



Wiesław NOWAK, Rafał TARKO, Barbara FLORKOWSKA

Akademia Górniczo Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Wpływ ulotu elektrycznego na poziom przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV

Streszczenie. W artykule przedstawiono model rozdzielni 110 kV oraz wyniki analizy narażeń przepięciowych, wywołanych uderzeniem pioruna w przewód fazowy linii. Podstawą opracowanego modelu linii elektroenergetycznych jest wyodrębnienie istotnych zjawisk zachodzących w elementach konstrukcyjnych – między innymi zjawiska ulotu elektrycznego – mających zasadniczy wpływ na kształtowanie się przebiegów przepięć.

Abstract. (Influence of corona on lightning surges level in 110 kV substation). In this paper 110 kV substation model and analysis results of surge hazards generated by lightning stroke to the phase conductor of overhead line are presented. The developed model is based on some selected significant phenomena, which occur in structural elements – especially of the corona effects – seriously influence shapes of overvoltages.

Słowa kluczowe: układy elektroenergetyczne, przepięcia atmosferyczne, ulot elektryczny, modelowanie.

Keywords: electrical power systems, lightning surges, corona, modeling.

Wstęp

Stosowane w rozdzielniach elektroenergetycznych wysokich napięć środki ochrony odgromowej w postaci zwodów pionowych powodują, że bezpośrednie uderzenie pioruna do urządzeń stacyjnych jest praktycznie zdarzeniem niemożliwym. Również przechwycenie wyładowania przez maszty odgromowe nie implikuje występowania przeskoków odwrrotnych, wiażwszy pod uwagę wymagane dla stacji rezystancje jej uziemień.

Przepięcia atmosferyczne, które stanowią dla izolacji rozdzielni najbardziej niekorzystne narażenia pod względem spodziewanego ich poziomu, są konsekwencją bezpośrednich wyładowań do przewodów linii. Fale przepięciowe docierające do rozdzielni podlegają w niej zjawiskom falowym, które charakteryzują się dużym stopniem komplikacji, wynikającym ze złożonej przestrzeni struktury, jaką tworzy wyposażenie rozdzielni. Ze wzrostem napięcia znamionowego rozmiar tej struktury ulega zwiększeniu, tak że w coraz większym zakresie staje się ona zbiorem elementów o stałych rozłożonych, pomiędzy którymi usytuowane są węzły nieciągłości. Powoduje to, że o poziomie narażeń decyduje nie tylko ilość przyłączonych i pracujących linii oraz zastosowana ochrona przeciwpięciowa, ale również efekty falowe – przede wszystkim odbicia wielokrotne – wewnątrz rozdzielni.

Na kształt przepięć docierających do stacji elektroenergetycznej oraz wartości charakterystycznych parametrów, wpływa również ulot elektryczny występujący na linii elektroenergetycznej. Ze względu na duże wartości powstających fal przepięciowych, na ogół znacznie jest przekroczone napięcie początkowe ulotu elektrycznego, a tym samym powstałe wyładowanie ulotowe łagodzi narażenie przepięciowe stacji.

W artykule przedstawiono analizę wpływu ulotu elektrycznego na poziom przepięć, powstających w rozdzielni elektroenergetycznej, jako efekt wyładowania piorunowego do przewodu fazowego linii zasilającej. Rozważania przeprowadzono dla stacji elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 110 kV w układzie H4, wyposażonej w dwa transformatory 110/15 kV. W tym celu opracowano w programie *EMTP-ATP* (*ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) modele komputerowe stacji, linii zasilających oraz zjawisk ulotowych.

Model analizowanego układu

Model analizowanego układu odwzorowany został w programie ATPDraw, a jego schemat przedstawiono na rysunku 1. W rozważanym układzie wyodrębnić można dwie zasadnicze części.

