

## ANALIZA NARAŻEŃ UKŁADÓW IZOLACYJNYCH TRANSFORMATORÓW ROZDZIELCZYCH OD PRZEPIĘĆ PIORUNOWYCH

Jakub FURGAŁ<sup>1</sup>, Piotr PAJĄK<sup>2</sup>

1. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
tel: (12) 617 37 61 fax: (12) 634 57 21 e-mail: furgal@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
tel: (12) 617 44 16 fax: (12) 634 57 21 e-mail: ppajak@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Niezawodna praca transformatorów energetycznych ma duże znaczenie dla ciągłości dostarczania energii elektrycznej. Przepięcia generowane podczas pracy układów elektroenergetycznych mają duży wpływ na stan techniczny transformatorów. Przebiegi przepięć oraz ich wartości maksymalne są zróżnicowane i zależą głównie od źródła. Szczególnie przepięcia piorunowe stanowią znaczne narażenia dla wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Podczas wyładowań piorunowych generowane są przepięcia o największych wartościach maksymalnych.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych przepięć narażających układy izolacyjne zewnętrzne transformatorów rozdzielczych podczas wyładowań piorunowych do napowietrznych linii zasilających. Do obliczeń wykorzystano program komputerowy Electromagnetics Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

**Słowa kluczowe:** transformatory, przepięcia piorunowe, symulacje komputerowe

### 1. WPROWADZENIE

Układy izolacyjne transformatorów energetycznych są narażone na działanie przepięć generowanych w układach elektroenergetycznych. Przepięcia o największych wartościach maksymalnych powstają podczas wyładowań piorunowych. Przebiegi przepięć piorunowych i ich wartości szczytowe są zróżnicowane, zależne od parametrów wyładowań, ochrony odgromowej linii napowietrznych oraz warunków propagacji fal napięciowych w sieciach elektrycznych. Wartości maksymalne przepięć piorunowych przekraczają wielokrotnie wartości maksymalne największego napięcia roboczego sieci. Linie przesyłowe są chronione od bezpośrednich wyładowań piorunowych przy zastosowaniu przewodów odgromowych ułożonych wzdłuż przewodów fazowych na całej długości linii, linie średnich napięć są natomiast narażone na działanie wyładowań z powodu braku ochrony odgromowej. Transformatory energetyczne są chronione od bezpośredniego działania przepięć generowanych podczas pracy układów elektroenergetycznych przy zastosowaniu ograniczników przepięć z tlenków metali. Ograniczniki tlenkowe wyróżniają dużą niezawodność działania, stabilność parametrów w czasie oraz dobre charakterystyki ochronne. Wartości maksymalne oraz przebiegi przepięć na zaciskach chronionych

transformatorów podczas wyładowań piorunowych do linii napowietrznych są zależne od parametrów zastosowanych ograniczników przepięć oraz ich lokalizacji. Napięcia obniżone ograniczników są jednak około trzykrotnie większe od napięć znamionowych urządzeń chronionych. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych na działających ogranicznikach przepięć są zbliżone do przebiegu prostokątnego. Przebieg napięcia i wartości maksymalne przepięć na chronionym transformatorze mogą się zmieniać w wyniku wielokrotnych odbić fali napięciowej między punktem zainstalowania ograniczników a zaciskami wejściowymi transformatora. Pomimo zastosowanej ochrony przepięciowej w układach elektroenergetycznych przepięcia piorunowe są źródłem potencjalnych narażeń układów izolacyjnych transformatorów.

