

Wiesław Nowak*

MODELOWANIE ZJAWISKA PRZESKOKU ODWROTNEGO W PROGRAMIE EMTF

Streszczenie: W referacie wskazano na zasadnicze problemy modelowania narażeń przepięciowych, powstających w liniach elektroenergetycznych wskutek bezpośredniego wyładowania piorunowego. Jako przykład zastosowania rozważanych modeli w programie EMTF, przedstawiono wyniki obliczeń, dotyczące zjawiska przeskoku odwrotnego na linii 400 kV.

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, przepięcia, EMTF

1. Wstęp

Przy bezpośrednich wyładowaniach atmosferycznych do linii elektroenergetycznych, potencjały przewodów odgromowych oraz konstrukcji wsporczych uzyskują znaczne wartości względem ziemi i przewodów roboczych. Jeżeli powstałe przepięcia przekroczą wytrzymałość udarową izolacji linii, następuje wyładowanie elektryczne zwane *przeskokiem odwrotnym*. Zwykle zjawisko to rozpatruje się przy założeniu wyładowania do słupa linii, a celem analizy jest wyznaczenie średniej liczby przeskoku odwrotnych, przypadającej na 100 km długości linii w ciągu 1 roku. Etapem pośrednim jest wyznaczenie krytycznych wartości parametrów założonego kształtu prądu piorunowego (przede wszystkim wartości szczytowej), po przekroczeniu których wystąpi przeskok odwrotny.

Modelowanie zjawisk związanych z wyładowaniami piorunowymi i propagacją fal przepięciowych oraz ocena zagrożenia piorunowego linii elektroenergetycznych jest między innymi przedmiotem prac odpowiednich grup roboczych CIGRÉ [1] oraz IEEE [2, 3]. W tym celu wykorzystywane są również środki nowoczesnej techniki

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
e-mail: wiesio@uci.agh.edu.pl

obliczeniowej, wśród których szczególnie miejsce zajmuje *ElectroMagnetic Transients Program* (EMTP). Jest on jednym z szerzej stosowanych w obliczeniach układów elektroenergetycznych programów komputerowych, odpowiednim również do modelowania zjawisk przepięciowych w układach elektroenergetycznych przy bezpośrednich wyładowaniach atmosferycznych [4].

2. Problemy modelowania narażeń przepięciowych

Analiza narażeń przepięciowych w liniach elektroenergetycznych wymaga przyjęcia odpowiedniego modelu poszczególnych elementów składowych, tworzących rozważany układ. Wśród nich wymienić należy: odcinki linii (przęsła) z przewodami roboczymi i odgromowymi, konstrukcje wsporcze (słupy) oraz ich uziomy, izolatory i odstępy powietrzne (przerwy iskrowe), wyładowanie piorunowe.

Przęsła linii muszą być traktowane jako odcinki wieloprzewodowych linii długich. Mogą one być modelowane w programie EMTP [4, 5, 6] w dwojaki sposób:

- przy wykorzystaniu procedury *LINE CONSTANTS* i wyznaczeniu parametrów linii dla jednej częstotliwości z zakresu 400–500 kHz,
- przy wykorzystaniu procedury *SEMLYEN SETUP*, która tworzy model linii o parametrach zależnych od częstotliwości.

Na dokładność obliczeń ma wpływ ilość uwzględnianych przęseł po obu stronach słupa atakowanego. Np. w pracy [4] proponuje się, aby czas propagacji pomiędzy słupem atakowanym a ostatnim modelowanym słupem był większy niż połowa czasu czoła fali przepięciowej. Ponadto istotne znaczenie ma właściwe dopasowanie falowe, zastosowane w celu wyeliminowania fal odbitych od końców analizowanego układu. Może to być osiągnięte przez dołączenie wzajemnie sprzężonych oporników o rezystancjach równych odpowiednim impedancjom falowym linii. Innym sposobem jest dołączenie do końców układu dodatkowych odcinków linii o takiej długości, że fale odbite od ich końców nie dotrą do ostatniego modelowanego słupa w założonym czasie symulacji.