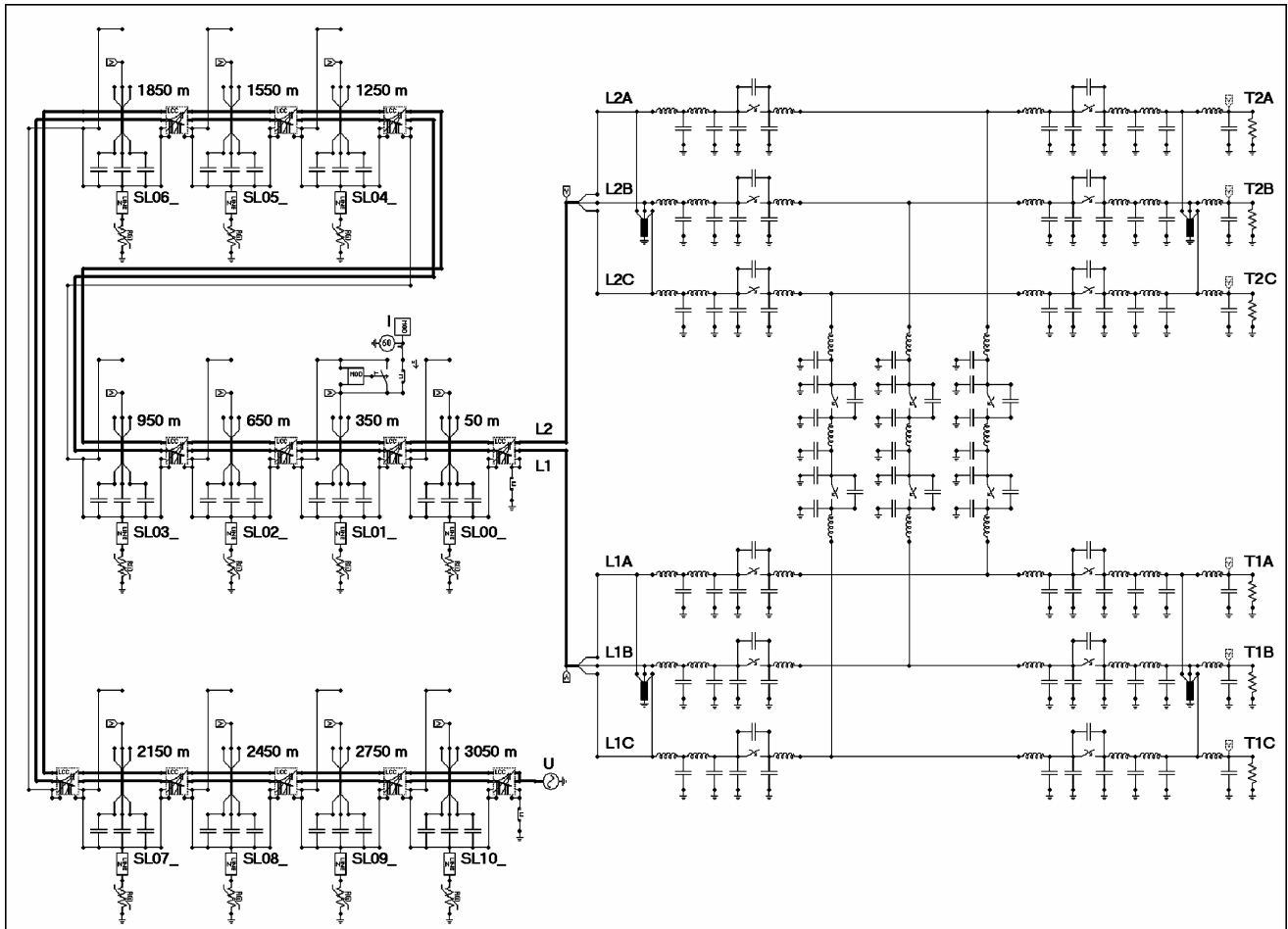
Jedną z nich stanowi model rozdzielni w postaci zbioru elementów odwzorowujących jej wyposażenie. Wyodrębniono w nim aparaty i urządzenia stanowiące węzły nieciągłości na drodze fal przepięciowych i określono, które odcinki szyn zbiorczych oraz połączenia międzyaparaturowe będą reprezentowane jako obwody o parametrach rozłożonych, a które jako obwody skupione [1]. Ze względu na fakt, że w analizowanej rozdzielni długości odcinków szyn i połączeń nie przekraczają 15 metrów, odwzorowano je jako indukcyjności skupione o wartości jednostkowej $1 \mu\text{H/m}$ [2], pomiędzy którymi znajdują się pojemności doziemne poszczególnych aparatów.

