

## KOMPUTEROWE MODELOWANIE UKŁADÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH DLA SYMULACJI EFEKTÓW FALOWYCH SPOWODOWANYCH WYŁADOWANIAMi ATMOSFERYCZNYMI

Mariusz BENESZ, Wiesław NOWAK, Rafał TARKO

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel: (12) 617 36 53 fax: (12) 634 57 21

e-mail: mariusz.benesz@agh.edu.pl; wieslaw.nowak@agh.edu.pl; rafal.tarko@agh.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono model sieci przesyłowej o napięciu znamionowym 150 kV, zasilającej miasto Aalborg (Dania) oraz wyniki symulacji efektów falowych, wywołanych uderzeniem pioruna w przewód fazowy linii. Symulacje przeprowadzone zostały przy pomocy programu *The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*.

**Słowa kluczowe:** układy elektroenergetyczne, wyładowania atmosferyczne, modelowanie, *EMTP-ATP*.

### 1. WPROWADZENIE

Wyładowania atmosferyczne są źródłem przepięć, które stanowią poważne narażenie układów izolacyjnych urządzeń i układów elektroenergetycznych. Podstawowym warunkiem przeprowadzenia analizy propagacji fal przepięciowych i określenia poziomu narażeń przepięciowych za pomocą modelowania matematycznego zjawisk fizycznych, jest opracowanie kompleksowego modelu układu. Ze względu na złożoność problemu, model końcowy składa się z wielu modeli cząstkowych, specyficznych dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz istotnych z punktu widzenia prowadzonej analizy, zjawisk fizycznych zachodzących w układzie [1].

Napowietrzne oraz kablowe linie elektroenergetyczne w warunkach przepięć przejściowych muszą być rozpatrywane jako linie długie, co wynika z konieczności uwzględnienia zachodzących w nich efektów falowych. Układy elektroenergetyczne w warunkach przepięć szybkozmiennych muszą być więc rozpatrywane jako obwody o parametrach rozłożonych. Dla tego typu analizy przęśla linii przesyłowych odwzorowane są, jako wieloprzewodowe linie długie, których modele opracowywane są dla  $n$  wzajemnie sprzężonych pętli ziemnopowrotnych. Zarówno impedancje własne, jak i wzajemne pętli ziemnopowrotnych linii są zależne od częstotliwości przebiegów prądów i napięć [2]. W związku z tym w analizie stanów nieustalonych związanych z propagacją przepięć atmosferycznych istnieją zasadniczo dwa sposoby postępowania:

1) wyznaczenie parametrów podłużnych linii dla jednej częstotliwości,

2) uwzględnienie zależności wartości parametrów podłużnych linii od częstotliwości przebiegów prądów i napięć.

W artykule przedstawiono opracowany dla programu *EMTP – ATP* model sieci przesyłowej 150 kV zasilającej miasto Aalborg (Dania) dla analizy propagacji fal przepięciowych pochodzenia atmosferycznego. Otrzymane w wyniku analizy wartości spodziewanych przepięć mogą być wykorzystane między innymi przy doborze środków ochrony przeciwprzepięciowej.

### 2. ZJAWISKA FALOWE W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Dla impulsów wysokoczęstotliwościowych każdy element sieci jest reprezentowany przez impedancję falową  $Z_f$ , która opisuje zależność między napięciem i prądem w danym elemencie sieci. Wartość  $Z_f$  jest wyznaczana na podstawie równania indukcyjności  $L_i$  i pojemności  $C_i$  danego elementu sieci:

$$Z_f = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}} \quad (1)$$

gdzie:  $Z_f$  – impedancja falowa elementu sieci,  $L_i$  – indukcyjność elementu sieci,  $C_i$  – pojemność elementu sieci

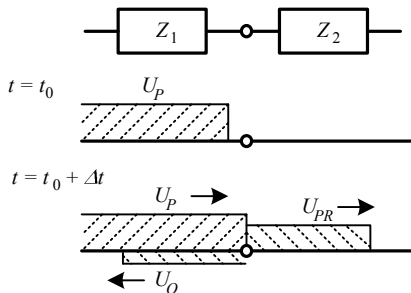
Przy opisywaniu efektów falowych oprócz znajomości impedancji falowej istnieje potrzeba znajomości prędkości rozchodzenia się fali  $v_f$ , a co za tym idzie czasu propagacji fali przez dany element sieci  $\tau_i$ . Wartości  $v_f$  i  $\tau_i$  określają następujące zależności:

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{L_i \cdot C_i}} \quad (2)$$

$$\tau_i = \frac{l_i}{v_f} \quad (3)$$

gdzie:  $L_i$  – indukcyjność elementu sieci,  $C_i$  – pojemność elementu sieci,  $l_i$  – długość elementu sieci

Efekty falowe uwidaczniają się, gdy rozchodzący się impuls wysokoczęstotliwościowy napotyka na połączenie dwóch elementów sieciowych charakteryzujących się różnymi wartościami impedancji falowych. W takim przypadku, w zależności od relacji pomiędzy wartościami  $Z_1$  i  $Z_2$ , fala docierająca do węzła może ulec całkowitemu lub częściowemu odbiciu (rys. 1).