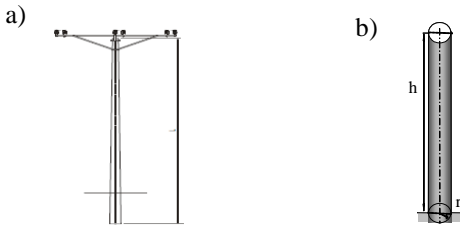
W artykule przedstawiono metodę i wyniki symulacji przepięć piorunowych narażających układy izolacyjne transformatorów rozdzielczych. Symulowano przebiegi napięć fazowych generowanych podczas wyładowań piorunowych do linii napowietrznej zasilającej transformator. Na podstawie wyników symulacji analizowano wpływ sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią oraz odległości między ogranicznikami, a chronionym transformatorem na przebiegi i wartości maksymalne przepięć piorunowych.

### 2. MODELE CYFROWE URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

Dokładność wyników symulacji przepięć piorunowych w sieciach elektrycznych jest zależna głównie od dokładności modeli cyfrowych urządzeń elektroenergetycznych oraz zjawisk w warunkach generowania i propagacji przepięć. Konstrukcje słupów linii napowietrznych są zróżnicowane. Modele słupów linii są opracowywane po zastąpieniu ich odpowiednią figurą geometryczną [1]. W przypadku słupów o małej wysokości stosowanych w liniach napowietrznych rozdzielczych można stosować uproszczony model, w którym sylwetkę słupa zastępuje się bryłą w postaci walca (rys. 1b). Tego typu słupek jest reprezentowany przez impedancję falową oraz prędkość propagacji fali wzdłuż słupa. Impedancja falowa jest wyznaczana na podstawie wymiarów słupa z wykorzystaniem wzoru:

$$Z = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $Z$  - impedancja falowa słupa,  $\Omega$ ,  
 $h$  - wysokość słupa, m,  
 $r$  - promień słupa, m.



Rys. 1. Widok strunobetonowego słupa linii średniego napięcia (a) i jego model w postaci walca (b) [2]

Właściwości rezystancji udarowej w chwili przewodzenia prądu udarowego są inne w porównaniu do wartości statycznych. Wynika to z faktu pozornego zwiększenia wymiarów poprzecznych uziomu podczas przepływu prądu udarowego. Przy czym wielkość obszaru, w którym następuje rozplływ prądu, ściśle zależy od jego wartości szczytowej [3][4]. Rezystancję udarową można określić na podstawie zależności:

$$R_u = \frac{\rho}{2\pi l} \ln(4\pi l^2) \frac{E_g}{\rho i_{max}} \quad (2)$$

gdzie:  $\rho$  - rezystywność gruntu, [ $\Omega\text{m}$ ],  
 $l$  - długość uziomu, [m],  
 $E_g$  - graniczna wartość natężenia pola elektrycznego, po przekroczeniu której następuje jonizacja gruntu, [kV/m].

Prędkość propagacji fali w słupie strunobetonowym jest zbliżona do prędkości światła. Jednak w momencie rozplwy fali w gruncie jej prędkość znacznie maleje i jest równa w przybliżeniu połowie prędkości światła. Zależność rezystancji uziomu od wartości szczytowej udaru prądowego jest wyrażona w postaci [3]:

$$R_u(i) = \frac{R_{st}}{\sqrt{1 + \frac{i}{I_g}}} \quad (3)$$

gdzie:  $R_{st}$  - rezystancja uziomu słupa obliczona dla małych prądów i małych częstotliwości, [ $\Omega$ ],  
 $I_g$  - natężenie prądu, przy którym następuje jonizacja gruntu, [A], obliczone według (4),  
 $E_0 = 300 - 400 \text{ kV/m}$  [5].

$$I_g = \frac{\rho E_0}{2\pi R_0^2} \quad (4)$$

Wytrzymałość elektryczna izolatorów liniowych w warunkach oddziaływania przepięć piorunowych jest zależna od wartości szczytowej fali przepięciowej oraz jej przebiegu [6][7]. Model izolatorów, stosowany w obliczeniach przedstawionych w artykule, uwzględnia pojemność i wytrzymałość elektryczną izolatorów. Ma on postać modelu wyłącznika o odpowiedniej wytrzymałości powrotnej, połączonego równolegle z kondensatorem reprezentującym pojemność izolatorów. W każdym kroku symulacji obliczana jest wartość napięcia na izolatorze i porównywana z napięciem przeskoku, obliczanym ze wzoru:

$$V_{1-2} = \left( 400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) L \quad (5)$$

gdzie:  $V_{1-2}$  - napięcie przeskoku na izolatorze, [kV],  
 $t$  - czas jaki upłynął od wyładowania piorunowego, [ $\mu\text{s}$ ],  
 $L$  - długość izolatora, [m].