Mimo złożonych zjawisk falowych w uzwojeniach transformatorów (np. [3]), zjawiska na ich zaciskach liniowych są analogiczne, jak na końcu nieobciążonej linii długiej. Konsekwencją tego jest możliwość zastosowania uproszczonych modeli będących równoległym połączeniem rezystancji reprezentującej impedancję falową transformatora oraz pojemności doziemnej uzwojenia.

Zastosowany model ograniczników przepięć uwzględnił zjawiska dynamiczne przy szybkich zmianach napięcia i stanowi go struktura proponowana przez IEEE Working Group 3.4.11 [4]. Do estymacji parametrów modelu ogranicznika wykorzystano opracowany program *ZnO – Model* [5], który daje możliwość utworzenia pliku bezpośrednio wykorzystywanego w programie *EMTP – ATP*.

Drugą część rozważanego układu stanowi kompleksowy model [5, 6] dwutorowej linii zasilającej 110 kV prowadzonej na słupach serii OS24. W linii wyodrębniono dziesięć trzystumetrowych odcinków, reprezentujących ostatnich dziesięć prześel przed wprowadzeniem linii do rozdzielni i jeden odcinek pięćdziesięciometrowy – reprezentujący podejście do stacji. Odcinki połączone są szeregowo i odwzorowane w programie *EMTP – ATP* jako modeli wieloprzewodowe linii długie o parametrach zależnych od częstotliwości.

Do węzłów pomiędzy odcinkami linii podłączone są dodatkowo elementy [5] reprezentujące zjawiska falowe w konstrukcjach wsporczych, wytrzymałość udarową izolacji linii oraz udarowe właściwości uziemień słupów.



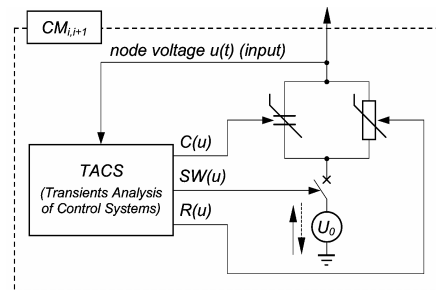
Rys. 1. Schemat analizowanego układu 110 kV odwzorowany w programie ATPDraw

Wyładowanie piorunowe zostało przedstawione w postaci źródła trójkątnego impulsu prądowego biegunowości ujemnej, przyłączonego do atakowanego przewodu fazowego. Wartość szczytowa impulsu odpowiada krytycznej wartości szczytowej prądu pioruna [7], powyżej której nie jest możliwe uderzenie pioruna w przewód fazowy linii. Analiza wykazała, że dla zastosowanych w linii słupów OS24 konstrukcji mocnej, wartość ta wynosi 14,9 kA. Wartości tej odpowiada równoważny czas trwania czoła 0,78 μ s. Analiza wykazała również, że najbardziej narażona jest faza środkowa (faza B), która jest najdalej odsunięta od osi linii.

W analizowanym układzie zaimplementowano model ulotu elektrycznego, wykorzystując koncepcję pojemności dynamicznej [8, 9] oraz przekształcenie modelu linii długiej do postaci różnicowej [10, 11]. Rozłożone parametry ulotu odwzorowane są wówczas jako obwody o stałych skupionych w węzłach pomiędzy poszczególnymi odcinkami linii. Wspomaganie modelowania rozważanych zjawisk w programie EMTP – ATP uzyskano wykorzystując autorski program komputerowy CORONA [10].

