



Marek Szczerbiński*

OCENA NARAŻEŃ IZOLACJI KABLOWEJ OD PRZEPIĘĆ ATMOSFERYCZNYCH

Streszczenie: Izolacja linii kablowych, pracujących w sieciach mieszanych, narażona jest na oddziaływanie przepięć atmosferycznych docierających z odcinków napowietrznych. Analizy tego zagrożenia, spotykane w literaturze naukowo-technicznej, opierają się na szacunkach częstości bezpośrednich uderzeń pioruna w linię — traktują natomiast marginalnie, lub w ogóle zaniedbują, zjawisko przepięć indukowanych.

Niniejszy referat jest propozycją zmodyfikowanego podejścia do zagadnienia, uwzględniającego aktualny stan wiedzy w zakresie oddziaływania wyładowań pobliskich.

Słowa kluczowe: izolacja kablowa, sieć mieszana, przepięcia atmosferyczne, przepięcia indukowane

1. Wprowadzenie

Prąd pioruna stanowi narażenie dla kabli nie tylko w strefie swego rozplywu w ziemi, lecz także gdy dociera z innych — podatnych na wyładowania atmosferyczne — elementów systemu elektroenergetycznego. Ten drugi przypadek jest charakterystyczny szczególnie dla sieci mieszanych (napowietrzno-kablowych lub kablowo-napowietrznych). Celem niniejszego referatu będzie ocena częstości narażeń przepięciowych kabli w mieszanych sieciach rozdzielczych średniego napięcia — gdy piorun uderza bezpośrednio w linię napowietrzną lub w jej pobliżu. Zagadnienie ma swoją bibliografię, również w polskim piśmiennictwie naukowo-technicznym [1], jednak analizy ograniczały się faktycznie do oceny skutków wyładowań bezpośrednich — pomijając przepięcia atmosferyczne indukowane.

* Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Tymczasem rola tych ostatnich okazuje się być znacznie większa, niż jeszcze niedawno sądzono. Do wniosków takich prowadzą nowe, pogłębione analizy teoretyczne oraz prace eksperymentalne [2]. Również oszacowania dotyczące narażeń linii napowietrznych średnich napięć w izolacji polimerowej (gdzie zagrożenie przepięciami indukowanymi okazuje się około dwukrotnie większe niż bezpośrednimi [3]) skłania do rewizji oceny narażenia piorunowego kabli w sieci mieszanej — ze szczególnym uwzględnieniem wyładowań pobliskich.

2. Oszacowanie wartości przepięć stanowiących narażenia izolacji kablowej

Ocena częstości narażeń izolacji kablowej w sieci mieszanej musi być poprzedzona szacunkiem minimalnej wartości przepięcia — która stanowi już zagrożenie. Jest to zagadnienie złożone, a rozwiązanie zależy od wytrzymałości izolacji kablowej, zastosowanych środków ochrony, poziomu podstawowego dla izolacji liniowej, struktury sieci, miejsca uderzenia pioruna. Autor opierać się będzie, w dużej mierze, na ustaleniach wzmiankowanego już opracowania [1]. Zgodnie z Polską Normą [4], wytrzymałość udarową izolacji kablowej należy szacować na około 120% napięcia zapłonowego stosownego odgromnika zaworowego. Ponieważ wartość szczytowa przepięcia nadchodzącego wzdłuż przewodu roboczego linii napowietrznej, ograniczona wytrzymałością udarową piorunową izolacji liniowej (równą jej poziomowi podstawowemu piorunowemu U_{pp}), jest 1,26 do 2-krotnie większa, przeto rezygnacja z ochrony przy liniowej głowicy kabla byłaby niedopuszczalna. Zastosowanie w tym miejscu odgromnika zaworowego stanowi skuteczną ochronę przed falą padającą, natomiast w przypadku odbicia po przeciwnej (stacyjnej) stronie kabla od węzła niechronionego — bądź jałowego (otwarty wyłącznik) lub obciążonego dużą impedancją (transformator) — fala może ulec nawet podwojeniu i przekroczyć wytrzymałość udarową izolacji o ok. 66%. Szczegółowe obliczenia wskazują [1], że izolacja kablowa może być zagrożona przy pojawieniu się fali pierwotnej o wartości szczytowej zbliżonej do U_{pp} izolacji linii.