Ulot elektryczny może powodować obniżenie wartości powstałych przepięć w zakresie 5–20% i z tego powodu w bardziej pesymistycznych oczacowaniach często jest pomijany [4]. Złożoność modelowania ulotu i towarzyszące temu wydłużenie czasu obliczeń są dodatkowymi argumentami do takiego podejścia.

Słupy stalowe są najczęściej reprezentowane jako jednoprzewodowe linie długie, połączone z jednej strony z przewodami odgromowymi linii, a z drugiej rezystancją uziemienia. Impedancja falowa słupa obliczana jest w zależności od typu sylwetki i wymiarów geometrycznych, a prędkość propagacji zakłada się od 80% do 100% prędkości światła [1, 2, 4, 7]. Inny, „wielopiętrowy” model słupa linii dwutorowej proponują w oparciu o przeprowadzone pomiary dla linii 500 kV autorzy publikacji [8]. Model ten został przez nich następnie wykorzystany do analizy w programie EMTP przeskoku odwrotnego na izolacji linii 1100 kV.

Uziomy słupów w warunkach przewodzenia prądów udarowych wywołanych uderzeniem pioruna charakteryzują się własnościami odmiennymi niż w warunkach statycznych. Wynika stąd konieczność uwzględnienia zmniejszania się ich rezystan-

cji wskutek powstających wokół uziomu wyładowań elektrycznych, po przekroczeniu w gruncie pewnej krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego [9]. W pracach [1, 4] proponuje się następującą zależność aproksymującą udarową rezystancję uziemienia słupa:

$$R_T(I) = R_0 \left(1 + \frac{I}{I_g} \right)^{-0,5} \quad (1)$$

gdzie: R_T – rezystancja udarowa uziomu słupa, R_0 – rezystancja statyczna, I – prąd w uziemiu, I_g – prąd graniczny jonizacji w gruncie:

$$I_g = E_0 \frac{\rho}{2\pi R_0^2} \quad (2)$$

ρ – rezystywność gruntu, E_0 – natężenie jonizacji w gruncie, wynoszące ok. 300-400 kV/m.

Izolatory liniowe reprezentowane są przez pojemności włączone pomiędzy przewody fazowe a konstrukcję słupa. Wartości pojemności przyjmowane dla izolatorów długopniowych wynoszą ok. 80 pF, a dla izolatorów kołpakowych ok. 100 pF [4].

Charakterystyki udarowe izolatorów i odstępów powietrznych mogą być modelowane przy wykorzystaniu *metody rozwoju lidera LDM* (ang. *Lider Development Method*) [1, 4, 9, 10, 11, 12, 13], która ma zastosowanie dla napięć o różnych czasach trwania czoła oraz w szerokim zakresie odległości międzyelektrodowych powietrznych układów izolacyjnych. W metodzie LDM zakłada się, że czas do przeskoiku t_c wyraża się zależnością:

$$t_c \approx t_s + t_l \quad (3)$$

gdzie czas t_s jest czasem do rozpoczęcia fazy liderowej wyładowania (propagacji strimera), natomiast t_l – czasem propagacji lidera. W literaturze przedstawiono wiele zależności pozwalających na oszacowanie czasu t_s , jednak szczególnie interesująca jest zależność całkowita (oparta na wartości średniej napięcia) proponowana w publikacji [13], która nie wymaga znajomości maksymalnej wartości napięcia w układzie izolacyjnym przed przeskoikiem:

$$\frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} u(t) dt = A \quad (4)$$

gdzie: $u(t)$ – napięcie na układzie izolacyjnym, $A = 400d + 50$ [kV] – dla napięć biegunowości dodatniej, $A = 460d + 150$ [kV] – dla napięć biegunowości ujemnej, d – odstęp międzyelektrodowy [m].