Model ulotu elektrycznego

Zastosowany schemat modelu ulotu elektrycznego przedstawiono na rysunku 2. Zawiera on połączony równolegle nieliniowy kondensator o pojemności $C(u)$, nieliniowy rezystor o rezystancji $R(u)$, wyłącznik sterowany oraz źródło napięcia stałego o wartości napięcia początkowego ulotu U_0 . Elementy nieliniowe oraz wyłącznik są sterowane przez układ TACS (*Transients Analysis of Control Systems*), dla którego sygnałem wejściowym jest napięcie węzłowe $u(t)$.



Rys. 2. Element modelu ulotu elektrycznego [11]

Zależności nieliniowej części pojemności dynamicznej oraz nieliniowej rezystancji (reprezentującej straty energii) wyrażono równaniami [11]:

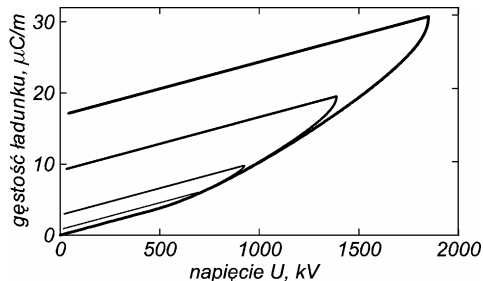
$$(1) \quad C(u) = 2\sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{LM} \left(1 - \frac{U_0}{u}\right) \cdot SW(u) \quad [\text{F}]$$

$$(2) \quad R(u) = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{LM}} \left(\frac{u}{u - U_0}\right)^2 \cdot SW(u) \quad [\Omega]$$

gdzie: U_0 – napięcie początkowe ulotu, l_{LM} – długość odcinka modelu liniowego, r – promień przewodu, h – wysokość przewodu, σ_C , σ_G – stałe, które są charakterystyczne dla konstrukcji przewodu fazowego, polaryzacji i wartości szczytowej napięcia, $SW(u)$ – sygnał zależny od wartości i pochodnej napięcia węzłowego $u(t)$:

$$(3) \quad SW(u) = \begin{cases} 0 & \text{dla } u(t) < U_0 \vee \frac{du}{dt} \leq 0 \\ 1 & \text{dla } u(t) \geq U_0 \wedge \frac{du}{dt} > 0 \end{cases}$$

Funkcjonowanie opracowanego modelu ilustruje rysunek 3, na którym przedstawiono krzywe $q-V$ pojemności dynamicznej otrzymane dla analizowanej linii napowietrznej z zaimplementowanym ulotem elektrycznym.



Rys. 3. Dynamiczne charakterystyki gęstości ładunku od chwilowej wartości napięcia (krzywe $q-V$ pojemności dynamicznej)

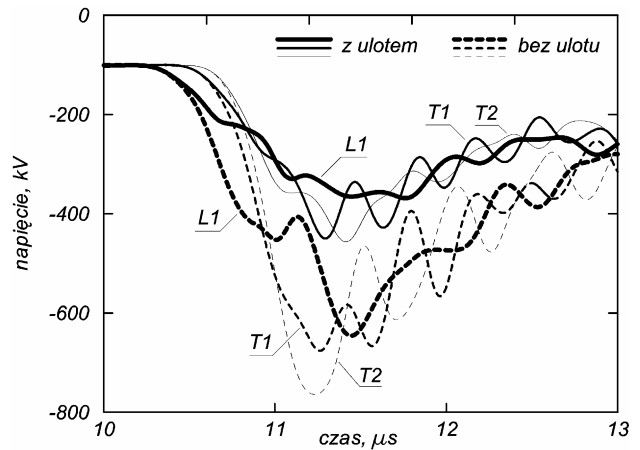
Wyniki analizy

Analizę przepięć przeprowadzono wielowariantowo, rozważając możliwe w eksploatacji układy pracy rozdzielni. Założono, że atakowana jest faza B toru L1, przy czym odległość uderzenia pioruna stanowiła jeden z parametrów analizy. Zgodnie z oczekiwaniami, przeprowadzone symulacje wykazały, że przy zasilaniu rozdzielni z dwóch torów linii L1 i L2 (rys. 1) największe poziomy przepięć w rozdzielni występują przy otwartej poprzeczce układu H. Analogiczna sytuacja ma miejsce również przy zasilaniu rozdzielni z jednego toru (np. L1), przy czym nie występują wówczas istotne różnice, co tego, czy poprzeczka jest otwarta czy też pozostaje zamknięta.