Rys. 1. Efekty falowe na połączeniu dwóch impedancji falowych, przy prostokątnej fali padającej o amplitudzie  $U_p$

W punkcie nieciągłości (rys.1) oprócz fali padającej  $U_p$  wyróżnia się dodatkowo falę odbitą  $U_o$  oraz falę przechodzącą  $U_{PR}$ . Amplitudy poszczególnych fal wyznaczyć można odpowiednio dla fali odbitej i fali przechodzącej na podstawie równań:

$$U_o = \beta \cdot U_p \quad (4)$$

$$U_{PR} = \alpha \cdot U_p \quad (5)$$

gdzie:  $U_p$  – amplituda fali padającej,  $\alpha$  – współczynnik przepuszczalności oraz  $\beta$  – współczynnik odbicia, opisane zależnościami:

$$\alpha = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (7)$$

gdzie:  $Z_1$  – impedancja falowa elementu sieci przed węzłem,  $Z_2$  – impedancja falowa elementu sieci za węzłem

W celu weryfikacji otrzymanych wyników symulacji komputerowych i oszacowania spodziewanych wyników, celem jest przeprowadzenie wstępnej analizy obliczeniowej na uproszczonym modelu z wykorzystaniem np. programu *MATLAB*. Właściwą analizę stanów przejściowych w układzie elektroenergetycznym przy zakłóceniach pochodzenia atmosferycznego można przeprowadzić w programie *PSCAD* lub *EMTP-ATP*.

W dalszej części niniejszego artykułu przedstawiono przykład analizy numerycznej zjawisk falowych zachodzących w rzeczywistym fragmencie układu elektroenergetycznego przeprowadzonych w programie *EMTP-ATP*.

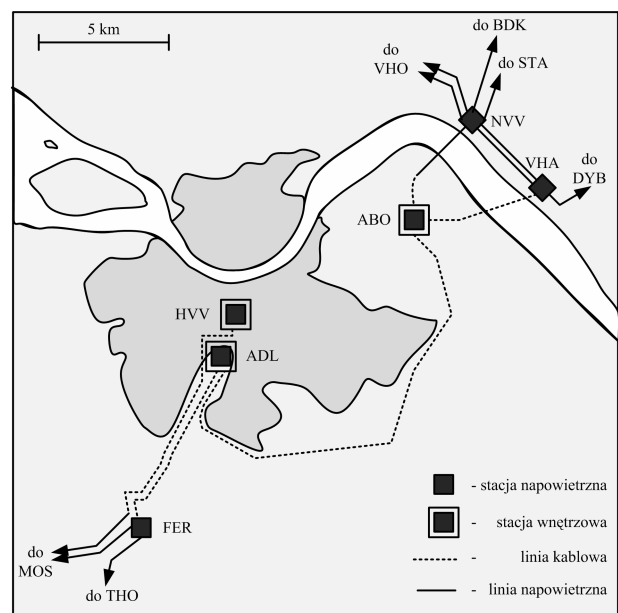
### 3. MODEL ANALIZOWANEGO UKŁADU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Przykład wykorzystania programu *EMTP-ATP* do symulacji efektów falowych rzeczywistych obiektach, przedstawiono na przykładzie sieci przesyłowej o napięciu znamionowym 150 kV, zasilającym miasto Aalborg.