Po czasie t_s następuje rozwój lidera, którego długość L jako funkcja czasu może być wyznaczona przez rozwiązanie równania różniczkowego [1, 4]:

$$\frac{dL}{dt} = ku(t) \left[\frac{u(t)}{d-L} - E_0 \right] \quad (5)$$

Przeskok następuje jeżeli w czasie $t = t_l$ długość lidera $L = d$. Występujące we wzorze (5) współczynniki k oraz E_0 wyznaczane są na podstawie badań eksperymentalnych. W publikacjach [1, 4] podano ich następujące wartości do stosowania w praktycznie występujących konfiguracjach:

rodzaj układu izolacyjnego	biegunowość napięcia	k [m ² /kV ² s]	E_0 [kV/m]
odstępy powietrzne, izolatory wsporcze i długopniowe	+	0,8	600
	-	1,0	670
łańcuchy izolatorów kołpakowych	+	1,2	520
	-	1,3	600

Wyładowanie piorunowe przedstawiane jest jako źródło prądowe podłączone do wierzchołka słupa atakowanego. W analizie zagrożenia piorunowego linii elektroenergetycznych zdecydowane znaczenia ma pierwsza składowa odgórnego wyładowania biegunowości ujemnej [1]. Właściwości statystyczne parametrów prądu piorunowego opisywane są rozkładami logarytmo-normalnymi, których gęstość w ogólnej postaci przedstawia zależność:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x/M)}{\beta} \right]^2 \right\} \quad (6)$$

Wartości mediany M i współczynnika β dla wybranych parametrów prądu piorunowego pierwszej składowej odgórnego wyładowania biegunowości ujemnej, przedstawiają się w zakresie wartości szczytowych $I_F > 20$ kA następująco [1]:

parametr x	M	β
wartość szczytowa I_F [kA]	33,3	0,605
maksymalna stromość narastania S_m [kA/ μ s]	24,3	0,559
czas do półszczytu t_h [μ s]	77,5	0,557
maksymalna stromość narastania	$6,50 I_F^{0,376}$	0,554
— rozkład warunkowy $S_m I_F$ [kA/ μ s]		

W praktycznych obliczeniach zaleca się [1] stosowanie rozkładu (6) co najmniej dla wartości szczytowej prądu piorunowego, a dla maksymalnej stromości narastania oraz czasu do półszczytu median rozkładu $f(S_m|I_F)$ i $f(t_h)$. W bardziej zaawansowanych obliczeniach, jak np. w metodzie Monte Carlo, rozkład (6) może mieć zastosowanie również do pozostałych parametrów.

Ścisłe podejście w modelowaniu przebiegu czasowego prądu piorunowego wymaga uwzględnienia wklęsłego charakteru czoła, jednak z wystarczającą dokładnością przebieg ten może być aproksymowany impulsem trójkątnym o minimalnym równoważnym czasie trwania czoła $t_m = I_F/(S_m|I_F)$ [1, 4].

3. Przeskok odwrotny na izolacji linii 400 kV

Modelowania przeskoku odwrotnego na izolacji słupa serii Y52 jednorodnej linii 400 kV przeprowadzono w programie EMTP (wersja ATP), wykorzystując zasady opisane w rozdziale poprzednim. Przyjęto układ dziewięciosłupowy, przedstawiony na rysunku 1. Parametry przęseł $P1-P10$ wyznaczono przy użyciu procedury *SEMLYEN SETUP*. Długości przęseł $P1-P8$ są jednakowe i wynoszą 450 m. Przęsła $P9, P10$ o długości 2,1 km zapewniają, że w założonym czasie symulacji $20 \mu\text{s}$ fale odbite od końców układu nie dotrą do słupów krańcowych nr 7 i 8. Fazy źródeł napięcia 400 kV EA, EB, EC dobierano w taki sposób, aby narażenie układu izolacyjnego spowodowane wyładowaniem piorunowym było jak największe.