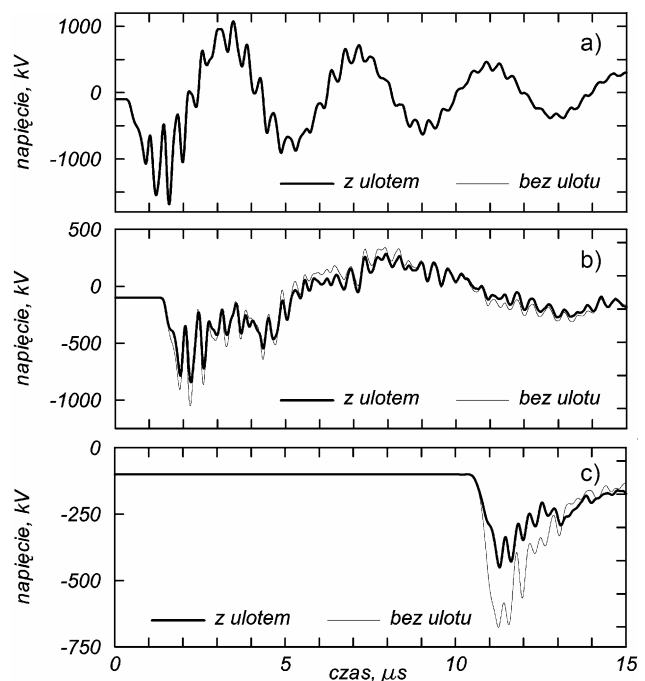
Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe przebiegi przepięć w wybranych punktach rozdzielni: w miejscu wprowadzenia toru L1 oraz na zaciskach transformatorów T1 i T2, otrzymane przy założeniu uderzenia pioruna w odległości 3050 m od rozdzielni i braku ochrony przeciwprzepięciowej. Przebiegi te wykazują zarówno złożone efekty falowe występujące w rozdzielni (zróżnicowanie przebiegów w poszczególnych punktach), jak i znaczną redukcję wartości szczytowych oraz złagodzenie stromości narastania przepięć w wyniku tłumienia ulotowego.

Efektywność tłumienia ulotowego zależna jest od wielu czynników, takich jak promień przewodu, jego wysokość i stosunek wartości szczytowej fali przepięciowej w miejscu jej powstania do wartości napięcia początkowego ulotu. Istotnym czynnikiem jest również miejsce uderzenia pioruna (rys. 5), przy czym tłumienie jest tym większa im większa jest droga propagacji fali przepięciowej.

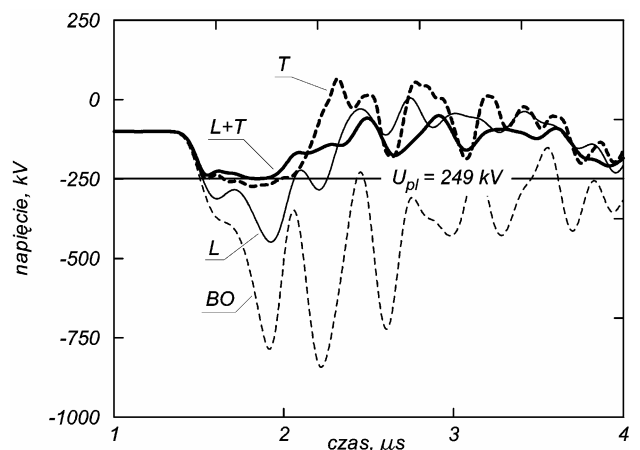
O kształcie przepięć i ich wartościach zasadniczo decyduje zastosowana ochrona przeciwprzepięciowa. Na rysunku 6 pokazano przykładowe przepięcia na transformatorze T1 wynikające z uderzeniem pioruna w odległości 350 m od rozdzielni, które otrzymano dla czterech wariantów ochrony: 1) brak ograniczników przepięć (BO), 2) ograniczniki w punkcie przyłączenia linii (L), 3) ograniczniki w polach transformatorów (T), 4) ograniczniki w punkcie przyłączenia linii i w polach transformatorów (L+T). Na rysunku zaznaczono również piorunowy poziom ochrony $U_{pl} = 249$ kV dla znamionowego prądu wyładowczego 8/20 μ s 10 kA zastosowanych ograniczników