Jeżeli wartość napięcia na izolatorze jest większa od napięcia przeskoku to wyłącznik jest zamykany.

Model przewodów fazowych linii napowietrznej zawiera parametry elektryczne linii rozłożone i zależne od częstotliwości. Model taki generowany jest przez procedurę JMarti w programie Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

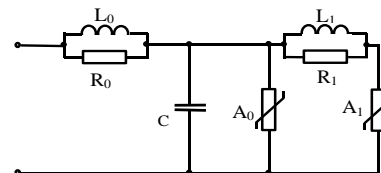
Model prądu kanału wyładowania piorunowego uwzględnia wartość maksymalną i przebieg prądu. Zgodnie z zaleceniami CIGRE prąd wyładowania piorunowego ma przebieg o wklęsłym czole i czasie narastania do wartości szczytowej rzędu kilku mikrosekund oraz czasie opadania do połowy wartości szczytowej rzędu kilkudziesięciu mikrosekund. Podstawowe parametry wyładowania piorunowego ujemnego przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1: Wybrane parametry dla pierwszej składowej wyładowania piorunowego o biegunowości ujemnej [3]

parametr	prąd pioruna $I$			
	$3 \text{ kA} \leq I \leq 20 \text{ kA}$		$I > 20 \text{ kA}$	
	$M$	$B$	$M$	$\beta$
$I_F$ , kA	61,1	1,33	33,3	0,605
$S_m$ , kA/ $\mu\text{s}$	24,3	0,599	24,3	0,599
$t_{hs}$ , $\mu\text{s}$	77,5	0,557	77,5	0,557

$M$  - mediana,  $\beta$  - parametr określający nachylenie rozkładu,  $I_F$  - wartość szczytowa,  $S_m$  - maksymalna stromość narastania,  $t_{hs}$  - czas do półszczytu

Schemat zastępczy beziskiernikowych ograniczników przepięć z tlenków metali, stosowany w warunkach oddziaływania przepięć przedstawiono na rysunku 2 [8].



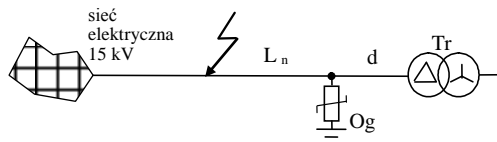
Rys. 2. Schemat zastępczy ograniczników przepięć z tlenków metali

Schemat odzwierciedla charakterystyki dynamiczne napięciowo-prądowe uwzględniające wpływ przebiegu prądu udarowego i wartości szczytowej na przebiegi i wartości maksymalne napięcia na ogranicznikach.

Model transformatora, zastosowany do obliczeń przepięć piorunowych wygenerowano na podstawie danych znamionowych transformatora z zastosowaniem procedury BCTRAN w programie EMTP-ATP.

### 3. CHARAKTERYSTYKA SIECI DOŚWIADCZALNEJ

Wykonano symulacje przepięć generowanych podczas wyładowań piorunowych narażających transformatory w sieci rozdzielczej, której schemat przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat fragmentu sieci rozdzielczej:  $L_n$  - linia napowietrzna,  $Og$  - ograniczniki przepięć z tlenków metali,  $Tr$  - transformator rozdzielczy,  $d$  - odległość między punktem zainstalowania ograniczników przepięć a transformatorem

Napowietrzna linia zasilająca transformator rozdzielczy  $Tr$  zawiera przewody typu AFL6 70 mm<sup>2</sup> (tab. 2). Łączna długość linii wynosi 4 km. Model linii opracowano przez połączenie szeregowe modeli pręseł, z których każde ma długość 100 m.