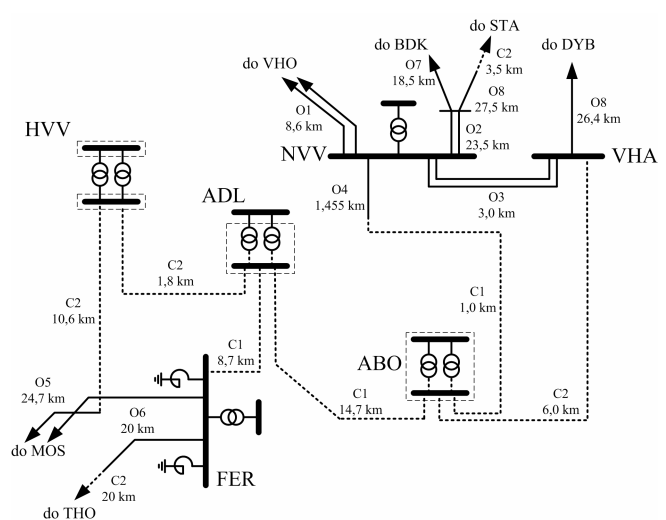
Lokalizację geograficzną opisywanej sieci przedstawiono na rysunku 2.

W symulacjach nie uwzględniono zastosowanych urządzeń ochrony napięciowej (ograniczników napięć) zlokalizowanych m.in. we wszystkich stacjach elektroenergetycznych. Ma to na celu wykazanie potrzeby zastosowania tego typu urządzeń przy opisywaniu efektów falowych spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi. Schemat elektryczny rozpatrywanej sieci, uwzględniający najważniejsze jej części, przedstawiono na rysunku 3.

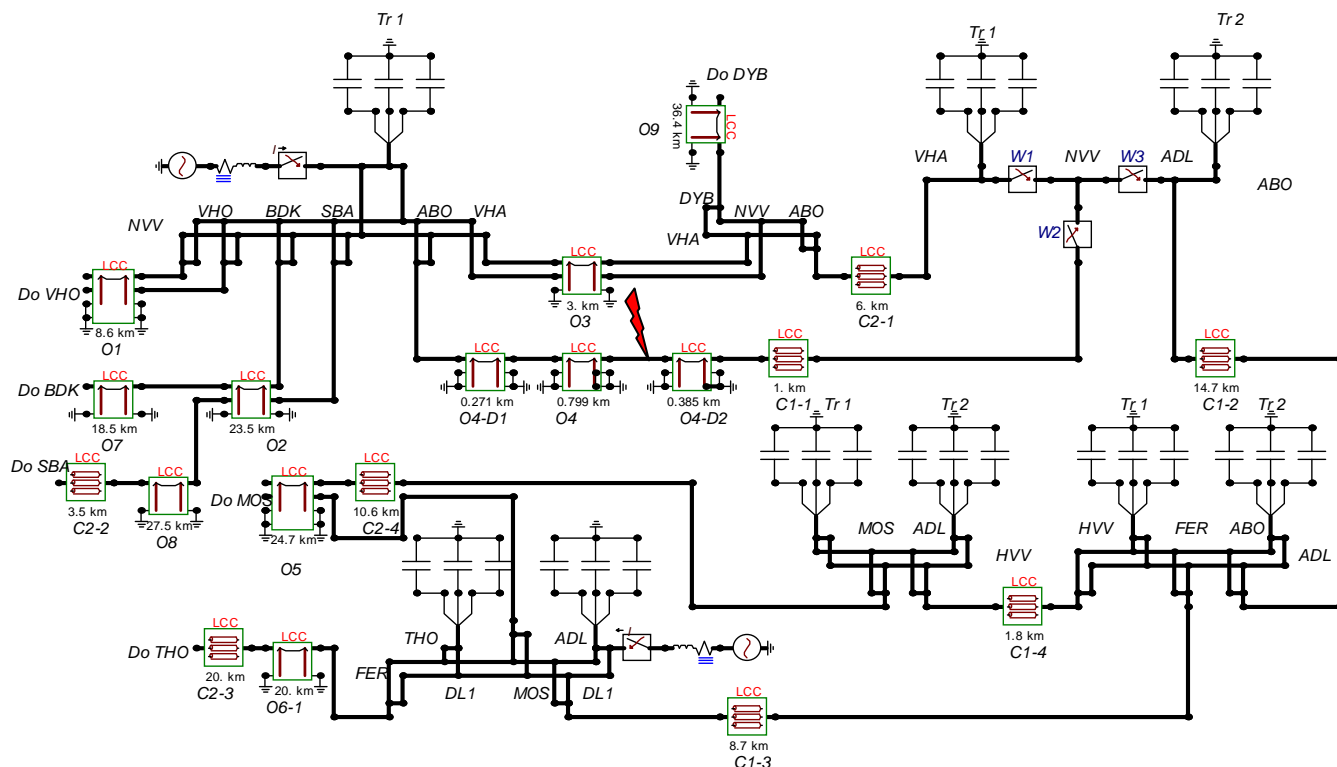
Analizowana sieć przesyłowa została odwzorowana w programie *EMTP-ATP* poprzez zamodelowanie wszystkich jej elementów istotnych z punktu zachodzących zjawisk. Model układu sieci przesyłowej 150 kV, wykonany w preprocesorze graficznym *ATPDraw* przedstawiono na rysunku 4. Linie napowietrzne (oznaczone, jako O1 - O9) oraz linie kablowe (oznaczone, jako C1 i C2) zostały zamodelowane przy użyciu dostępnych w programie modeli *JMart* [4, 5], zaś transformatory i dławiki odwzorowano w postaci pojemności doziemnych o wartości 3500 pF/fazę.