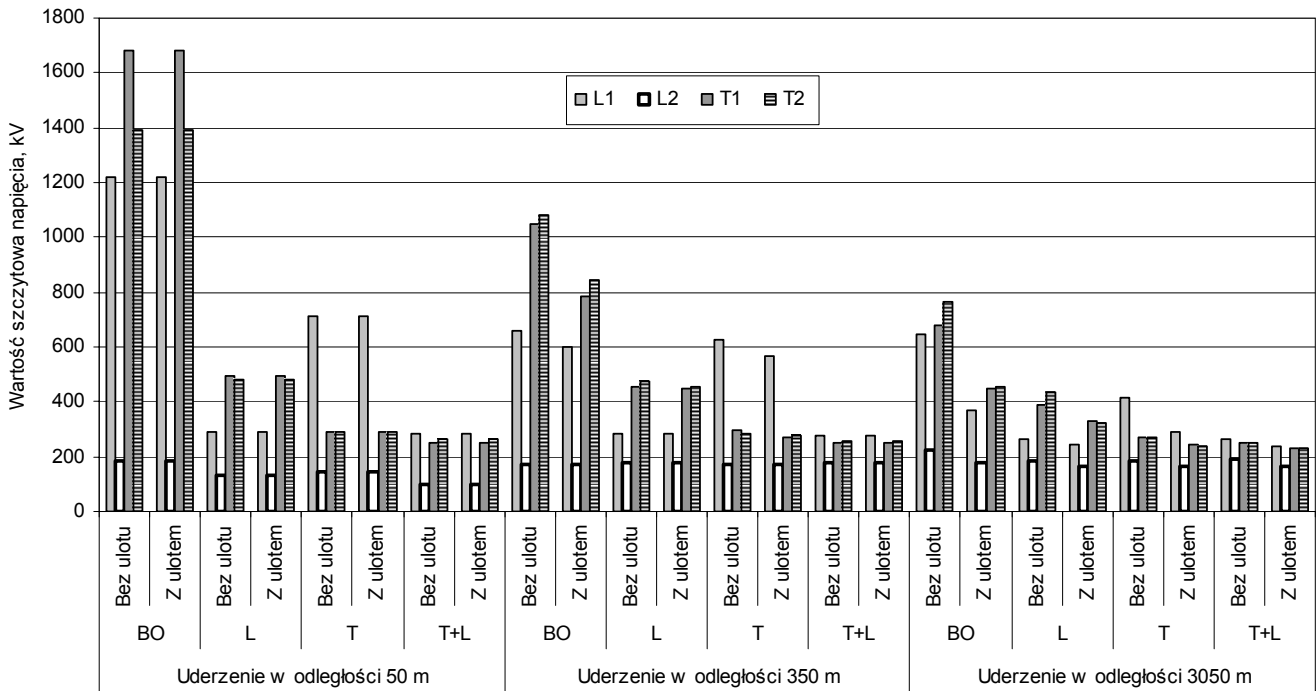
Rys.4. Wpływ ulotu na przepięcia w wybranych punktach rozdzielni 110 kV – zasilanie z toru L1, odległość uderzenia pioruna 3050 m



Rys.5. Wpływ miejsca uderzenia pioruna na przepięcia na transformatorze T1: a) 50 m, b) 350 m, c) 3050 m – zasilanie z toru L1



Rys.6. Wpływ ograniczników przepięć na przepięcia na transformatorze T1 – zasilanie z toru L1, odległość uderzenia pioruna 350 m