Izolację słupów stanowią łańcuchy izolatorów kołpakowych LP $21 \times \text{PS160B}$ (fazy skrajne A i C) oraz LPV $21 \times \text{PS160B}$ (faza środkowa B), dla których długości przerw iskrowych wynoszą odpowiednio 3,50 m oraz 2,83 m. Tym samym najmniejszą wytrzymałością elektryczną charakteryzuje się układ izolacyjny fazy środkowej. Charakterystyki udarowe przerw iskrowych (iskierniki VT na słupie atakowanym nr 0 — rysunek 1) modelowano metodą LDM, wykorzystując zaimplementowany w programie ATP wewnętrzny język programowania MODELS.

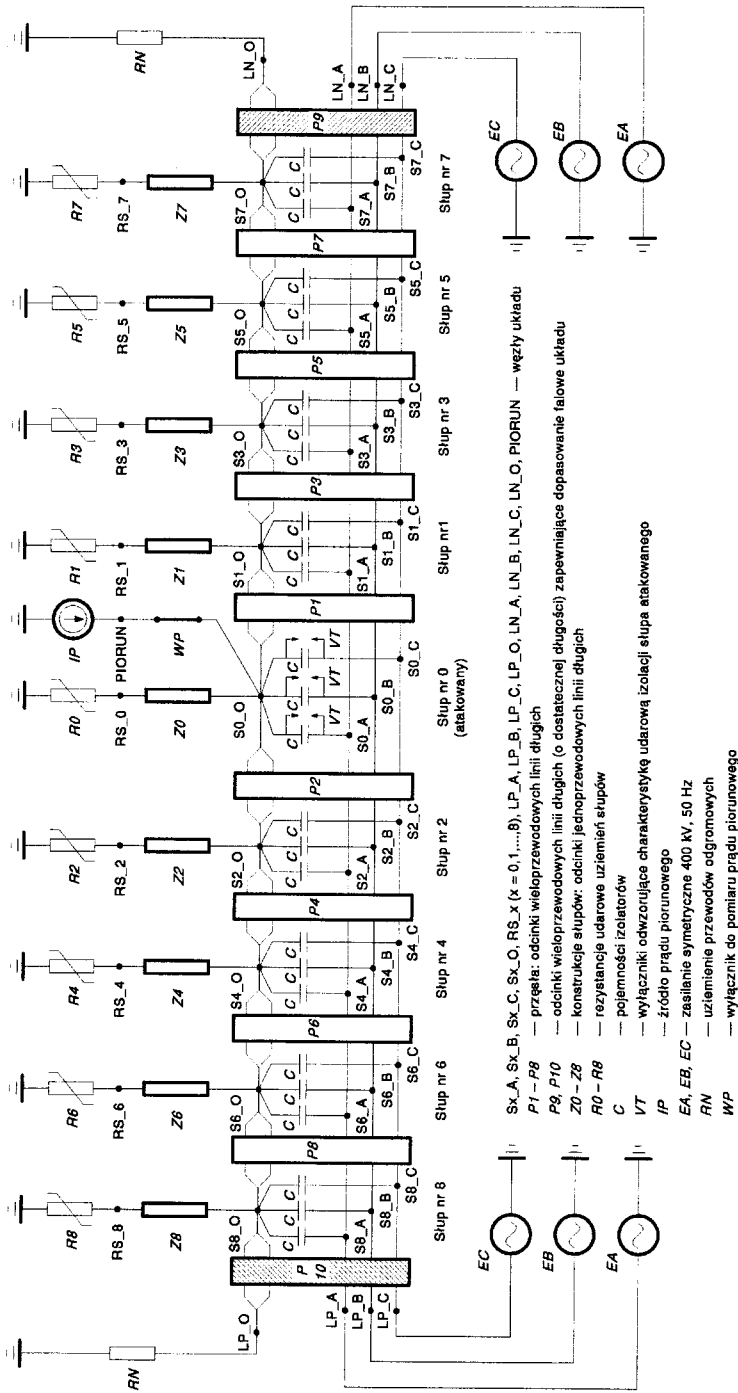
Obliczenia przeprowadzono dla różnych rezystywności gruntu i rezystancji statycznej uziemienia słupów, stosując źródło prądu piorunowego IP o przebiegu trójkątnym i zmiennej wartości szczytowej. Rysunek 2 ilustruje przykładowe wyniki obliczeń dla rezystywności gruntu $1500 \Omega\text{m}$ i rezystancji statycznej 15Ω .

