



Romuald KOSZTALUK¹, January MIKULSKI¹, Jerzy DĄBROWSKI²

Instytut Energetyki (1), Doradztwo Techniczne Jerzy Dąbrowski (2)

Zawodność przewodów odgromowych

Streszczenie. Przedstawiono najważniejsze światowe osiągnięcia w ocenie skuteczności ochronnej przewodów odgromowych. Podkreślono znaczenie badań pioruna, wykonanych w Polsce. Scharakteryzowano modele elektro-geometryczne (EGM) uderzenia pioruna w linię napowietrzną. Omówiono zalecenia, dotyczące ochrony odgromowej polskich linii z przewodami odgromowymi, ujęte we Wskazówkach Koordynacji Izolacji, opracowanych w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Energetyki.

Abstract. (Failure of Overhead Wires). The IEEE methods for computing lightning performance of overhead transmission lines are analysed. A recent physical approach to assess negative downward lightning incidence are described. The methods proposed by Faruk Rizk for analysing shielding failure are presented and discussed.

Słowa kluczowe : przewody odgromowe, model elektro-geometryczny, uziemienia, linie napowietrzne.

Keywords: lightning protection conductors, electro-geometrical model, earthing, overhead lines.

Wstęp

Napowietrzne linie elektryczne o napięciu znamionowym wyższym niż 100 kV, budowane na terenach o umiarkowanej i dużej aktywności burzowej osłania się obecnie jednym lub dwoma przewodami odgromowymi. Chronią one przewody fazowe od bezpośrednich uderzeń pioruna oraz redukują liczbę przeskoków odwrotnych na izolatorach, spowodowanych wzrostem potencjału konstrukcji wsporczych, podczas przewodzenia prądu pioruna do ziemi [1÷12]. Przewody odgromowe wprowadzono początkowo w liniach 220 kV w połowie trzeciego dziesięciolecia ubiegłego wieku w Stanach Zjednoczonych, a następnie w Europie. Obecnie stosuje się je w liniach 110 kV i wyższych napięć.

W Polsce wszystkie linie 220 kV i wyższych napięć, budowane po drugiej wojnie światowej były wyposażane w przewód, lub w dwa przewody odgromowe. Ze względów oszczędnościowych wiele linii 110 kV, budowanych do lat siedemdziesiątych wyposażano w przewody odgromowe, instalowane tylko na podejściach do stacji, zwykle na odcinku 500 do 700 m. W Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Energetyki wykonano szereg badań, oceniających skuteczność zastępczych układu ochrony stacji, opracowanych przez profesora Stanisława Szpora. Składały się one z dławików o indukcyjności 1000 μH (włączanych szeregowo z przewodami fazowymi), z iskierników, instalowanych przed dławikiem oraz z odgromników zaworowych, umieszczanych po stronie stacyjnej dławika. Badania sieciowe wykazały dobre własności ochronne takich układów [16,17]. Brak ochrony linii przewodami odgromowymi na całej długości powodował jednak ich dużą awaryjność burzową. Ostatecznie w wyniku szczegółowych analiz zdecydowano osłaniać wszystkie polskie linie o napięciu równym, lub wyższym od 110 kV przewodem, lub przewodami odgromowymi.

Innym podjętym tematem w Zakładzie Wysokich Napięć było ustalenie warunków izolowania przewodów odgromowych od słupów (zwłaszcza w liniach z dwoma przewodami odgromowymi), w celu zmniejszenia strat przesyłowych [15]. Obecnie są kontynuowane prace, dotyczące instalowania przewodów odgromowych, wyposażonych we włókna światłowodowe, pozwalające przesyłać sygnały telekomunikacyjne na duże odległości [14].

Artykuł przedstawia kolejną pracę Zakładu Wysokich Napięć IEn, dotyczącą ochrony linii napowietrznych od uderzeń pioruna i od przepięć występujących w sieciach. W poprzedniej publikacji o zbliżonej tematyce [14] zaproponowano metodę oceny skuteczności ochrony linii napowietrznych od skutków bezpośrednich uderzeń pioruna w przewody odgromowe. W niniejszym artykule podjęto analizę przypadku nazywane uderzeniem bocznym pioruna, polegającym na ominięciu przez wyładowanie przewodu odgromowego i uderzenie pioruna w przewód fazowy linii.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że zagadnienia związane ze skutecznością ochronną przewodów odgromowych są jednym z ważnych tematów prac badawczych, prowadzonych od 1957 r. przez wielu wybitnych specjalistów, zarówno w Ameryce Północnej w stowarzyszeniu IEEE [5÷7],[9÷11] jak i w ramach CIGRE [8,12]. Uważa się, że analizowane zagadnienia przewodów odgromowych nie są w pełni rozwiązane i że należy oczekiwać dalszego postępu w tej dziedzinie [13].

Analizy własności przewodów odgromowych

W 1956 r. opublikowano bardzo złe wyniki pracy pierwszej amerykańskiej linii 330 kV, należącej do Ohio Wally Systems [1]. W tej linii przewody fazowe były zawieszane na 46 m konstrukcjach wsporczych i były chronione od uderzeń pioruna jednym przewodem odgromowym. Kąt osłony (ochrony) przewodów fazowych wynosił 33° , podobnie jak w liniach niższych napięć, wyposażonych w słupy o wysokości 20 do 25 m. Stwierdzono, że w tej linii liczba zwarć doziemnych i wyłączeń podczas burz była znacznie większa od spodziewanej.