Powyższe ustalenia poczyniono pomijając efekt tłumienia fali w odcinku napowietrznym — na drodze pomiędzy najbardziej zbliżonym do miejsca uderzenia pioruna słupem (gdzie przepięcie zostaje ograniczone do poziomu podstawowego wytrzymałości izolacji linii), a głowicą kabla. Uwzględniony jest on natomiast w empirycznej zależności określającej zasięg strefy niebezpiecznych uderzeń piorunowych w linię napowietrzną [1]:

$$\frac{l_1}{l_2} \approx 120 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

gdzie: l_1 — długość odcinka linii napowietrznej, l_2 — długość odcinka linii kablowej, Z_1 — impedancja falowa linii napowietrznej, Z_2 — impedancja falowa linii kablowej.

Wzór ten pozwala na określenie „zasięgu zbierania” niebezpiecznych dla izolacji kablowej przepięć atmosferycznych — w kierunku przebiegu napowietrznego odcinka. Natomiast ów „zasięg zbierania” w kierunku poprzecznym, prostopadłym do tra-

sy (uwzględniający uderzenia bezpośrednio w linię, jak i przepięcia indukowane), zostanie określony poniżej.

3. Obliczanie wartości i częstości przepięć indukowanych w linii przez udary pobliskie

Zgodnie z rekomendacjami CIGRE [5], dystrybuanta wartości pierwszej składowej wyładowania piorunowego głównego, przyjęta do oceny zagrożenia linii, wyraża się zależnością:

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

Algorytm ten może być bezdyskusyjnie stosowany, gdy obliczenia odnoszą się do udarów bezpośrednich. Natomiast w przypadku przepięć indukowanych pojawia się pytanie, czy nie należy uwzględniać składowych następnych — mających co prawda kilkakrotnie mniejsze amplitudy — ale znacznie większe stromości?

Nie rozstrzygając generalnie tego problemu, możemy w dalszych oszacowaniach ograniczyć się do pierwszej składowej, ponieważ stwierdza się niezłą zgodność wyników obliczeń dokładnych i uzyskanych poprzez zastosowanie prostej reguły [3]:

$$U_{max} = \frac{30Ih}{d} \quad (3)$$

gdzie: U_{max} [kV] – maksymalna wartość napięcia indukowanego, I [kA] – wartość szczytowa pierwszej składowej prądu wyładowania głównego, h [m] – wysokość zawieszenia linii, d [m] – odległość linii od miejsca uderzenia pioruna.

(Jak widać, we wzorze nie uwzględnia się stromości narastania prądu w czasie.)

Po przekształceniu, otrzymujemy zależność

$$I = \frac{U_{max}d}{30h} \quad (4)$$

pozwalającą na określenie dla danej sytuacji (znana najwyższa dopuszczalna w rozważanych warunkach wartość U_{max} oraz wysokość zawieszenia linii h) związku między wartością szczytową prądu pierwszej składowej wyładowania, a taką graniczną odległością miejsca udaru — że dla odległości mniejszych od d nastąpiłoby uszkodzenie izolacji.

Przyjmując jako charakterystyczną dla naszego kraju liczbę wyładowań atmosferycznych na 1 km^2 w ciągu roku $N = 1,8$ [3], uwzględniając możliwość przepięć indukowanych od uderzeń z obu stron linii, otrzymujemy zależność określającą liczbę udarów w ciągu roku, powodujących przekroczenie maksymalnej dopuszczalnej

wartości U_{max} , a więc prowadzącej do uszkodzenia izolacji:

$$N_u = 2N \int_0^{\infty} P(I_P > I) \, dd = 3,6 \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{U_{max} d}{30h}\right)^{2,6}} \, dd \quad (5)$$

Tradycyjnie zagadnienia takie rozwiązywane są przez rozłączne obliczanie częstości udarów bezpośrednio w linię (po przyjęciu pasów „powierzchni równoważnej” po obu jej stronach) oraz częstości udarów pobliskich — a następnie sumowanie otrzymanych wyników. W niniejszym referacie autor nie wyodrębnia udarów bezpośrednich — przyjmując, iż są to udary pobliskie w odległości do $d = 3h$, prowadzące w przeszło 99% przypadków do przekroczenia U_{max} . To upraszczające, dopuszczalne przy przyjętej dokładności szacunków założenie, ma oczywiście charakter wyłącznie formalny i nie może być uznane za propozycję nowej interpretacji fizycznej zjawisk piorunowych.