Rys. 7. Wartości szczytowe przepięć w wybranych punktach rozdzielni 110 kV – zasilanie z toru L1

Na rysunku 7 zestawiono wyniki analizy, które pozwalają ocenić wpływ zjawiska ulotu, miejsca uderzenia pioruna oraz sposobu ochrony przeciwprzebiegowej, na wartości maksymalne przepięć, występujących w charakterystycznych punktach rozdzielni: początek toru nr 1 i toru nr 2 linii zasilającej (L1 i L2) oraz na zaciskach transformatorów (T1 i T2). Prezentowane wyniki zostały uzyskane dla miejsca uderzenia pioruna w linię w odległości 50, 350 oraz 3050 m od rozdzielni.

Wnioski i podsumowanie

Największe wartości przepięć występują przy uderzeniu pioruna w pierwszy słup linii od strony rozdzielni (50 m od punktów L1 oraz L2) i w tym przypadku brak jest praktycznego tłumienia ulotowego, a o poziomie przepięć decyduje jedynie sposób rozwiązania ochrony przeciwprzebiegowej rozdzielni.

Dla dalszych odległości uderzenia poziom przepięć ulega zmniejszeniu, a ich wartości szczytowe zależne są wówczas zarówno od sposobu ochrony, jak i dodatkowo od tłumienia ulotowego.

Skuteczność ochrony związana jest również z liczbą i rozmieszczeniem ograniczników w rozdzielni. Wskutek wewnętrznych zjawisk falowych, usytuowanie ograniczników tylko w miejscu przyłączenia linii skutkuje znacznym wzrostem poziomu przepięć na zaciskach transformatora. Analogicznie przedstawia się sytuacja przy lokalizacji ograniczników tylko w polach transformatorów, co prowadzi do intensyfikacji przepięć w polach liniowych. W obu tych przypadkach tłumienie ulotowe ma znaczący udział w redukcji przepięć w niechronionych częściach rozdzielni. Najlepszym wariantem ochrony przeciwprzebiegowej jest jednak zastosowanie ograniczników zarówno w polach liniowych, jak i polach transformatorowych analizowanego układu H rozdzielni 110 kV.

LITERATURA

[1] Nowak W., Modelowanie i analiza przepięć atmosferycznych w napowietrznych rozdzielniach wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, seria Konferencje, 1'2003, 160-163

[2] IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, Modeling guidelines for fast front transient, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 11, No. 1, January 1996, 493-506

[3] Furgał J., *Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć*, Rozprawy i Monografie nr 118, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003

[4] IEEE Working Group 3.4.11, Modeling of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 7, No. 1, January 1992, 302-309

[5] Nowak W., *Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wylądowaniach atmosferycznych*, Rozprawy i Monografie nr 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005

[6] Nowak W., The analysis of backflashovers in high voltage overhead lines (w druku), *Archives of Electrical Engineering*, 2005

[7] CIGRÉ Working Group 33-01 of Study Committee 33 Overvoltages and Insulation Coordination, *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, CIGRÉ Publication No. 63, 1991

[8] Maruvada P.S., Menemenlis H., Malewski R., Corona characteristics of conductor bundles under impulse voltages, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-96, No.1, January/February 1977, 102-115

[9] Noda T., Ono T., Matsubara H., Motoyama H., Sekioka S., Ametani A., Charge-voltage curves of surge corona on transmission lines: Two measurement methods, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 18, No. 1, January 2003, 307-314

[10] Florowska B., Nowak W., Tarko R., *Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych wysokich napięć*, *Przegląd Elektrotechniczny*, seria Konferencje, 1'2004, s.69-72

[11] Florowska B., Nowak W., Tarko R., Modelling of the corona for the analysis of the overvoltage waves propagation in the overhead high voltage transmission lines (w druku), *Archives of Electrical Engineering*, 2005

Autorzy: dr inż. Wiesław Nowak, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wiesio@agh.edu.pl; mgr inż. Rafał Tarko, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: tarko@agh.edu.pl; prof. dr hab. inż. Barbara Florowska, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: beflor@agh.edu.pl