Pierwsze szczegółowe analizy, opublikowano pod koniec lat pięćdziesiątych rozpoczęły wieloletnią kampanię badawczą. Doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że awaryjność burzowa linii, zwłaszcza budowanych na wysokich słupach i na terenach o dużej aktywności burzowej jest ciągle większa od wyznaczonej wyrafinowanymi metodami analitycznymi.

Teorię ostatniego etapu rozwoju lidera kanału piorunowego, zmierzającego od chmury burzowej w kierunku linii napowietrznej rozwijali m. in. C. Wagner i A. Hileman. W 1963 r. F. Young i współautorzy opracowali model elektro-geometryczny (EGM) uderzenia pioruna w

linię napowietrzną [2]. Model ten uzupełniali i doskonalili liczni wybitni autorzy, m.in. H. Armstrong, E. Whitehead, C. Brown, John Andersona, R.B. Anderson, A. Eriksson, L. Delera i Faruk Rizk [4÷11].

Rewizja oceny parametrów pioruna

Po drugiej wojnie światowej sądzono, że parametry prądu pioruna są znacznie łagodniejsze, niż ocenia się to obecnie. W latach pięćdziesiątych w Stanach Zjednoczonych projektowano linie napowietrzne przyjmując, że mediana prądu pioruna doziemnego wynosi 15 kA.

W tym czasie podjęto w wielu krajach, w tym także w Polsce gruntowne badania piorunów, uderzających w linie elektryczne I w obiekty o wysokości do kilkudziesięciu m.

Stanisław Szpor był pierwszym badaczem, który wykazał, że mediana prądu typowego pioruna doziemnego wynosi około 30 kA. Był to wynik wieloletnich badań piorunów, uderzających w linie średnich napięć z przewodami, zawieszonymi na słupach drewnianych, wybudowane m. in. koło Pucka i w okolicach Inowrocławia. Wynik ten uzyskano, odczytując namagnesowanie pręcików stalowych, umieszczonych w rozmaitych odległościach od przewodu uziemiającego, prowadzącego prąd uderzenia pioruna wzdłuż słupa. Wyniki badań Szpora zostały uznane za pionierskie w skali światowej, po opublikowaniu ich w 1965 r. w Stanach Zjednoczonych w IEEE Transactions [3].

W 1972 r. Franciszek Popolanski zaproponował (na podstawie analiz własnych i innych rejestracji) przyjmowanie rozkładu parametrów prądu pioruna doziemnego o wartości średniej 25 kA

Badania Karla Bergera i współautorów, wykonane w Szwajcarii i opublikowane w periodyku Electra (nr 41, 1975) wykazały, że medianę rozkładu prądu pioruna doziemnego wynosi około 31 kA, a odchyleniem standardowym rozkładu 0,46. Wyniki K. Berger przyczyniły się do wprowadzenia w koordynacji izolacji wymienionych dwu parametrów rozkładu prądu pioruna.

W 1980 r. R.B. Anderson i A.J. Ericsson opublikowali ważne wyniki badań parametrów prądu pioruna, wykonane głównie w Afryce Południowej [4]. Wykazali oni, że rozkład prawdopodobieństwa, zarejestrowanych wartości szczytowej prądu pierwszego uderzenia typowego pioruna doziemnego (pierwsze wyładowanie od chmury do ziemi, biegunowości ujemnej) ma medianę $M = 31,1$ kA i odchylenie standardowe $\sigma = 0,484$.

Wyniki analiz i uogólnień, dokonane przez Johna Andersona, dotyczące parametrów prądu typowego pioruna doziemnego, zostały opublikowane w 1982 r w dokumencie „Transmission Line Reference Book – 345 kV and above” [5]. John Anderson wprowadził w ww. dokumencie nowe, zrewidowane wartości parametrów, charakteryzujących prąd pioruna doziemnego oraz podał uogólnione wnioski i zalecenia, dotyczące ochrony odgromowej.

Zależność opisująca rozkład prądu pioruna, zaproponowana przez Johna Andersena zyskała uznanie, dzięki swojej prostocie. Prawdopodobieństwo P , że prąd pioruna doziemnego i biegunowości ujemnej osiągnie w pierwszym uderzeniu wartość większą niż I jest opisane znaną zależnością

$$(1) \quad P(i \geq I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}}$$

W 1985 r opublikowano wyniki pierwszego etapu prac Grupy Roboczej IEEE [6], powołanej do rozwiązania omawianego zagadnienia. Członkami tej grupy było 18

wybitnych specjalistów z całego świata, wśród nich Stanisław Szpor z Politechniki Gdańskiej. W 1991 r został wydany przewodnik CIGRE, opracowany przez 17 autorów, poświęcony procedurze oceny odporności burzowej linii napowietrznych [8].