Na podstawie rysunku 2a można stwierdzić, że przeskok odwrotny wystąpi przy wartości krytycznej prądu piorunowego 208,5 kA (przy minimalnym równoważnym czasie trwania czoła $t_m = 4,31 \mu\text{s}$). Wartości tej odpowiada wg rozkładu (6) prawdopodobieństwo przekroczenia $R = 1,22 \cdot 10^{-3}$, które jest ryzykiem przeskoku odwrotnego spowodowanego pojedynczym wyładowaniem piorunowym. Otrzymane prawdopodobieństwo stanowi podstawę dalszej analizy [1], zmierzającej do wyznaczenia wartości BFR (ang. *BackFlash Rate*), czyli średniej liczby przeskoków odwrotnych, przypadającej na 100 km długości linii w ciągu 1 roku.

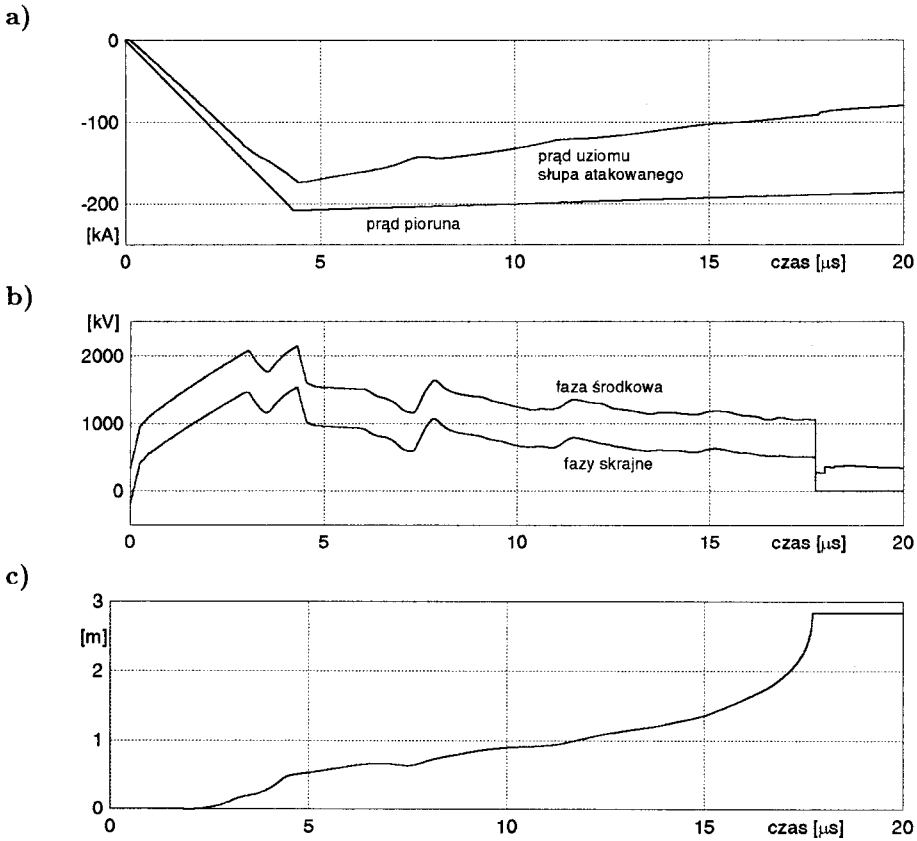
4. Podsumowanie

Obliczenia stanów nieustalonych w systemach elektroenergetycznych wymagają z jednej strony stworzenia odpowiedniego modelu rozpatrywanego zjawiska, a z drugiej zastosowania właściwych metod numerycznych do jego rozwiązania. Te dwa aspekty łączy w sposób kompleksowy zastosowanie programu EMTP, co zostało potwierdzone w przypadku modelowania przeskoku odwrotnego.