Tablica 2: Podstawowe parametry przewodów typu AFL6 70 mm<sup>2</sup>

parametr	jednostka	wartość
przekrój części aluminiowej	[mm <sup>2</sup> ]	70
średnica części stalowej	[mm]	3,75
rezystancja 1 km przewodu przy 20°C	[Ω]	0,441

Podstawowe parametry elektryczne transformatora rozdzielczego  $Tr$  (rys. 3) 250 kVA 15/0,4 kV zamieszczono w tablicy 3.

Tablica 3: Podstawowe parametry elektryczne transformatora rozdzielczego  $Tr$

parametr	wartość
$S_n$ [kVA]	250
$U_n$ [kV]	15/0,4
$U_z$ [%]	4,5
$\Delta P_{Fe}$ [kW]	0,486
$\Delta P_{Cu}$ [kW]	3,509
$I_0$ [%]	1,0

Dane znamionowe ograniczników przepięć zastosowanych do ochrony transformatora 15 kV zamieszczono w tablicy 4.

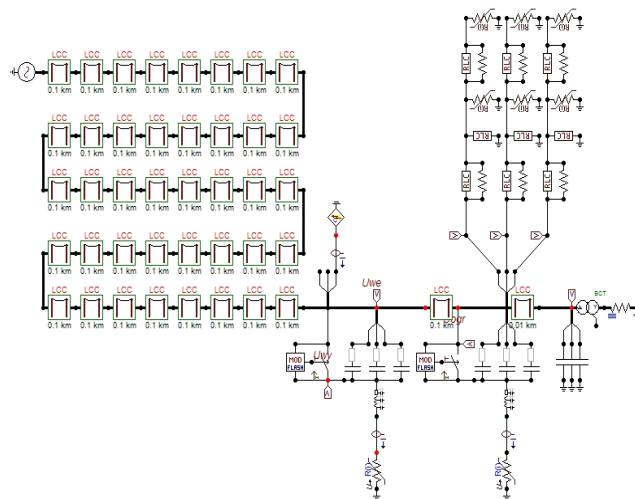
Tablica 4: Napięcia obniżone ograniczników przepięć z tlenków metali typu POLIM-D12N oraz POLIM-D18N [9]

typ ogranicznika	$U_n$	$U_c$	napięcie obniżone przy udarach prądowych				
			8/20 μs		30/60 μs		
			5 kA	10 kA	20 kA	0,25 kA	0,5 kA
POLIM-D18N	22,5	18	58,6	63,0	71,6	48,2	49,8
POLIM-D12N	15	12	39,1	42,0	47,7	32,2	33,2

Ograniczniki o napięciu pracy ciągłej  $U_c$  wynoszącym 12 kV są stosowane w skompensowanej sieci 15 kV. Ograniczniki, dla których wartość napięcia  $U_c$  wynosi 18 kV są natomiast stosowane w sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi.