Wyniki analizowanych badań wykazały, że wartość średnia prądu typowych piorunów doziemnych jest około dwukrotnie większa niż sądzono uprzednio. Wykazano ponadto, że wyładowania doziemne mają w 90 % przypadków biegunowość ujemną i że składają się najczęściej z 3 uderzeń (rozładowujących chmurę burzową), następujących po sobie w odstępach czasu kilkudziesięciu do kilkuset milisekund.

W pracach z zakresu koordynacji izolacji przyjęto [6], zgodnie z wynikami badań zespołów K. Bergera, że czas trwania czoła typowego pioruna doziemnego w pierwszym uderzeniu wynosi około 5,5 μ s, a największa stromość narastania prądu czoła udaru około 25 kA/ μ s. Stromość taka występuje zwykle 1,5 do 1 μ s przed osiągnięciem wartości szczytowej przez udar prądu, który następnie zmniejsza swoją wartość do zera, podczas 80 do 100 μ s. Ładunek pierwszego uderzenia pioruna biegunowości ujemnej wynosi zwykle 4,5 do 5 kulombów [6, 8, 9].

W analizach przyjęto również, że typowe parametry kolejnych uderzeń pioruna są następujące: wartość szczytowa prądu wynosi 12 kA, czas narastania czoła, od 10% do 100% wartości szczytowej jest krótszy niż 1 μ s, największa stromość narastania prądu wynosi około 40 kA/ μ s, a czas opadania prądu do wartości zerowej jest bliski 30 μ s. Przenoszony ładunek drugiego i kolejnych uderzeń jest znacznie mniejszy niż pierwszego uderzeniu i wynosi zwykle około 0,9 kulomba (to znaczy 20 % ładunku pierwszego uderzenia) [8].

Uznano, że mediana prądów piorunów biegunowości dodatniej, uderzających stosunkowo rzadko (od kilku do 10% wyładowań doziemnych) wynosi około 40 kA. Prawdopodobieństwo wystąpienia prądu większego niż 200 kA jest w tych rzadkich wyładowaniach znaczne (osiąga około 5%) i jest 16 krotne większe, niż w przypadku wyładowań piorunowych biegunowości ujemnej (odpowiednio 0,3 %). Prawie wszystkie pioruny doziemne biegunowości dodatnie są piorunami jednokrotnego uderzenia, o stosunkowo dużym ładunku (mediana około 8 kulombów) [8].

Modele elektro-geometryczne (EGM)

Gdy lider kanału wyładowania odgórnego wędruje od chmury do ziemi, wówczas w kolejnym skoku jego czoło osiąga punkt zwrotny, decydujący o miejscu uderzenia w obiekt naziemny lub w ziemi. W analizach, wykonywanych według modelu elektro-geometrycznego przyjmuje się, że o miejscu uderzenia decyduje najmniejszą odstęp do jednego z trzech elementów, a mianowicie do: przewodu odgromowego, przewodu fazowego lub ziemi [6÷11]. Odstęp ten między punktu zwrotnym, a miejscem uderzenia pioruna, zwany odległością decyzji (striking distance) wynosi, według dawniejszych koncepcji modelu elektro-geometrycznego

$$(2) \quad r = AI^b$$

W zależności (2) A oraz b są stałymi, I jest prądem pioruna, w kA., gdy A jest w m. W obliczeniach, wykonywanych do lat osiemdziesiątych przyjmowano często wartość A od 8 do 10, a współczynnik b od 0,6 do 0,65. gdy $A = 8$ oraz $I = 31$ kA uzyskuje się $r = 93$ m, niezależnie od wysokości słupa i zawieszenia przewodów linii.

Model elektro-geometryczny był w latach 1963 ÷ 1995 stale modyfikowany. Po 1987 roku przyjmowano często, że odległość r zależy również od wysokości h_t obiektu (słupa linii), lub od średniej wysokości h zawieszenia przewodów [6÷11]. Zależności A. Erikssona (wzór 3) i F. Rizka (wzór 4) uwzględniają te wielkości następująco:

$$(3) \quad r = AI^b = 0,67h_t^{0,6}I^{0,74}$$

$$(4) \quad r = AI^b = 1,57h^{0,45}I^{0,6}$$

Jeśli przyjąć wysokości $h_t = 40$ m, $h = 36$ m i prąd pierwszego uderzenia pioruna $I = 31$ kA, wówczas uzyskuje się według Erikssona odległość $r = 77,8$ m, a według Rizka $r = 78,3$ m, a więc bardzo dobrą zgodność. W rozpatrywanym przypadku odległość r jest większa niż wysokość słupa h , ale mniejsza od wartości obliczonej wg zależności (2). Gdy wysokość $h = 0$, wówczas uzyskuje się $r = 0$, zgodnie z analizą w publikacji [9].

Zawodność osłonowa

Wskaźnik zawodności osłonowej przewodów odgromowych SFR (shielding failure rate), oznaczający liczbę uderzeń pioruna w przewód fazowy linii wynosi według zmodyfikowanego modelu elektro-geometrycznego [9]

$$(5) \quad SFR = 0,2N_g L \int_{I_{MIN}}^{I_{MAX}} D_c f(I) dI$$

przy czym: D_c - odległość pozioma rzutu przewodu odgromowego i fazowego (w m); N_g - liczba uderzeń pioruna doziemnego na km^2 w roku; L - długość linii, (w km); $f(I)dI$ - gęstość prawdopodobieństwa, że prąd pioruna jest większy od wybranej wartości szczytowa prądu I pierwszego uderzenia pioruna; I_{MIN} , I_{MAX} - najmniejsza i największa wartość prądu, który według przyjętego założenia może uderzyć w przewód fazowy.

