne w linii powstałe w odległym od wykonywania prac miejscu jest tłumione, gdy wędruje w kierunku miejsca wykonywania pracy. Z kolei wartość tego przepięcia może zostać podwojona na odległym otwartym końcu linii.

Aby praca była bezpieczna wartość przepięcia atmosferycznego powinna być mniejsza niż wartość statystycznego napięcia wytrzymywanego U_{90} , przy którym występuje 90-procentowe prawdopodobieństwo wytrzymałości elektrycznej izolacji w miejscu pracy. Może to odpowiadać sytuacji, gdy miejsce pracy jest odległe np. więcej niż o 10 km od miejsca uderzenia pioruna, nawet jeśli linia jest na końcu otwarta (warto wspomnieć, że w pierwszych wersjach omawianej normy odległość określano na 30 km). Należy również wskazać, że przyczyną powstania fali przepięciowej nie musi być wyładowanie bezpośrednie w linii NN, lecz może być również wyładowanie pobliskie (w wyniku indukcji powstaje fala przepięciowa na linii) – rysunek 5d.

Przy bezpośrednim trafieniu pioruna w linię powinny być brane pod uwagę trzy przypadki, a mianowicie:

- trafienie w pojedynczy przewód, np. w przewód odgromowy (rys. 5a),
- trafienie w jeden z dwu równoległych przewodów odgromowych (rys. 5b),
- trafienie w przewodzącą konstrukcję wsporczą przewodów (rys. 5c).

W pierwszym przypadku, powstające na przewodzie przepięcie U_p można wyrazić zależnością

$$U_p = \frac{ZI_L}{2} \quad (4)$$

w której: Z – impedancja falowa, I_L – wartość szczytowa prądu piorunowego.

Zależność ta potwierdza istnienie w tym przypadku bardzo dużej wartości przepięć. Na przykład, przy realnych wartościach $Z = 200 \Omega$ i $I_L = 30 \text{ kA}$, otrzymuje się 3 MV.

W drugim przypadku, przy założeniu, że $h \gg a$ (rys. 5b), powstające pomiędzy równoległymi przewodami przepięcia można wyrazić zależnością:

$$U_{12} = 30I_L \ln \frac{a}{r} \quad (5)$$

przy czym: a – odstęp między przewodami, r – promień trafionego przewodu.

W trzecim przypadku, powstające przepięcia na przewodzie względem ziemi tuż po przeskoku odwrotnym (od konstrukcji wsporczej do przewodu) mogą być wyznaczone z zależności:

$$U = \frac{Z_1 Z_s}{Z_1 + 2Z_s} I_L \approx 0,2Z_1 I_L \quad (6)$$

w której: Z_1 – impedancja falowa przewodu, Z_s – impedancja falowa konstrukcji wsporczej.

Linia lub instalacja, która jest odłączona od źródła zasilania (zarówno uziemiona, jak i nieziemiona) może być narażona na indukcyjne oddziaływanie prądów wyładowań pobliskich. Jeśli w takiej linii lub instalacji wykonuje się prace, należy zapewnić minimalną odległość zbliżenia odpowiednią do spodziewanego maksymalnego poziomu napięcia indukowanego.

Przepięcia indukowane we wprowadzanych do obiektu liniach napowietrznych są związane z trafieniami piorunowymi w powierzchnię równoważną A_L i mogą być w sposób uproszczony wyznaczone z zależności:

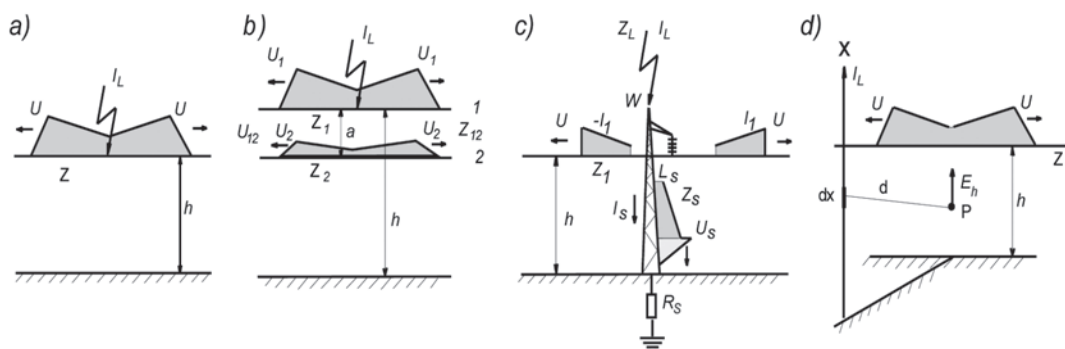
$$U = \frac{30 k_v I_L h}{d} \quad (7)$$