Dalsze prace zmierzać będą do uwzględnienia wpływu ulotu elektrycznego i rozszerzenia analizy propagacji fal przepięciowych na układy złożone z linii i stacji elektroenergetycznych.



Rys. 1. Schemat układu do analizy w programie EMTP przeskoku odwrótnego na jednofazowej linii 400 kV



Rys. 2. Przebiegi czasowe przy rezystywności gruntu $1500 \Omega \text{m}$ i rezystancji statycznej uziemienia stupów 15Ω : a) krytyczny prąd piorunowy ($I_F = 208,5 \text{ kA}$, $t_m = 4,31 \mu\text{s}$) oraz prąd w uziemiu stupa atakowanego; b) napięcia na izolacji stupa atakowanego – przeskok w przerwie iskrowej fazy B ($t_c = 17,74 \mu\text{s}$); c) rozwój lidera ($t_s = 1,61 \mu\text{s}$, $t_l = 16,13 \mu\text{s}$)

Literatura

- [1] **CIGRÉ Working Group 33-01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination):** *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*. Publ. 63, October 1991
- [2] **IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines:** *A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines*. IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-104, No. 4, pp. 919-932, 1985
- [3] **IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines:** *Estimating Lightning Performance of Transmission Lines — Updates to Analytical Models*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 8, No. 3, pp. 1254-1267, 1993
- [4] **IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group:** *Modeling Guidelines for Fast Front Transient*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 11, No. 1, pp. 493-506, 1996

- [5] *Electromagnetic Transients Program. Theory Book*. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995
- [6] *Alternative Transients Program. Rule Book*. Canadian/American EMTP User Group, 1987-92
- [7] **Chisholm W. A., Chow Y. L., Srivastava K. D.**: *Travel Time of Transmission Towers*. IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-104, No. 10, pp. 2922-2928, 1985
- [8] **Ishii M., Kawamura T., Kouno T., Ohsaki E., Murotani K., Higuchi T.**: *Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 6, No. 3, pp. 1327-1335, 1991
- [9] **Mousa A. M.**: *The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 9, No. 3, pp. 1669-1677, 1994
- [10] **Shindo T., Suzuki T.**: *A New Calculation Method of Breakdown Voltage-Time Characteristic of Long Air Gaps*. IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-104, No. 6, pp. 1556-1563, 1985
- [11] **Shindo T., Kishizima I., Suzuki T.**: *Flashover Characteristic of Air Gaps Under Partly Chopped Waves*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 3, No. 4, pp. 1887-1891, 1988
- [12] **Pigini A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G.**: *Performance of Large Gaps under Lightning Overvoltages: Experimental Study and Analysis of Accuracy of Predetermination Methods*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 4, No. 2, pp. 1379-1392, 1989
- [13] **Motoyama H.**: *Experimental Study and Analysis of Breakdown Characteristics of Long Air Gaps with Short Tail Lightning Impulse*. IEEE Transactions on PWRD, vol. 11, No. 2, pp. 972-979, 1996

MODELLING OF BACKFLASHOVER
IN ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM (EMTP)

In this paper essential problems related to the modelling of lightning surge phenomena caused by direct strokes to overhead power lines have been pointed out. The model of backflashover and EMTP simulation for 400 kV single-circuit line is presented as example.

PODZIĘKOWANIE

Panu dr. inż. Zbigniewowi Nartowskiemu z Biura Studiów i Projektów Energetycznych ENERGOPROJEKT – KRAKÓW S.A. składam podziękowanie za inspirację do podjęcia przedstawionego problemu.

Niniejszy temat jest realizowany w ramach umowy nr 10.120.508, która finansowana jest przez Komitet Badań Naukowych.