Najmniejsza wartość prądu pioruna I_C , który uderzając w przewód fazowy linii o impedancji falowej układu przewodu-ziemia Z_C nie wywoła wyładowania zupełnego, może być obliczona z zależności

$$(6) \quad I_C = \frac{2U_{50}}{Z_C}$$

przy czym U_{50} jest 50 % napięciem przeskoku izolacji doziemnej linii.

Stąd wskaźnik wyładowań zupełnych na izolacji linii $SFFR$ (shielding failure flashover rate), wyznaczający liczbę uderzeń pioruna, które mogą spowodować zwarcie doziemne

$$(7) \quad SFFR = 2N_g L \int_{I_C}^{I_{MAX}} D_c f(I) dI$$

Wartość wskaźnika $SFFR$ jest równa zero, gdy $I_{MAX} \leq I_C$. Największy kąt osłony zewnętrznej α_s , spełniający ten warunek jest oznaczony symbolem α_p i nosi nazwę kąta skutecznej (perfect) osłony przewodu fazowego.

W 1990 roku Farouk Rizk (niezależnie od niego również inni autorzy) dokonał modyfikacji modelu elektro-geometrycznego [7, 10]. Uwzględniła ona występowanie wyładowań liderowych biegunowości dodatniej, startujących z uziemionego obiektu (np. słupa linii, lub przewodu odgromowego) oraz z przewodów fazowych linii), pod wpływem wzrostu natężenia pola elektrycznego, spowodowanego zbliżaniem się wyładowania odgromowego biegunowości ujemnej (wędrującego od chmury do ziemi). Kanały liderów dodatnich kierują się ku górze, na spotkanie wyładowania biegunowości ujemnej. Wyładowanie główne pioruna, rozładowujące chmurę burzową może nastąpić do przewodu odgromowego lub do przewodu fazowego po spotkaniu z kanałem oddolnym.

Zawodność osłonowa N_{SF} , charakteryzująca liczbę wyładowań pioruna do przewodu fazowego (a nie do przewodu odgromowego) wynosi w opisanych warunkach wg Rizka [7] (oznaczenia podano na rys. 1)

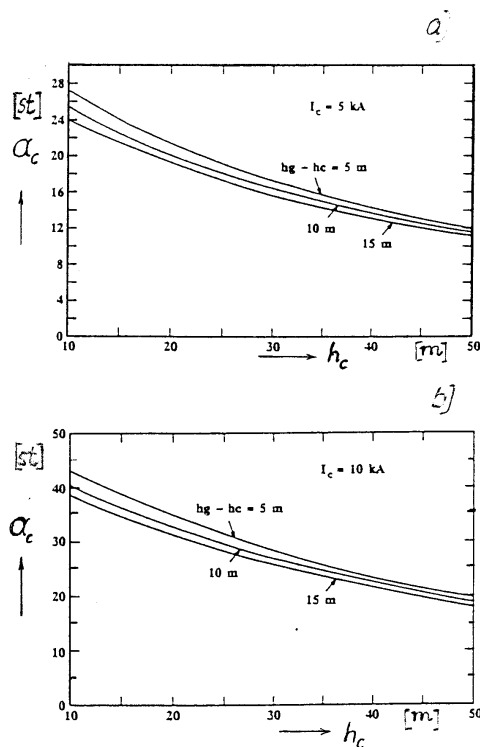
$$(8) \quad N_{SF} = N_g 10^{-3} \int_{I_C}^{I_{MAX}} Df(I) dI$$

przy czym odstęp

$$(9) \quad D = D_a(I_c, h_g) + D_c - D_a(I_c, h_c)$$

W zależnościach 8 i 9 symbol D_a oznacza odległość przyciągania kanału pioruna biegunowości ujemnej. Przyjmując $D = 0$ można obliczyć wartość odstępu przyciągania D_c . Stąd krytyczny kąt osłonowy

$$(10) \quad \alpha_c = \arctg \frac{D_c}{h_g - h_c} \equiv \text{inv} \tan \frac{D_c}{h_g - h_c}$$



Rys. 1. Zmiana krytycznej wartości kąta osłony zewnętrznej α_c przewodu odgromowego, w funkcji wysokości h_c zawieszenia przewodu fazowego pod przewodem odgromowym, umieszczonym na wysokości h_g , gdy prąd I_C jest równy 5 kA (a) oraz 10 kA (b), wg [7]

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki obliczeń wartości kąta α_C w funkcji:

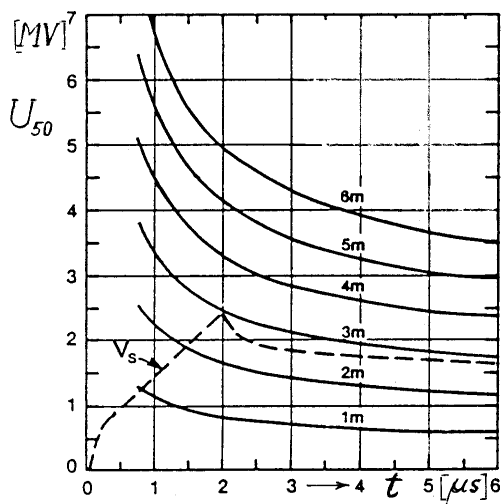
- średniej wysokości h_c zawieszenia przewodu fazowego,
- prądu I_C , wynoszącego 5 kA i 10 kA
- oraz 3 odstępów przewodów ($h_g - h_c$) (5 m, 10 m i 15 m).