Rys. 2. Lokalizacja geograficzna rozpatrywanej sieci 150kV



Rys. 3. Uproszczony schemat rozpatrywanej sieci 150 kV



Rys. 4. Model sieci przesyłowej 150 kV w programie EMT-ATP

Każdy z modeli linii kablowej oraz napowietrznej uwzględnia dane związane m.in. z geometrią i właściwościami elektro-magnetycznymi danego elementu sieci.

#### 4. WYNIKI SYMULACJI

Celem symulacji jest ocena wielkości przepięć atmosferycznych na zaciskach transformatorów zlokalizowanych w stacji wewnętrznej ABO. Przepięcia spowodowane wyładowaniami atmosferycznymi mogą dotrzeć do stacji ABO z czterech obszarów, w których zlokalizowane są linie napowietrzne. Są to:

- Obszar I, obejmujący okolice stacji FER,
- Obszar II, obejmujący okolice stacji VHA,
- Obszar III, obejmujący okolice stacji NVV,
- Obszar IV, obejmujący okolice stacji ABO.

Przedstawione poniżej wyniki symulacji uwzględniają wyładowanie atmosferyczne do przewodów fazowych linii napowietrznej O4 o najwyższych konstrukcjach wsporczych, więc zagrożenia przepięciowe dla stacji ABO pochodzą z obszaru IV.

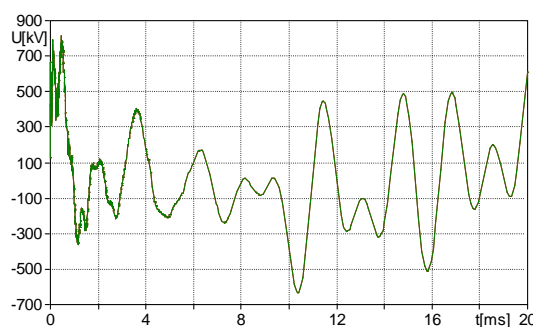
Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

- napięcie fazowe  $U_f = 122,5$  kV (źródło napięcia przemiennego zlokalizowane w stacjach NVV oraz FER),
- wyładowanie atmosferyczne odwzorowane jest za pomocą udarowego źródła prądowego o wartości szczytowej impulsu odpowiadającej krytycznej wartości szczytowej prądu pioruna, powyżej której – w myśl teorii elektrogeometrycznej [6] – nie jest możliwe uderzenie pioruna w przewód fazowy linii,
- przeanalizowano dwie pozycje wyłączników w stacji ABO (rys. 4):

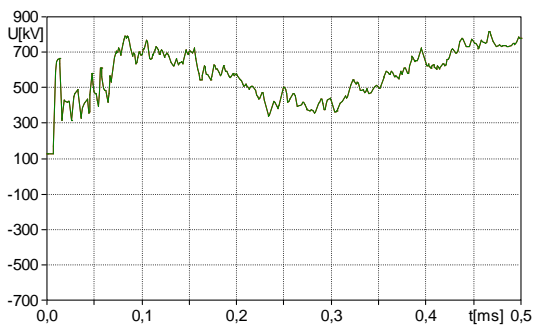
- wariant I: wyłączniki W1, W2 i W3 w pozycji zamkniętej,
- wariant II: wyłącznik W1 w pozycji otwartej, wyłączniki W2 i W3 w pozycji zamkniętej,
- symulacje dotyczyły bezpośredniego uderzenia pioruna w przewód fazowy linii napowietrznej O4, (na połączeniu odcinków O4 i O4-D2 (rys 4)), w chwili  $t = 0$  s.

Wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rysunkach 5 – 8, przy czym rysunki 5 i 6 dotyczą wariantu I, natomiast rysunki 7 i 8 – wariantu II.

