ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: ELEKTRYKA z. 76

Nr kol. 689

1981

Jerzy MACEłKO, Janusz ZIARNIK Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej

OCENA SKUTECZNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ LINII NAPOWIETRZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA METODĄ ANALITYCZNĄ

> Streszozenie. W artykule przedstawiono zasady obliozania wskaźników odporności burzowej linii napowietrznej za pomocą analitycznej metody całkowania, w której wykorzystuje się model elektrogeometryczny uderzenia pioruna w przewody linii. Omówiono założenia do obliczeń oraz wyniki obliczeń liczby piorunów uderzających w przewody linii i liczby wyłączeń burzowych linii 110, 220 i 400 kV.

1. WPROWADZENIE

Bezpośrednie badanie stref osłonowych przewodów odgromowych jest pracochłonne i długotrwałe, dlatego opracowano w ostatnich latach nowe metody, wykorzystujące możliwości techniki cyfrowej, które mogą służyć do określania rozmieszczenia przewodów w linii.

W Polsce stosunkowo niedawno pojawiły się pierwsze publikacje na temat zastosowania metody modelowania statystycznego do oceny skuteczności ochrony odgromowej linii napowietrznych [1,2]. Metoda analityczna całkowania,w której liczby piorunów uderzających w przewody linii oraz liczby przeskoków na izolacji linii przy uderzeniach piorunów w przewody robocze oblioza się w oparciu o wzory (1) i (2), jest bardziej przydatna do zastosowań praktycznych ze względu na wielokrotnie krótszy ozas obliczeń maszynowych. Inspiratorem prac wykonywanych w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów na przedstawiony temat jest BSiPE "Energoprojekt" Kraków, gdzie wymienione metody zostaną wdrożone do projektowania nowych konstrukcji wsporczych.

2. MODEL ELEKTROGEOMETRYCZNY WYBORU MIEJSCA UDERZENIE PIORUNA W LINIE NAPOWIETRZNA

Wyładowanie piorunowe w linię napowietrzną rozpatruje się jako doziemne, złożone z wyładowania wstępnego (lider) i głównego. Odległość od punktu, w którym lider decyduje się na miejsce uderzenia, do punktu uderzenia pioruna, nazywa się odległością decyzji.

Ogólnio przyjętym modelem wyboru miejsca uderzenia pioruna jest model elektrogeometryczny. Do oceny skuteczności ochrony odgromowej linii napowietrznej stosuje się model dwuwymiarowy. Fragment takiego modelu,dla symetrycznej linii jednotorowej, przedstawia rys. 1. Oparty on jest na sformulowanych poniżej założeniach [3,5].



Rys. 1. Fragment modelu elektrogeometrycznego dwuwymiarowego,symctrycznej linii napowietrznej jednotorowej

- a) Przewody linii reprezentowane są przez punkty o współrzędnych odpowiadających ich średniej wysokości nad powierzchnią ziemi w warunkach burzowych.
- b) Drogę podejścia lidera zastępuje prosta przechodząca przez powierzchnię ziemi w miejscu okroślonym współrzędną z nachyloną względem pionu pod kątem podejścia V.
- c) Rozkład punktów uderzenia piorunów w płaską powierzchnię z'emijest równomierny.
- d) kąty podejścia przyjmują wartości z przedziału 🐇 + 🐇
- e) Odległość decyzji R wyraża się deterministyczną zależnością od amplitudy prądu wyładowania głównego pioruna I, jednakową dla przewodów roboczych i odgromowych linii napowietrznej oraz dla powierzchni ziemi.
- f) W odległości decyzji od elementów układu prowadzi się w przestrzeni powierzchnie decyzji, które w modelu dw.wymiarowym reprezentują luki,zakreślane wokół przewodów oraz odcinki prostej równoległej do powierzchni ziemi.

Ocena skuteczności ochrony odgromowej....

- g) Lider schodzący wzdłuż prostej podejścia uderzy w ten element układu, którego powierzchnię decyzji osiągnął najwoześniej.
- h) Uderzenie następuje pod kątem θ względem poziomu zwanym dalej kątem uderzenia pioruna.