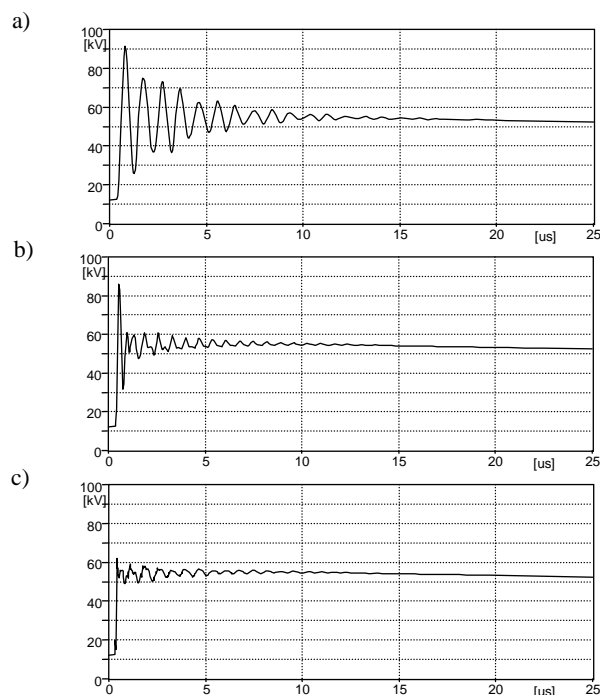
#### 4. WYNIKI SYMULACJI PRZEPIĘĆ

Model cyfrowy sieci elektrycznej z transformatorem rozdzielczym opracowany w programie komputerowym Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP) zamieszczono na rysunku 4.

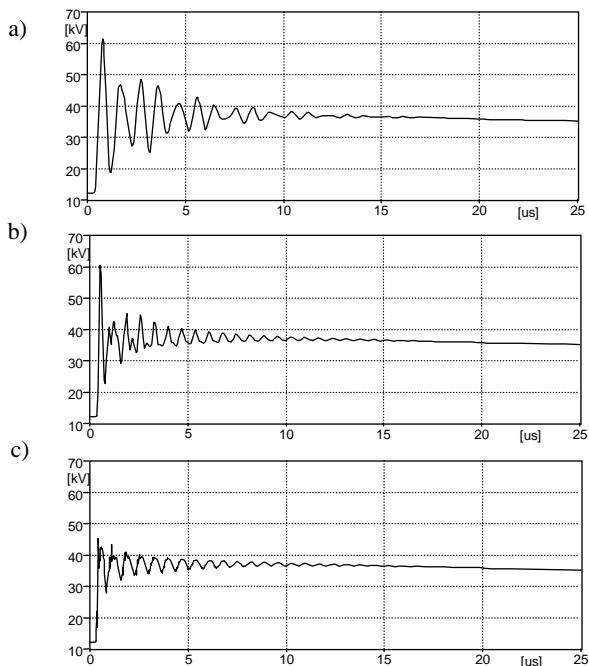


Rys. 4. Model fragmentu sieci elektrycznej przedstawiony na rysunku 3, opracowany w programie Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP)

Wykonano symulacje przepięć doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora rozdzielczego  $Tr$  (rys. 3) generowanych podczas wyładowania piorunowego do napowietrznej linii zasilającej w odległości 100 m od transformatora. Obliczenia wykonano dla sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi, gdzie stosowane są ograniczniki przepięć o napięciu pracy ciągłej  $U_c$  wynoszącym 18 kV oraz w sieci z kompensacją prądu ziemnozwarciowego z ogranicznikami o  $U_c$  równym 12 kV. Wyniki obliczeń przepięć, wykonane dla wybranych odległości  $d$  między ogranicznikami a transformatorem, narażających transformator pracujący w sieci z punktem neutralnym izolowanym przedstawiono na rysunku 5, a generowane na zaciskach transformatora w sieci skompensowanej na rysunku 6.

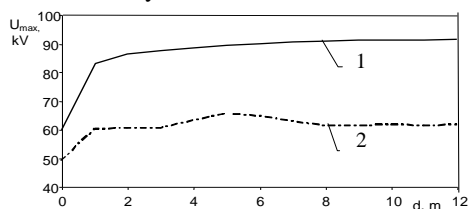


Rys. 5. Przebiegi przepięć doziemnych na zaciskach transformatora 15 kV, podczas oddziaływania przepięcia piorunowego dla różnych odległości  $d$  pomiędzy ogranicznikiem a transformatorem: a)  $d = 12$  m, b)  $d = 2$  m, c)  $d = 0$  m.