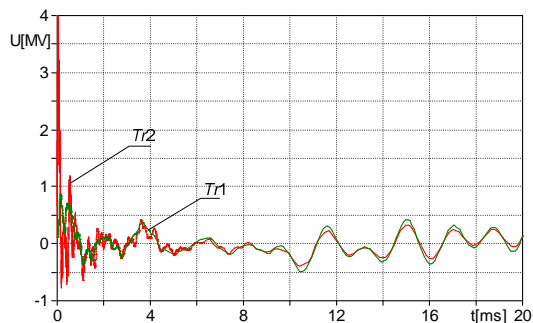
O kształcie i amplitudzie przepięć w istotnym stopniu decyduje konfiguracja połączeń elementów sieci. Zmiana konfiguracji spowodowana na przykład przełączeniami eksploatacyjnymi może wpłynąć na znaczny wzrost wartości szczytowej przepięcia wywołanego uderzeniem pioruna do przewodów fazowych linii elektroenergetycznej. Dla wariantu I, przy zamkniętych wyłącznikach W1 – W3 amplituda przepięć na zaciskach obu transformatorów jest taka sama i wynosi 820 kV (rys. 5).



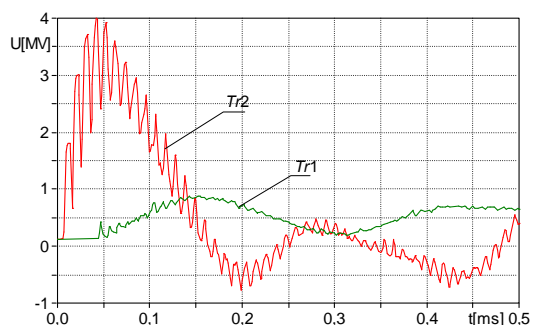
Rys. 5. Przebiegi napięć na zaciskach transformatorów Tr1 i Tr2 zlokalizowanych w stacji ABO – WARIANT I



Rys. 6. Przebiegi napięć na zaciskach transformatorów  $Tr1$  i  $Tr2$  zlokalizowanych w stacji ABO – WARIANT I



Rys. 7. Przebiegi napięć na zaciskach transformatorów  $Tr1$  i  $Tr2$  zlokalizowanych w stacji ABO – WARIANT II



Rys. 8. Przebiegi napięć na zaciskach transformatorów  $Tr1$  i  $Tr2$  zlokalizowanych w stacji ABO – WARIANT II

Z kolei przy otwartym wyłączniku  $W1$  (wariant II) zaobserwować można wyższe wartości przepięć na zaciskach transformatora  $Tr2$  ( $U_m = 393$  kV) niż na transformatorze  $Tr1$  ( $U_m = 890$  kV) (rys. 7).

Wykresy zamieszczone na rysunkach 6 i 8 ukazują różnice w kształtach początkowej fazy przepięć, na który ma wpływ konfiguracja układu elektroenergetycznego oraz zachodzące w nim zjawiska falowe.

#### 4. PODSUMOWANIE

Badania narażeń przepięciowych przeprowadzane są w rzeczywistych układach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć sporadycznie, głównie z przyczyn o charakterze technicznym, eksploatacyjnym oraz ekonomicznym. Z tego powodu – szczególnie w zakresie przepięć atmosferycznych – intensywnie rozwijane są obecnie metody teoretyczne analizy przepięć, wykorzystujące modele matematyczne zjawisk, w których zastosowanie znajduje komputerowa technika obliczeniowa.

Analiza propagacji fal przepięciowych w liniach napowietrznych jest problemem złożonym zarówno pod względem matematycznym, jak i numerycznym. Program komputerowy *EMTP – ATP* umożliwia efektywne rozwiązywanie problemów dotyczących analizy przepięć atmosferycznych w układach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Nowak W.: Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych, Rozprawy i monografie, zeszyt 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005.
2. Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
3. Atlason V.M., Benesz M., Kessel J.: Analysis and simulation of lightning performance of the 150 kV transmission system in Aalborg, a project of Projectgroup – EPSH-910, Institute of Energy Technology Aalborg University, 2008.
4. ATPDraw User's Manual 2002.
5. Alternative Transients Program. Theory Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987-92.
6. 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

## COMPUTER MODELING OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEM FOR SIMULATION OF TRAVELING WAVES CAUSED BY LIGHTNING DISCHARGES

**Keywords:** electrical power systems, lightning discharges, computer modelling, *EMTP-ATP*

In this paper a 150 kV transmission electrical power system in Aalborg model and simulation results of surge hazards generated by lightning stroke to the phase conductor of overhead line are presented. All simulation cases are made in simulation software *The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*.