3. OBLICZANIE LICZBY UDERZĘŃ PIORUNÓW I LICZBY PRZESKOKÓW NA IZOLACJI LINII METODĄ CAŁKOWANIA

Zgodnie z przedstawionym modelem elektrogeometrycznym przestrzeń wokół linii napowietrznej można podzielić na obszary decyzji uderzenia w poszozególne elementy układu. W modelu dwuwymiarowym przedstawionym na rys. 1 obszary te oddzielone są od siebie symetralnymi i odcinków łączących przewody robocze: skrajny p.r.1 i środkowy p.r.2 z odgromowym p.o. oraz parabolami $P_1 \quad P_2$, których kierownicą jest powierzchnia zicmi a ogniskami odpowiednio przewód roboczy skrajny i odgromowy. Pioruny orientujące się nad symetralnymi S₁, i parabolą P_2 uderzają w przewód odgromowy, orientujące się między symetralną i parabolą P_1 uderzają w przewód roboczy skrajny, poniżej symetralnej – w przewód roboczy środkowy, natomiast poniżej parabol P_1 i P_2 – w powierzchnię ziemi.

Przyjmując, że kąt powstały przez obrót w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara jest kątem dodatnim, wzór na liczbę N_i piorunów uderzających w i-ty przewód linii napowietrznej dla modelu dwuwymiarowego można zapisać w postaci [3,10]:

$$I_{i} = N_{o} 10^{-1} \int_{I_{pmin}}^{I_{pi} \max} f(I_{p}) R I_{\theta i} dI_{p}, \frac{1}{100 \text{ km a}}, \quad (1)$$

gdzie:

$$\mathbf{I}_{\Theta \mathbf{i}} = \int_{\Theta_{\mathbf{1}\mathbf{i}}}^{\Theta_{\mathbf{2}\mathbf{i}}} \int_{\Psi_{\mathbf{1}\mathbf{i}}}^{\Psi_{\mathbf{2}\mathbf{i}}} \mathbf{f}(\Psi) \frac{\sin(\Theta - \Psi)}{\cos \Psi} \, d\Psi \, d\Theta \,, \qquad (2)$$

No	- gęstość uderzeń piorunów w powierzchnię ziemi, 1/2, km²a
f(I_)	- funkoja gęstości rozkładu amplitudy prądu wyładowania
	głównego piorunów uderzających w powierzchnię ziemi
	na równinie,
f(V)	- funkoja gęstości rozkładu kąta podejścia lidera,
R	- odległość decyzji zależna od prądu pioruna I _p , m,
I _{pmin} , I _{pi max}	- wartości graniczne amplitudy prądu piorunów mogących
	uderzyć w i-ty przewód, kA,
⁰ 11' ⁰ 21	- kąty graniczne uderzenia pioruna w i-ty przewód, za-
	ležne od amplitudy prądu I, rad,

θ₁₁, θ₂₁ - kąty graniczne obszaru podejścia lidera na odległość decyzji do i-tego przewdu, zależne od kąta θ, rad.

Vartość minimalna amplitudy prądu pioruna I_{pmin}, będąca dolną granicą całkowania we wzorze (1), której odpowiada minimalna odległość decyzji R_{min} jest najmniejszą wartością rejestrowaną I_{pmin} = 2 kA.

Wartość maksymalna amplitudy prądu pioruna I stanowiąca górną granicę oałkowania we wzorze (1), dla przewodu nieosłoniętego jest przyjętą największą wartością amplitudy prądu, pioruna której przekroczenie jest mało prawdopodobna. Zwykle I pmax = 500 kA.