w której: h – wysokość przewodu linii nad ziemią; d – odległość linii napowietrznej od kanału piorunu, k_v – współczynnik zależny od prędkości propagacji fali indukowanej ($k_v \approx 1,1$).

Na podstawie równania (7) można oszacować odległość d , stanowiącą podstawę do oceny zakresu oddziaływań wyładowań doziemnych indukujących przepięcia na poziomie napięcia wytrzymywanego izolacji linii U_{90} lub sprzętu ochronnego (izolacyjnego) stosowanego podczas prac pod napięciem.

Jeśli wyładowanie atmosferyczne spowoduje gdziekolwiek w sieci uszkodzenie, wystąpi wówczas przepięcie oraz otwarcie łącznika i jeśli samoczynne załączenie nie jest zablokowane, to podczas wykonywania załączenia może wystąpić przepięcie łączeniowe. Zjawiska te powodują wystąpienie naprężeń elektrycznych w całej izolacji w miejscu pracy.

Jeśli w miejscu pracy są stosowane urządzenia ograniczające przepięcia, np. iskierniki ochronne, w technice PPN stosowane



Rys. 5. Trafienie piorunu w linię napowietzną: a) w pojedynczy przewód, b) w jeden z dwu przewodów, c) w konstrukcję wsporczą przewodów, d) w ziemię w pobliżu linii

jest określenie PPAG (ang. *Portable Protective Air Gaps*) lub odgromniki (ograniczniki przepięć) to wartość napięcia U_{90} będzie przez nie znacznie zmniejszona i przeskok na iskierniku (lub w odgromniku) może wystąpić nawet wówczas, gdy uderzenie pioruna wystąpi w odległości dużo większej niż 10 km. Chociaż iskiernik stanowi dodatkową ochronę przed przeskokiem w miejscu pracy, spowodowanym wyładowaniem piorunowym, to jego zadziaływanie może być przyczyną niepożądanych, długotrwałych wyłączeń, przy braku skutecznego samoczynnego ponownego załączenia. Z drugiej strony ochrona pracy brygad pracujących pod napięciem nie może odbywać się kosztem narażenia ich na zwiększone ryzyko, skoro jest to rozwiązanie techniczne stosowane w wielu krajach (rys. 6) [8-9].



Rys. 6. Zastosowanie przenośnych iskierników ochronnych PPAG wg [8]

Wyładowanie atmosferyczne może być wykryte wzrokowo lub słuchowo z odległości do ok. 10 km i jeśli jest widziana błyskawica lub słyszany grzmot pioruna nie należy prowadzić prac pod napięciem. Jednakże bardziej niezawodnym i skutecznym sposobem ostrzegania jest możliwość uzyskiwania danych o miejscach występowania wyładowań piorunowych w czasie rzeczywistym z systemów automatycznej rejestracji wyładowań, np. LINET. Pozostaje sprawą otwartą (wykraczającą poza ramy niniejszego artykułu) system ostrzegania oparty o techniczne wyposażenie brygad i/lub działanie organów ruchowych (w niektórych krajach pierwsze sygnały o nadchodzących anomaliach pogodowych, ich intensywności i kierunku brygady otrzymują właśnie z tych organów).

Wnioski

Analizy dotyczące korelacji oddziaływań wyładowań piorunowych oraz wyłączeń linii NN, prezentowane w niniejszym artykule, są nowatorskimi tego typu ocenami w kraju. Okres analizy obejmuje lata 2010-2016, a dane wyładowań piorunowych zostały uzyskane z systemu automatycznej rejestracji wyładowań LINET.