Rezystancja uziemienia słupa

W poprzedniej publikacji [18] wyznaczono krytyczną rezystancję R_{KS} uziemienia słupa linii, warunkującą uniknięcie przeskoku odwrotnego na łańcuchu izolatorów w przypadku uderzenia pioruna w przewód odgromowy. Wyrażenie opisujące tę rezystancję ma postać

$$(11) \quad R_{KS} = \frac{U_{10} - U_m \sqrt{2/3} - L_S \frac{di_s}{dt} \left(\frac{h_i}{h_s} - k_o \right)}{i_s (1 - k_o)}$$

W zależności (11) U_{10} i U_m oznaczają 10% napięcie wyładowania zupełnego i najwyższe napięcie sieci; L_S jest indukcyjnością słupa; I_S jest wartością szczytową prądu w słupie; h_i , h_s są wysokością słupa i wysokością zawieszenia przewodu fazowego; k_o jest współczynnikiem sprzężenia układów przewodu odgromowy-ziemia oraz przewód fazowy-ziemia.



Rys. 2. Typowa charakterystyka napięciowo-czasowa biegunowości dodatniej izolatorów oraz kształt napięcia V_s na łańcuchu izolatora wg [8]

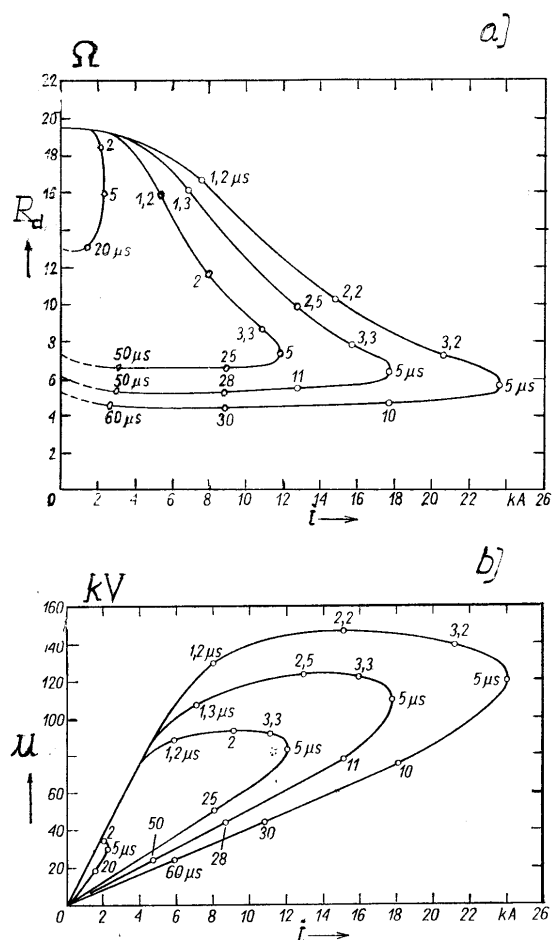
Grupa robocza CIGRE zaproponowała w publikacji [8] wyznaczania wytrzymałości udarowej łańcucha izolatorów V_{FO} według zależności, opracowanej przez M. Darvenizę i współautorów. Uwzględniono charakterystykę napięciowo-czasową łańcuchów izolatorów o długości od 1 do 6 m, wyznaczoną udarami piorunowymi normalnymi (1,2/50 μs) i przedstawioną na wykresach na rys. 2, w funkcji czasu do przeskoku t . Według autorów tę charakterystykę można stosować do oceny wytrzymałości izolacji linii podczas przepływu prądu pioruna przez słup do ziemi. Kształt napięcia V_s na okuciach izolatora, (wynikający ze spadku napięcia na rezystancji uziemienia słupa i na impedancji konstrukcji wsporczej słupa a także z oddziaływania fal napięcia, odbitych od sąsiednich słupów) pokazano w dolnej części rysunku. Wyładowanie zupełne nie nastąpi,

jeśli wytrzymałość udarowa $V_{FO}(t)$ łańcucha izolatorów o długości W jest większa od wartości szczytowej napięcia V_s . Napięcia $V_{FO}(t)$ [kV] w funkcji czasu do przeskoku t [μs], gdy $W \geq 1m$, opisuje zależność [8]

$$(12) \quad V_{FO} = 400 + \frac{710}{t^{0,75}} W$$

Napięcie $V_{FO}(t)$ może zastępować w zależności (11) napięcie U_{10} .