Dla przewodu osłoniętego wartość maksymalna amplitudy prądu pioruna odpowiada maksymalnej odległości decyzji z obszaru decyzji do tego przewodu, R_{i max}

Kąty graniczne uderzenia pioruna w przewód dla linii 110 400 kV mogą być wyrażone w funkcji wysokości przewodu nad powierzchnią ziemi lub jego położeniem względem pozostałych przewodów linii. Są one przedstawione na rys. 2 dla układu dwóch przewodów, w którym odległość Y_{P1} od powierzchni ziemi niżej zawieszonego przewodu oraz odległość między przewodami l₁₂ są mniejsze od podwojonej odległości decyzji.



Rys. 2. Kąty graniczne, obszarów uderzenia piorunów dla układu dwóch przewodów i powierzchni ziemi

Na lukach deoyzji zakreślanych wokół przewodów mogą występować oztery charakterystyczne strefy. Są one przedstawione na rys. 3 dla uderzeń z prawej strony w przewód p1 osłaniany przewodami p2'i p2". Strefy te oddzielane są od siebie kątami: 0'- kąt określony styczną S' do łuków decyzji przewodów p1 i p2' zachodzi:

$$\theta = 0$$

(3a)

Rys. 3. Charakterystyczne strefy łuków dacyzji dla piorunów uderza jących w przewód osłaniany

8" - kąt określany prostą poziomą S", styczną do łuku decyzji przewodu p2", zachodzi:

$$\theta^{n} = - \arctan \sin \left(\frac{Y_{p^{2,n}} - Y_{p^{1}}}{R} + 1 \right).$$
 (3b)

Dla łuków decyzji zachodzi:

(4a)w strefach I i II ¥2 =0 $\psi_1 = -\frac{3}{2}$

- w strefach II i III

Rys. 4. Kąty graniczne obszaru podejścia lidera na odległość decyzji do przewodu oslanianego

W pozostałych przypadkach kąty graniozne obszarów podejścia lidera na odległość decyzji określone są przez proste P styozne do łuków decyzji sąsiednich przewodów osłania jących, co pokazuje rys. 4. Przyrównujao zależność na odległość przewodu oslaniającego od prostej P do odległości decyzji, otrzymuje się wzór na współczynnik kątowy tej prostej

$$= \frac{-X_2Y_2 - R\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 - R^2}}{R^2 - X_2^2}$$
(5)

(4b)

gdzie:

X₂,Y₂ - współrzędne przewodu osłaniającego w układzie OXY,którego poozątek jest umieszczony w rozpatrywanym punkcie łuku decyzji.

W powyższym wzorze przy obliczaniu dolnego kąta granicznego V_1 występuje przed pierwiastkiem znak minus, natomiast przy obliczaniu górnego kąta granicznego V_2 – znak plus. Kąty te oblicza się ze wzoru:

$$\Psi = \operatorname{arotg} m - \frac{3}{2} \quad \operatorname{gdy} m > 0, \quad (6a)$$

$$v = \operatorname{arc} \operatorname{tg} m + \frac{\pi}{2} \quad \operatorname{gdy} m \leq 0.$$
 (6b)

Wzory (1) i (2) pozwalają także obliczyć liczbę przeskoków na izolacji linii, przy uderzeniach piorunów w przewody robocze. W tym celu dla przewodów roboczych należy we wzorze (1), jako dolną granicę całkowania przyjąć krytyczny prąd pioruna potrzebny do wywołania przeskoku:

$$I_{kr} = \frac{2U_{50\%}}{Z_{fr}},$$
 (7)

gdzie:

U_{50%} - 50-procentowe napięcie przeskoku układu izolacyjnego na słupie, 2. – impedancja falowa przewodu roboczego z uwzględnieniem ulotu.

4. ZAGADNIENIA DOBORU OBLICZENIOWYCH PARAMETRÓW PIORUNA

Przedstawiony model elektrogeometryczny uderzenia pioruna w linię napowietrzną jest modelem uproszczonym, ponadto znajomość parametrów pioruna jest dotychczas niewystarczająca. Powoduje to konieczność doboru parametrów wykorzystywanych w modelu w oparciu o wariantowe obliczenia i porównywania ich wyników z danymi eksploatacyjnymi. Materiał porównawozy dotyozy głównie liczby zakłóceń w pracy linii, spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi, jest jednak dość ubogi i niepewny.