Wykorzystywanie danych o wyładowaniach piorunowych z systemów automatycznej ich rejestracji, w tym gromadzonych danych historycznych, może być bardzo przydatne do analizy skuteczności koordynacji izolacji linii NN. Jest to obecnie stosunkowo proste dzięki możliwości zastosowania ogólnodostępnych narzędzi do lokalizacji wyładowań oraz tras linii, jak np. Google maps oraz Internet. Dzięki temu jest możliwa szczegółowa analiza wpływu wyładowań piorunowych oraz ich parametrów na wyłączenia linii oraz ulepszanie środków ochrony odgromowej dla dowolnie wybranych linii elektroenergetycznych.

Można ocenić, że dla linii elektroenergetycznych o napięciu 220 kV i 400 kV w Polsce prawdopodobieństwo wyłączenia linii spowodowane wyładowaniami piorunowymi jest umiarkowane i zawarte w przedziale $5 \cdot 10^{-3}$ - $8,8 \cdot 10^{-3}$ dla linii 220 kV oraz $4,5 \cdot 10^{-3}$ - $7,5 \cdot 10^{-3}$ dla linii 400 kV.

Stosowane na liniach przesyłowych NN w Polsce środki ochrony odgromowej linii spełniają swoją rolę, a uszkodzenia izolacji linii nie są częste w odniesieniu do całkowitej długości linii przesyłowych 220 kV i 400 kV.

Nowością w skali kraju może być zastosowanie danych o wyładowaniach piorunowych w czasie rzeczywistym (on-line) z systemu automatycznej rejestracji wyładowań, np. LINET do optymalizacji i racjonalizacji wykonywania prac na liniach elektroenergetycznych NN w technologiach bezwyłączeniowych (PPN).

Obserwacje przemieszczania się wyładowań doziemnych w czasie rzeczywistym, ostrzeganie brygad wykonujących prace na liniach napowietrznych oraz optymalizacja procedury ostrzegania i zabezpieczania miejsc pracy z pewnością może się przyczynić do wymiernych korzyści ekonomicznych związanych nie tylko z efektywnością PPN, ale także z krótszym czasem lokalizacji uszkodzeń linii NN spowodowanych przez wyładowania atmosferyczne i zmniejszeniem czasu do ponownego ich załączenia.

Podziękowanie

Autorzy dziękują firmie Nowcast (Niemcy), operatorowi systemu LINET za udostępnienie danych o wyładowaniach piorunowych na potrzeby niniejszego artykułu i Panu Jarosławowi Łobodzie za przygotowanie mapy z naniesionymi wyładowaniami piorunowymi.

PIŚMIENNICTWO

- [1] www.pse.pl
- [2] Łoboda M., Betz H. D., Dziewit Z., Barański P.: New lightning detection networks in Poland – LINET and LLDN, 29th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2008, Uppsala, Szwecja 2008.
- [3] PN-EN 50341:2013 – Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV – Część 1: Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne.
- [4] PN-EN 50341-2-22:2016-04 – Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV – Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski.
- [5] www.nowcast.de i www.nowcast.pl
- [6] PN-EN 61472:2013 – Prace pod napięciem – Minimalne odległości zbliżenia w sieciach prądu przemiennego o napięciu od 72,5 kV do 800 kV – Metoda obliczania.
- [7] Łoboda M., Lenarczyk K.: Lightning performance of 220 kV and 400 kV overhead power transmission lines in Poland in years 2010-2016. International Colloquium on Lightning and Power Systems. CIGRE&CIRED, September 18-20, 2017, Ljubljana.
- [8] EPRI: Live Working Guide for Overhead Lines, version 3, november 2004 (rozdz. 5 i Aneks B).
- [9] Dudek B.: Prace pod napięciem w elektroenergetyce – bezwyłączeniowe techniki utrzymania sieci przesyłowej, *INPE Podręcznik dla elektryków*, maj 2011, zeszyt 36.