Z analizy zależności (11) wynika, że w linii napowietrznej najbardziej narażony na przeskok jest izolator najdalej odsunięty od przewodu odgromowego, to znaczy izolator fazy umieszczonej najbliżej ziemi (sprężenie z przewodem odgromowym k_o , zmniejszające wartość napięcia na łańcuchu izolatorów jest wówczas najmniejsze). Z tych względów ograniczniki przepięć do ochrony izolacji linii, (jeśli są stosowane) powinny chronić izolację przewodu najniżej zawieszoną.



Rys. 3. Zmiany dynamiczne (chwilowe) rezystancji uziemienia R_d żelazo-betonowego ustaju fundamentowego słupa linii napowietrznej (a) oraz napięcie u na ustaju fundamentowym (b), w funkcji wartości szczytowej prądu piorunowego i oraz czasu jego przepływu, według badań eksperymentalnych [18, 19], wykonanych w Zakładzie Wysokich Napięć IEn

Rezystancja uziemienia słupa R_{KS} , podana w zależności (11) jest rezystancją udarową, to znaczy występującą podczas odprowadzania prądu pioruna przez uziomy słupa linii. Na rysunku 3 pokazano zmiany rezystancji udarowej R_U oraz kształt pętlic $u = f(i)$ typowego ustaju fundamentowego (stopy żelazo-betonowej), wyznaczone podczas badań eksperymentalnych w Zakładzie Wysokich

Napięć Instytutu Energetyki [19, 20]. Badania wykonano prądami udarowymi o wartości szczytowej zwiększanej do około 26 kA (prąd pojedynczej stopy fundamentowej) i o czasie trwania czoła od kilku do 10 μ s. Odpowiada to prądowi 100 kA, płynącemu przez 4 stopy fundamentowe, połączone równolegle przez konstrukcję wsporczą słupa. Z badań wynika, że udarowa rezystancja uziemienia stopy maleje po około 5 μ s do połowy wartości rezystancji, mierzonej prądem przemiennym o małej amplitudzie. Podobną redukcję udarowej impedancji uziemienia uzyskano w badaniach, cytowanych w publikacji [6]. Badano uziomy o kształcie półkuli (prąd udarowy około 1,5 kA i czas trwania czoła 8 μ s) oraz uziomy wykonane z typowego płaskownika o długości 18 m, ułożonego poziomo w gruncie (prąd udarowy około 4 kA, czas trwania czoła udaru 4 μ s).

Wskazówki koordynacji izolacji

Zakład Wysokich Napięć Instytutu Energetyki zajmuje się profesjonalnie zagadnieniami koordynacji izolacji sieci wysokich i niskich napięć od 45 lat. W ramach tych prac przygotowano m. in. wytyczne doboru i koordynacji izolacji pierwszych, budowanych w Polsce układów sieci przesyłowych 400 kV i 750 kV. Wyniki omówiono w publikacjach, m.in. [16÷25]. W tym zakresie jest prowadzona ścisła współpraca z innymi ośrodkami, np. z Biurem Studiów i Projektów „Energoprojekt” w Krakowie.

W ramach tej aktywności, opartej również o współpracę ze specjalistami z Polskich Sieci Elektroenergetycznych oraz PTPIREE w Zakładzie Wysokich Napięć opracowano, w latach 1997-1998 „Wskazówki Koordynacji Izolacji Sieci o Napięciu Znamionowym do 110 kV” [29] (w tym sieci niskich napięć) oraz oddzielnie „Wskazówki Koordynacji Izolacji Sieci Przesyłowych” [30] o napięciu od 220 kV do 750 kV łącznie. W wymienionych dokumentach podano, wśród rozmaitych szczegółowych wymagań koordynacji izolacji linii, stacji i sieci, zalecenia i wytyczne, odnoszące się do linii napowietrznych 110 kV, 220 kV, 400 kV i 750 kV, w których stosuje się przewody odgromowe.

Wytyczne dotyczyły m. in. sposobów ochrony stacji i linii od bezpośrednich uderzeń pioruna, kątów osłonowych (ochrony zewnętrznej α oraz wewnętrznej β) przewodów fazowych za pomocą przewodów odgromowych, sposobów łączenia przewodów odgromowych z uziemieniami linii i stacji, a także rezystancji uziemienia konstrukcji wsporczych, w tym słupów linii napowietrznych. Wartości liczbowe, podane w tych dokumentach zostały ustalone na podstawie szczegółowych badań eksperymentalnych Zakładu Wysokich Napięć, a także analizy doświadczeń zagranicznych. Korzystano również z wyników badań wielu ośrodków np. w Kanadzie. Uwzględniono fakt, że w Polsce nie buduje się w zasadzie linii na słupach o bardzo dużej wysokości.

W opracowanych „Wskazówkach...” [29, 30] podano m.in. następujące wymagania, dotyczące kątów osłony α i β przewodów odgromowych, mierzonych podczas bezwietrznej pogody. Kąt osłony zewnętrznej α nie powinien być w tych warunkach większy niż

- 30° w liniach o napięciu znamionowym 110 kV,
- 20° w liniach wyższych napięć (220 kV, 400 kV, 750 kV).

Natomiast kąt osłony wewnętrznej β , nie powinien być większy (podczas bezwietrznej pogody) niż:

- 60° w liniach o napięciu znamionowym 110 kV,
- 45° w liniach wyższych napięć (220 kV, 400 kV, 750 kV).

Zalecono uziemiać przewody odgromowe na każdym słupie. Przekrój (i konstrukcja) tych przewodów powinna być dostosowane do prądów i innych warunków

zwarciovych. Ustalono, że stalowe przewody odgromowe nie powinien mieć przekrój mniejszy niż 50 mm².

Odstęp d_r między przewodem fazowym, a przewodem odgromowym, mierzony w środku przęsła w temperaturze 10° C powinien być tak dobrany, aby nie był mniejszy od 15% rozpiętości przęsła. Niezależnie od tego warunku odstęp ten powinien spełniać wymagania normy PN/E-05100.

We Wskazówkach [29, 30] podano także szczegółowe wymagania dotyczące:

- ochrony przęseł specjalnych,
 - odstępstw od wymagań ochrony przęseł specjalnych, gdy stosuje się w liniach ograniczniki tlenkowe,
 - ochrony stacji od bezpośrednich uderzeń pioruna.
- Szczególną uwagę we Wskazówkach [29, 30] poświęcono uziemieniom. Na podstawie wieloletnich doświadczeń własnych i analizy wyników, uzyskanych w innych ośrodkach ustalono, że:
- największą dopuszczalną wartość rezystancję uziemienia słupów linii, budowanych w Polsce należy uzależnić od napięcia znamionowego linii,
 - nie powinna ona być większa niż 10 Ω w linach 110 kV,
 - w liniach 220 kV i 400 kV rezystancja uziemienia konstrukcji wsporczych nie powinna natomiast być większa niż 15 Ω .
 - Podane wartości odnoszą się do pomiarów, wykonywanym prądem przemiennym o umiarkowanej częstotliwości i natężeniu,
 - Gdy rezystywność gruntu jest większa niż 1000 Ω m, wówczas dopuszczono zwiększenie podanych wyżej wartości rezystancji uziemienia o 5 Ω ,

Podsumowanie i wnioski

- Zagadnienia ochrony linii napowietrznych przewodami odgromowymi od skutków uderzeń pioruna, analizowane od ponad 40 lat okazały się zagadnieniami bardzo trudnymi. Uważa się, że problemy te nie są dotychczas w pełni rozwiązane, pomimo aktywności wybitnych specjalistów o renomie światowej. Artykuł przedstawia główne osiągnięcia wieloletnich prac w tej dziedzinie oraz rozwiązania przyjęte i wprowadzane od kilku lat w Polsce.
- Analizy dotyczące skuteczności osłony przewodów fazowych linii od bezpośrednich uderzeń pioruna oraz warunków uniknięcia przeskoków odwrotnych (od konstrukcji wsporczych uderzonego słupa do przewodów fazowych) opierają się o stale doskonalone modele elektro-geometryczny (EGM), których podstawy opracowano w początkowych latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia. Modele te są nadal doskonalone
- Typowy prąd pioruna doziemnego, uderzającego w obiekty o wysokości do kilkudziesięciu m ma biegunowość ujemną (w 90% przypadków) i składa się najczęściej z 3 uderzeń, następujących zwykle po sobie co kilkadziesiąt milisekund. Parametry pierwszego uderzenia, takie jak wartość szczytowa prądu oraz ładunek przenoszony są znacznie większe, niż w kolejnych uderzeniach.
- Profesor Stanisław Szpor był pierwszym badaczem, który wykazał, że mediana wartości szczytowej typowych prądów pioruna, uderzających w linie napowietrzne jest dwukrotnie wyższa niż przyjmowano uprzednio i wynosi około 30 kA.
- John Anderson wprowadził formułę (1), opisującą rozkład prawdopodobieństwa prądów piorunów doziemnych biegunowości ujemnej. Według niej prawdopodobieństwo prądu pioruna o wartości szczytowej większej niż 31 kA wynosi 50 %.

- Modele elektro-geometryczne, opracowane w ostatnich latach m.in. przez Farouka Rizka i A. Erikssona uwzględniają zarówno wpływ wartości prądu pioruna jak i wpływ wysokości zawieszenia przewodów odgromowych i roboczych na skuteczność osłonową linii przesyłowych.
- Uzpełnieniem ochronnych właściwości przewodów odgromowych jest instalowanie tlenkowych ograniczników przepięć na słupach liniowych. Ograniczniki te powinny być umieszczane w taki sposób, aby chronić izolację fazy najdalej oddalonej od przewodu odgromowego, to znaczy powinny chronić przewód fazowy, najniżej zawieszony.
- W artykule przedstawiono podstawowe wymagania ochrony odgromowej linii 110 kV i wyższych napięć znamionowych, podane we Wskazówkach Koordynacji Izolacji, opracowanych w Zakładzie Wysokich Napięć IEn [29, 30].

LITERATURA

- [1] Price W., Bartlett S., Zobel E.: Lightning and corona performance of 330 kV Lines of AGE-OVE Systems. *IEEE Trans.*, pt.III, 1956, pp. 583 - 597.
- [2] Young F., Clayton J., Hileman A.: Shielding of transmission lines. *IEEE Trans. On PAS*, 1963, pp.132 - 154.
- [3] Szpor S.: Comparison of Polish versus American lightning records. *IEEE Trans. on PAS*, 1969, pp.646 - 652.
- [4] Anderson R.B., Eriksson A.J.: Lightning parameters for engineering application. *Electra*, 1980, n. 69, s. 65 - 102.
- [5] Anderson J.G.: Lightning performance of transmission lines. *Transmission line reference book, Chapter 12*, EPRI, Palo Alto, 1982
- [6] A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines - IEEE W.G. Report. *IEEE Trans. on PAS*, 1985, pp. 919 - 932.
- [7] Rizk Faruk A.M.: Modelling of transmission line exposure to direct lightning strokes. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1990, pp. 1983 - 1997.
- [8] CIGRE Guide to procedures for estimating lightning performance of transmission lines. *CIGRE Publ. 63*, Oct. 1991.
- [9] Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II. IEEE W.G. Report. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1993, pp. 1254 - 1267.
- [10] Rizk Faruk A.M.: Modelling of lightning incidence to tall structures. Part I: Theory. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1994, pp. 162 - 171
- [11] Rizk Faruk A.M.: Modelling of lightning Incidence to tall structures. Part II: Application and Discussion. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1994, pp. 172 - 183.
- [12] CIGRE Working Group 33.01: Characterization of Lightning - for application in electric power systems. *Brochure CIGRE 172*, 2000.
- [13] Dąbrowski J., Jaworski A., Jaczewski M. i inni: On site testing of the first 750 kV insulation system in Poland. *CIGRE*, 1986, rep.33 - 07
- [14] Borzycki K., Mikulski J.L.: Budowa, wymagania i badania przewodów odgromowych z włóknami światłowodowymi dla linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia. *Monografia. Instytutu Energetyki*, Warszawa, 2001.
- [15] Koształuk R.: Anderson E.: Izolowanie przewodów odgromowych linii wysokich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1962, nr10, s. 419 - 424.
- [16] Koształuk R.: Skuteczność układu dławikowego Szpora do ochrony rozdzielni 15 kV do 110 kV. *Przegląd Elektrotechniczny* 1967, nr 7, s. 286-290.
- [17] Koształuk R.: Contribution to the Theory of Choke Coil Protection Systems. *Archiwum Elektrotechniki*, 1971, nr 4, s. 857 - 872.
- [18] Koształuk R., Mikulski J., Dąbrowski J.: Rola i zadania przewodów odgromowych. *NIWE'2003*, VII Konferencja. Szklarska poręba. *Energetyka (zeszyt spec.) I/2003*, s.76 - 81.
- [19] Koształuk R.: Zjawiska w betonie i gruncie wywołane przepływem prądów piorunowych i zwarciowych przez fundamenty słupów linii przesyłowych. *Archiwum Elektrotechniki*, 1976, nr 1, s. 95 - 108.
- [20] Koształuk R., Maksymiuk J., Ciok Z. i in.: Technika badań wysokonapięciowych. *WNT*, tom I, 1985; tom II, 1985.
- [21] Koształuk R.: Koncepcja koordynacji izolacji układu przesyłowego 750 kV. *Archiwum Elektrotechniki*, 1976, nr 1, s. 3 - 12.
- [22] Koształuk R., Malewski R., Menemenlis C.: Effect of Time Shift between the Voltage Components on Phase-to-Phase Insulations Strength. *IEEE Trans. on PAS*, 1981, no 2, p. 3379 - 3387,
- [23] Koształuk R., Flisowski Z.: Koordynacja izolacji polskich sieci wysokich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2, 1998, s. 40 - 45.
- [24] Koształuk R., Flisowski Z.: Dobór odgromników do pracy w sieciach elektrycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5, 1998, s. 118 - 122.
- [25] Koształuk R., Malewski R.: Koordynacja izolacji sieci wysokich napięć. *Artykuł w Monografia dla uczczenia pamięci Stanisława Szpora*. Politechnika Gdańska, 1999.
- [26] Koształuk R., Malewski R.: Koordynacja izolacji sieci rozdzielczych. *NIWE 2000*. VI Konferencja, Bielsko-Biała, s. 263 - 271.
- [27] Koształuk R., Flisowski Z.: Ekspansja tlenkowych ograniczników przepięć w sieciach elektrycznych. *EUI 2001*. VIII Sympozjum, Zakopane, s. 279 - 285.
- [28] Koształuk R., Łoboda M., Flisowski Z., Marciniak R., Mikulski J.: Deep Earthing Rods in Lightning Protection Systems. *Int. Conf. on Lightning Protection Systems*, Cracow, sept.2002, rap. 5.3.
- [29] Koształuk R., Mikulski J.: Wskazówki Koordynacji Izolacji i Ochrony od Przepięć Sieci o Napięciu Znamionowym do 110 kV. *Instytut Energetyki*, Warszawa, 1998.
- [30] Koształuk R., Mikulski J.: Wskazówki Koordynacji Izolacji Sieci Przesyłowych. *Instytut Energetyki*, Warszawa, 1998.

Autorzy: Romuald Koształuk, Janusz Mikulski, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: lech.mikulski@ien.com.pl
 Jerzy Dąbrowski, Doradztwo techniczne, E-mail: jurek.dabrowski@pro.onet.pl