Całkę równania (5) rozwiązano metodą graficzną dla sieci o napięciu znamionowym 6 kV, 20 kV i 30 kV, przyjmując, że w przypadku ochrony kabla za pomocą odgromnika zaworowego przyłączonego od strony linii napowietrznej, $U_{max} = U_{pp}$ linii [1]. Natomiast dla kabla nie chronionego $U_{max} = 1,2U_z$. Założono, że wysokość zawieszenia linii napowietrznej $h = 8$ m. Kabel przyłączony do linii napowietrznej o długości 1 km — która, na całej długości, znajduje się w „strefie niebezpiecznej”, określonej przez zależność (1). Wyniki przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyczne parametry sieci i zestawienie wyników obliczeń

U_N sieci	U_{PP} linii napowietrz- nej	U_z odgromnika zaworowego (OZ)	Rodzaj ochrony liniowej głowicy kabla	Przebiecie na stacynym końcu kabla	Liczba przekroczeń wytrzymałości udarowej, piorunowej kabla
[kV]	[kV]	[kV]		[kV]	[¹ /rok·km]
6	60	25	OZ brak	30 60	0,59 1,17
10	125	74,5	OZ brak	89,4 125	0,28 0,39
30	170	112	OZ brak	134,4 170	0,20 0,26

Dla porównania, obliczono wartość oczekiwaną bezpośrednich uderzeń pioruna w linię. Zgodnie z wytycznymi CIGRE [5], wynika on z zależności:

$$N_L = 0,032Nh^{0,6} = 0,20 \quad (6)$$

gdzie: N (dla Polski) = 1,8 [1/km² rok], $h = 8$ m.

4. Podsumowanie

Porównanie oszacowań liczby przekroczeń wytrzymałości udarowej piorunowej izolacji kabla w ciągu roku z liczbą uderzeń bezpośrednich w linię wskazuje na dominującą — a dotychczas nie docenianą — rolę przepięć piorunowych indukowanych. Jest ona szczególnie duża dla sieci o napięciu znamionowym 6kV; w przypadku zastosowania odgromnika zaworowego liczba przekroczeń jest około 3-krotnie większa niż liczba bezpośrednich uderzeń w linię, zaś w przypadku braku ochrony byłaby ona nawet 6-krotnie większa. Wraz ze wzrostem napięcia znamionowego sieci, wartość ilorazu liczby przekroczeń wytrzymałości przez liczbę uderzeń bezpośrednich maleje (dla $U_N = 10\text{ kV}$ wynosi on ok. 1,5...2,0, zaś dla $U_N = 30\text{ kV}$, ok. 1,0...1,25). Jest to konsekwencją wzrostu wytrzymałości udarowej piorunowej izolacji kabla.

Stwierdza się zbieżność między wynikami powyższej analizy, a ustaleniami Kosztaluka i Flisowskiego [3], dotyczącymi przewodów napowietrznych w izolacji polimerowej, że zagrożenie tej izolacji przepięciami indukowanymi w sieciach średnich napięć jest ok. 2-krotnie większe (a w sieciach niskich napięć może być nawet 8-krotnie większe) niż zagrożenie bezpośrednimi uderzeniami pioruna.

Literatura

- [1] Gacek Z., Kiś W.: *Piorunowe narażenia przepięciowe w sieciach napowietrzno-kablowych średniego napięcia*. „Energetyka”, Nr 7-8, 1990 r., s. 240-243
- [2] Nucci C. A., Ianoz M., Rachidi F., Rubinstein M., Tesche F. M., Uman M. A., Mazzetti C.: *Modelling of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines: Recent Developments*. EMC 94 Roma, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. I, pp. 44-49
- [3] Flisowski Z., Kosztaluk R.: *Zagrożenie piorunowe izolacji rozdzielczych linii napowietrznych*. „Przegląd Elektrotechniczny”, Nr 2, 1997 r., s. 43-48
- [4] PN-81/E-05001. *Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Znamionowe napięcie probiercze izolacji*
- [5] **CIGRE** *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*. Publ. 63, October 1991

ESTIMATION OF CABLE INSULATION RISK DUE TO LIGHTNING OVERVOLTAGES

Cable insulation in mixed networks can be distructed by lightning overvoltages coming from overhead lines. Up to now, the discussion of the phenomenon has been based on direct strokes estimation; the paper is a proposition to include into calculations indirect lightning strokes.

Referat powstał w ramach działalności statutowej
Zakładu Elektroenergetyki AGH w 1997 r.,
finansowanej przez Komitet Badań Naukowych.