4.1. Zalożenia do obliozeń

Dla trzech linii wysokiego napięcia: 110, 220 i 400 kV o parametrach podanych w tablicy 1 obliczono prawdopodobieństwa uderzenia pioruna w przewody robocze oraz liczby wyłączeń burzowych na 100 km i rok, przyjmując gęstość uderzeń pioruna średnią dla terenu Polski równą $2\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix}$.

Liczby piorunów uderzających w przewody linii oraz liczby przeskoków przy uderzeniach w przewody robocze obliczono metodą całkowania wg wzorów (1) i (2). Impedancję falową przewodu roboczego obliczono wg zależności podanych w [4]. Liczby przeskoków odwrotnych obliczono metodą radziecką,

96

Ocena skuteczności ochrony odgromowej....

Tablica 1

U _N	, kV	110	220	400
Typ konstrukcji wsporczej		Ао	П	F
Kąt osłony na słupie, ^O		14	18	22
Wysokość słupa, m		20,35	28,8	31
Dopuszczalna statyczna rezystancja uziemienia,		10	15	15
P _u , %	wg metody calkowania	0,075	0,452	1,291
	WG (19)	0,078	0,218	0,482
n _w , <u>1</u> 100 km a	wg prac [11, 12]	2,491)	0,635	0,22)

Dane konstrukcyjne oraz wskaźniki odporności burzowej linii napowietrznych wysokiego napięcia

1) Liczba wyłączeń burzowych linii 110 kV na słupach stalowych o kącie osłony $\leq 30^{\circ}$

2) Oszacowana liczba wyłączeń linii 400 kV na skutek przeskoków na izolaoji.

wykorzystującą tzw. krzywe niebezpiecznych parametrów [4]. Obliczenia wykonano wariantowo dla mogących realnie wystąpić kombinacji podanych poniżej obliczeniowych parametrów pioruna.

a. Rozkłady amplitudy prądu pioruna, I [kA]:

- międzynarodowy, wg Szpora, opisany funkcją 6 :

$$P(\tau_p) = \frac{1810}{\Gamma_p^{2,205} + 1810},$$
 (8)

- radziecki, wg Rukowodiaszczich Ukazanij, opisany funkcją [9]:

$$P(I_{p}) = \exp(-0,0385 I_{p}), \qquad (9)$$

- dla terenu Polski, wg Popolańskiego, logarytmonormalny o parametrach [7]:

$$I_{p50\%} = 25 \text{ kA}, \quad 6 = \ln \frac{I_{p50\%}}{I_{016\%}} = 0,97,$$
 (10)

gdzie:

Ip50%, 1p16 - kwantyle rozkładu prądu pioruna.

- b. Rozkłady stromości prądu pioruna, S $\left[\frac{kA}{H}\right]$:
- międzynarodowy, wg Szpora, opisany funkcją [6]:

$$P(s) = \frac{1140000}{s^{3},7 + 1660000},$$
 (11)

- z pomiarów szwajcarskich wg Burgsdorfa, opisany funkcjami [9] :

$$P(S) = 1-0,02 S, dla S \leq 12 \frac{kA}{H_S},$$
 (12a)

$$P(S) = \exp[-0, 1532(S-10)], dla S > 12 \frac{kA}{U_8}$$
 (12b)

o. Rozkład kąta podejścia lidera, ∀[rad] : cosinusowy, o funkcji gęstości w postaci [3]:

$$f(\Psi) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \Psi$$
, dla $|\Psi| \leq \frac{\pi}{2}$, (1)a)

$$f(\Psi) = 0,$$
 dla $|\Psi| > \frac{\pi}{2}.$ (13b)

d. Odległość decyzji, R[m], zaczerpnięte z prac [3,5,1], wg autorów:

- Wagner $R = 10,6 I_p^{0,51}$, (14)

- Golde
$$R = 3,3 I_p^{0,78}$$
, (15)

- Sargent $R = 3 I_{p}$ (16)

- Whitehead
$$R = 2I_p + 30 \left[1 - \exp(-\frac{I_p}{6,8}) \right],$$
 (17)

- Stružewski
$$R = I_p + 30 \left[1 - exp(-\frac{1}{13.6})\right].$$
 (18)

W powyższych wzorach prąd pioruna I należy wyrazić w kA. W obliczeniach założono brak korelacji między rozkładami prądu pioruna i jego stromości [9].

4.2. Weryfikacja wyników obliczeń

Dokonano następujących porównań obliczonych wskaźników odporności burzowaj linii:

- prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w przewody robocze P_u (wyrażone w procentach) porównano z obliczonym wg empirycznego wzoru [8]:

$$\log P_{u} = \frac{\alpha \sqrt{h_{s1}}}{75} - 1,95, \qquad (19)$$

gdzie:

C - kat oslony na slupie, °,

hal - wysokość słupa, m.

 liczbę wyłączeń burzowych na 100 km i rok, u porównano z danymi eksploatacyjnymi [12, 13].

Z przeprowadzonego porównania wynika, że ze wzrostem napięcia znamionowego linii, tj. ze wzrostem odległości między przewodami w modelu elektrogeometrycznym:

- prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w przewody robocze, obliczone dla różnych kombinacji parametrów pioruna, rośnie szybciej niż wg zależności (19),
- liczby wyłączeń burzowych linii, obliczone dla tych kombinacji, maleją wolniej, niż to wynika z danych eksploatacyjnych.

Najlepszą zgodność porównywanych wskaźników odporności burzowej dla różnych linii uzyskano przy zastosowaniu następujących parametrów:

- zależności Whiteheada na odległość decyzji;
- rozkładu radzieckiego amplitudy prądu pioruna do obliczenia liczby piorunów uderzających w przewody oraz liczby przeskoków przy uderzeniach w przewody robocze, przyjętego dla uderzeń w powierzchnię ziemi na równinie;
- rozkładu Popolańskiego amplitudy prądu pioruna do obliczenia liczby przeskoków odwrotnych, przyjętego dla uderzeń w linię;
- rozkładu Burgsdorfa stromości prądu pioruna.

plitudy prądu pioruna jest zbliżony do amerykańskiego rozkładu AIEE, który wg pracy [2] dawał poprawne rezultaty obliczeń wskaźników odporności burzowej linii napowietrznych przy zastosowaniu zależności Whiteheada na odległość decyzji. Jest to pewnym potwierdzeniem słuszności wyboru powyższych parametrów spośród rozpatrywanych.

Rozklad radziecki am-

Rys. 5. Liczba wyłączeń burzowych linii na 100 km i rok w funkcji rezystancji uziemienia

1 - linia 110 kV, słupy serii Ac; 2 - linia 220 kV, słupy serii H; 3 - linia 400 kV, słupy serii F W tablioy 1 i na rys. 5, przedstawiono wskaźniki odporności burzowej obliczone dla trzech rozpatrywanych linii przy zastosowaniu wybranych parametrów oraz określone z danych eksploatacyjnych. Przytoczono wyniki dobrze obrazują wymienione rozbieżności pomiędzy porównywanymi wskaźnikami.

5. ZAKONCZENIE

Przeprowadzona weryfikacja wyników obliczeń nie umożliwia ostatecznego przyjęcia obliczeniewych parametrów w przedstawionym modelu clektrogeometrycznym uderzenia pioruna w linię.

Brak dostateoznych podstaw teoretycznych i doświadczalnych do przyjęcia parametrów obliczeniowych oraz do założeń, na których oparty jest model elektrogeometryczny, jest główną przeszkodą na drodze do zmniejszenia rozbieżności między obliczonymi wskaźnikami i danymi z eksploatacji. Powoduje pemadte, że zgodność wyników dla jednego przypadku obliczeniowego nie gwaramtuje takiej zgodności dla innych przypadków.

Powyższe niedostatki wskazują, że metody wykorzystujące model elektrogeometryczny uderzenia pioruna nie powinny być obecnie jedynym sposobem oceny skuteczności cohrony edgromowej linii napowietrznych wysokiego napięcia. Wskazują też kierunek dalszych prac, które powinny objąć szerszy zakres weryfikacji, zwłaszcza dla linii z wyraźnie złą osłoną odgromową oraz rozpatrzeć w obliezeniach wariantowych większą liczbę parametrów obliczeniowych. Umożliwi to wybór założeń do obliczeń dających wiarygodne wartości wskaźmików odporności burzowej linii napowietrznych wysokiego napięcia.

LITERATURA

- [1] Flisowski Z., Stružewscy E. i P.: Ocena skuteczności działania osłonowego przewodów ogromowych polskiej linii 220 kV, przy zastosowaniu metody Monte Carlo. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka 1976/42.
- [2] Stružewscy E i P.: obliczenie skuteczności zewnętrznych stref oslonowych przewodów odgromowych metodą Mente Carlo, Energetyka, styczeń 1980.
- [3] Brown G.W., Whitehead E.R.: Field and Analitical Studies of Transmission Line Shielding: Part II. IEEE Transactions on PAS, May 1969, nr 5.
- [4] Rukowodiaszczije ukazanija po zaszczitu ot wnutriennych i grozowych pierienapriażeni sietiej 3 - 750 kV. Trudy NIIPT, nr 21-22, 1975.
- [5] Darveniza M., Popolansky F., Whitehead E.R.: Lightning Protection of UHV Transmission Lines. Electra, July 1975, nr 41.
- [6] Szpor S.: Ochrona odgromowa. Tom I, WNT, Warszawa 1973.
- [7] Popolansky F.: Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents, Electra, May 1972, nr 22.
- [8] Burgsdorf W.W.: Grezozaszczita linij elektropieriedaozi, Elektriozestwo nr 8, 1969.
- [9] Burgsdorf W.W., Popow S.M.: Parametry molnii i ich wybor pri razrabotkie grozozaszczity. Trudy Instituta Energosietprojekt, wyp. 13, 1978.

Ocena skuteczności ochrony odgromowej....

- [10] Žmuda K., Macełko J.: Opracowanie programów na EMC Odra serii 1300 do oceny skuteczności ochrony odgromowej linii. Politechnika Śląska,Gliwice 1979 (praca nie publikowana).
- [11] Ziarnik J.: Zastosowanic metody Monte Carlo oraz metody całkowania do oceny skuteczneści ochrony odgromowej w liniach napowietrznych 110 – 750 kV. Praca magisterska. Instytut Elektrocnergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, Gliwice 1980.
- [12] Heller W., Jaczewski M., Nikulski J.: Awaryjność burzowa linii napowietrznych wysokiego napięcia w latach 1953-1963, Energetyka, maj 1966.
- [13] Stępniewski T., Gacek Z., Kiś W.: Wnioski z eksploatacji układów izolacyjnych linii 400 kV, Politechnika Śląska, Gliwice 1978 (praca nie publikowana).

Wpłynyło do Redakcji dnia 20. VI.1980 r. Recenzent:

Doc.dr inż, Zdobysław Flisowski

ОЦЕНКА ЭФРЕКТИВНОСТИ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНИХ ЛИНИИ ЗЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В. СОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Резюме

В статье представлены основы расчета ноказателей молнясупорностя воздунной линии с помощью аналитического метода интегрирования, используя в нем электрогеометрическую модель удара молнии в проводы линии. Обсуждены исходные данные для расчетов, а также результаты расчета числа ударов молний, попадающих в провода линии и числа выключений из-за молним линии 110, 220 и 400 кV.

ANALITICAL DETERMINATION OF LIGHTNING PROTECTION OF HIGH-VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Summary

The paper present analytical method of integration, based on electrogeometrical model of lightning streke, for computation of overhead transmission line shielding failure. The computational assumptions and the results of computations, i.e. the number of Lightning strokes to the line wires and the number of thunderstorm line tripouts for 110, 220, 400 kV overhead transmission lines, are discussed.