Rys. 6. Przebiegi napięcia fazowego na zaciskach transformatora 15 kV, podczas oddziaływania przepięcia piorunowego dla różnych odległości  $d$  między ogranicznikiem a transformatorem: a)  $d = 12$  m, b)  $d = 2$  m, c)  $d = 0$  m.

Na podstawie wyników symulacji przebiegów przepięć doziemnych (rys. 5, 6) opracowano zależności wartości maksymalnych przepięć od odległości  $d$  między ogranicznikami a chronionym transformatorem. Ich wykresy zamieszczono na rysunku 7.



Rys. 7. Zależność wartości maksymalnych przepięć doziemnych na zaciskach transformatora rozdzielczego 15 kV od odległości między ogranicznikami przepięć a transformatorem  $U_{max}=f(d)$ : 1 – sieć z punktem neutralnym izolowanym od ziemi, 2 – sieć z kompensacją prądu ziemnozwarciowego

Wyniki symulacji przepięć piorunowych, przedstawionych na rysunkach 5, 6 i 7 potwierdzają, że podczas wyładowań piorunowych transformatory rozdzielcze są narażone na oddziaływanie przepięć o wartościach znacznie przekraczających wartości maksymalne napięć roboczych sieci. Przepięcia te zależą od sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią oraz od odległości między ogranicznikami, a chronionym transformatorem.

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje potwierdzają, że narażenia transformatorów rozdzielczych od przepięć piorunowych są najmniejsze w sieciach z zastosowaną kompensacją prądu ziemnozwarciowego w przypadku, gdy ograniczniki są instalowane bezpośrednio na zaciskach wejściowych transformatora. Przepięcia piorunowe narażające transformatory w sieciach z punktem neutralnym izolowanym od ziemi są większe z powodu wzrostu wartości napięcia pracy ciągłej ograniczników stosowanych w takich sieciach. Również ze zwiększaniem odległości między ogranicznikami a transformatorem wzrastają wartości maksymalne przepięć piorunowych na zaciskach transformatorów.

## LITERATURA

1. Gutierrez J. A. R., Moreno P., Guardado L., Naredo J. L.: Comparison of Transmission Tower Models for Evaluating Lightning Performance, IEEE Bologna Power Techn. Conference, 23-26 June 2003, Bologna, Italy
2. Wagner C. F., Hileman A. R.: A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines III-a simplified method: stroke to tower, AIEE Trans. on PAS, vol. 79, 1960, pp. 589 - 603
3. CIGRÉ Working Group 33-01 (Lighting) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, Publication No. 63, 1991
4. IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group: Modeling Guidelines For Fast Front Transients. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 11, No. 1, Jan. 1996, pp. 493 - 506
5. Mousa A. M.: The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1669 - 1677
6. Pignini A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G.: Performance of Large Air Gaps Under Lightning Overvoltages: Experimental Study and Analysis of Accuracy of Predetermination Methods, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1379 - 1392
7. James T. Whitehead, William A. Chisholm: A Report of the Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 8, No. 3, July 1993, pp. 1254-1267
8. IEEE Working Group 3.4.11: Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp. 302 - 309
9. Ograniczniki przepięć typu POLIM-D. Katalog ABB Zwar S.A.

## ANALYSIS OF IMPACT OF LIGHTNING OVERVOLTAGES ON INSULATION SYSTEMS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS

**Keywords:** transformers, lightning overvoltages, computer simulations

Reliable work of power transformers is very important to proper electricity supply. Overvoltages generated during operation of electrical power systems have a significant impact on the technical condition of power transformers. The courses of overvoltages and its maximal values are differential and depend on overvoltage sources. Overvoltages generated during lightning strokes have the largest maximal values.

The results of computer simulations for overvoltages which create exposure for insulation systems of power transformers during lightning strokes to overhead lines are presented in the paper. Calculations were done, using the computer program Electromagnetics Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP).