

doi:10.15199/48.2015.11.53

Analiza przebiegów przenoszonych przez transformatory rozdzielcze do sieci niskiego napięcia

Streszczenie: Analiza narażeń napięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych powinna obejmować także napięcia przenoszone przez transformatory. Szczególne znaczenie ma analiza napięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze do sieci niskiego napięcia z powodu zwiększającej się liczby urządzeń elektrycznych i elektronicznych o małej odporności na oddziaływanie napięć. Narażenia napięciowe urządzeń elektrycznych są zależne od wartości maksymalnych i przebiegów napięć oraz warunków propagacji napięć w sieciach elektrycznych oraz ochrony napięciowej. W artykule przedstawiono analizę propagacji napięć przenoszonych przez transformator rozdzielczy w typowych fragmentach sieci elektrycznych niskiego napięcia. Podstawą analizy były symulacje napięć wykonane przy zastosowaniu programu Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP). Do modelowania transformatora zastosowano model wysokoczęstotliwościowy, opracowany na podstawie wyników pomiarów funkcji przenoszenia.

Abstract: Analysis of overvoltage impacts of insulation systems for electrical devices should include also overvoltages transferred through transformers. Special mean have analysis of overvoltages propagated through distribution transformers to low voltage networks because number of electrical devices and electronic equipment with small overvoltage hardness is more and more large. Overvoltages impact on electrical devices are depended on maximal values and time courses of overvoltages and condition of overvoltage propagation in electrical networks and overvoltage protection. Analysis of propagation for overvoltages transferred through distribution transformers in typical part of low voltage networks is presented in the paper. As a basis of the analysis were results of simulations done by use of Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP). Distribution transformer was modeled by use of high frequency model of transformer prepared on basis of measurement results of transfer functions. (**Analysis of overvoltages transferred through distribution transformers to low voltage networks**).

Słowa kluczowe: napięcia przenoszone, symulacje komputerowe, propagacja napięć, sieci niskiego napięcia

Keywords: transferred overvoltages, computer simulations, propagation of overvoltages, low voltage networks

Wprowadzenie

Napięcia przenoszone przez transformatory powstają w warunkach wylądowań piorunowych, czynności łączeniowych lub niektórych stanów awaryjnych i są efektem zjawisk przejściowych w transformatorach i interakcji transformatorów z układami elektroenergetycznymi uwarunkowanej propagacją napięć zależnie od połączeń i impedancji falowych linii, urządzeń elektroenergetycznych i odbiorników energii elektrycznej [1-3]. Napięcia przenoszone stanowią narażenia układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych pracujących na różnych poziomach napięć. Zagadnienia napięć przenoszonych są między innymi treścią prac badawczych prowadzonych w ramach Grupy Roboczej A2/C4.39 CIGRE, powołanej w 2008 roku, obejmującej swym zakresem problemy interakcji transformatorów i układów elektroenergetycznych [1]. Napięcia przenoszone przez transformatory stanowią narażenia układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych. Wzrost wymagań odnośnie do niezawodności pracy urządzeń i ciągłe dążenie do optymalizacji ich konstrukcji wymusza prowadzenie analiz narażeń napięciowych urządzeń elektrycznych [4,5]. Szczególnie dużego znaczenia nabierają te uwarunkowania w odniesieniu do urządzeń elektrycznych niskiego napięcia, zasilanych przez transformatory rozdzielcze, z powodu małej odporności napięciowej i dążenia do ograniczenia kosztów spowodowanych awariami.

Podstawą analiz układów izolacyjnych od napięć są głównie wyniki symulacji prowadzone przy zastosowaniu specjalistycznych programów komputerowych. Symulacje napięć przenoszonych przez transformatory propagujących w układach elektrycznych wymagają stosowania modeli transformatorów uwzględniających zjawiska przejściowe zachodzące w uzwojeniach w warunkach oddziaływania napięć przejściowych o zróżnicowanych wartościach maksymalnych i przebiegach, zawierających zwykle składowe wysokoczęstotliwościowe powstających w układach elektroenergetycznych w warunkach eksploatacji [6-7].

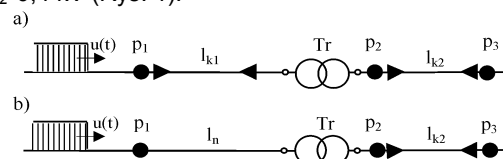
W artykule przedstawiono analizę napięć propagujących w typowych fragmentach sieci elektrycznej

średniego i niskiego napięcia przenoszonych przez transformator rozdzielczy. Podstawą analizy były symulacje napięć łączeniowych i piorunowych, wykonane przy zastosowaniu programu komputerowego *Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP)* [8]. Do modelowania transformatora zastosowano model wysokoczęstotliwościowy, opracowany na podstawie wyników rejestracji charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia.

Badania wpływu linii energetycznych na propagację napięć przenoszonych w sieciach niskiego napięcia

Symulacje obejmowały napięcia przenoszone przez transformator 250 kVA (Tabela 1), pracujący w dwu układach:

- **układ 1:** linia kablowa l_{k1} 15 kV, linia kablowa l_{k2} 0,4 kV,
- **układ 2:** linia napowietrzna l_n 15 kV [9], linia kablowa l_{k2} 0,4 kV (Rys. 1).



Rys. 1. Schematy typowych fragmentów sieci rozdzielczej z transformatorem Tr 250 kVA: a - transformator połączony z liniami kablowymi l_{k1} i l_{k2} , b - transformator połączony z linią napowietrzną l_n i kablową l_{k2} (p_1 - punkt, oddziaływania udaru napięciowego, p_2, p_3 - punkty, w których wykonano symulacje napięć)

Linie kablową l_{k1} wykonano z zastosowaniem kabla typu YHKXS 8,7/15 kV, a linie l_{k2} - kabla typu YLY 0,6/1kV [10].

Symulacje obejmowały napięcia przenoszone w uzwojeniach 0,4 kV przy oddziaływaniu udaru napięciowego prostokątnego o czasie do wartości maksymalnej $1 \mu s$ w punkcie p_1 między fazami AB linii 15 kV zasilającej transformator Tr (Rys. 1). Udary napięciowe o przebiegu prostokątnym odzwierciedlają w przybliżeniu przebiegi napięcia na ogranicznikach napięć. Długości linii zasilających l_{k1} , l_n oraz linii zasilanej l_{k2} zmieniano w zakresie od 10 m do 10 km.

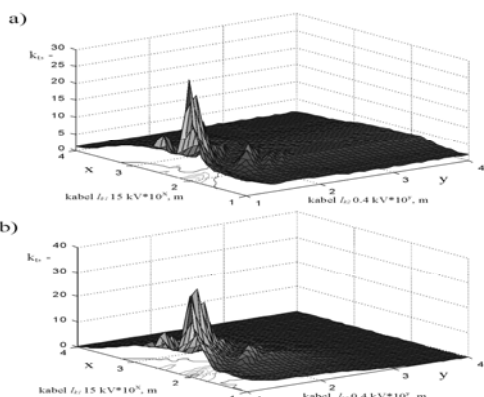
Tabela 1: Podstawowe parametry transformatora 250 kVA [11]

parametr	S_n	U_n	U_z	ΔP_{fe}	ΔP_{cu}	I_0
jednostka	kVA	kV	%	kW	kW	%
wartość	250	15,75/0,4	4	0,486	3,509	1

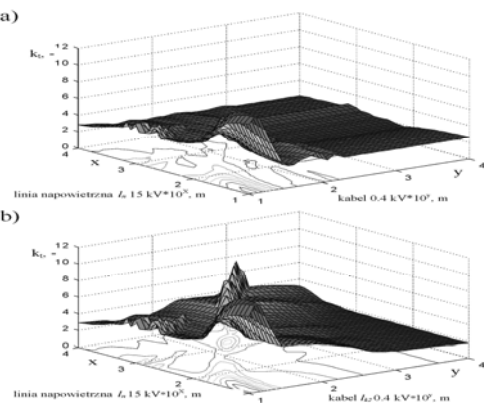
Symulacje przepięć wykonano w programie *EMTP-ATP*. Do modelowania transformatora zastosowano opracowany model wysokoczęstotliwościowy. Podstawą modelu są zależności napięciowo prądowe, które w wybranym zakresie częstotliwości realizują sprzężenia indukcyjno-pojemnościowe między uzwojeniami transformatora. Konstruowanie modelu wysokoczęstotliwościowego transformatora obejmuje następujące etapy:

- wyznaczenie doświadczalnych charakterystyk częstotliwościowych transmitancji transformatora,
- zastąpienie doświadczalnych charakterystyk amplitudowo-fazowych funkcjami wymiernymi w dziedzinie operatorowej,
- określenie struktury oraz parametrów elementów układu zastępczego *RLC*, realizującego funkcje przenoszenia transformatora [12-15].

Do modelowania linii l_n oraz l_{k1} i l_{k2} zastosowano model *JMart* [8].



Rys. 2. Zależność przepięć przenoszonych w uzwojeniu 0,4 kV od długości linii kablowej zasilającej l_{k1} i linii kablowej l_{k2} (układ 1, Rys. 1) a - przepięcia na zaciskach fazy A uzwojenia 0,4 kV (Rys. 1a, punkt p_2), b - przepięcia w fazie A na końcu linii l_{k2} (Rys. 1a, punkt p_3)



Rys. 3. Zależność przepięć przenoszonych w uzwojeniu 0,4 kV od długości linii napowietrznej zasilającej l_n i linii kablowej l_{k2} (układ 2, Rys. 1): a-przepięcia na zaciskach uzwojenia 0,4 kV fazy A (Rys. 1b, punkt p_2), b-przepięcia w fazie A na końcu linii l_{k2} (Rys. 1b, punkt p_3)

Wyniki symulacji mają postać zależności wartości maksymalnych przepięć doziemnych:

- na zaciskach uzwojeń 0,4 kV transformatora 250 kVA (Rys. 1, punkt p_2),
- na końcu nieobciążonej linii kablowej l_{k2} zasilanej przez transformator (Rys. 1, punkt p_3)

od długości linii l_n , l_{k1} i l_{k2} połączonych z transformatorem (Rys. 1). Przepięcia przenoszone przez transformator wyrażono przez obliczenie wartości współczynników przepięć:

$$(1) \quad k_t = \frac{U_{oLVmax}}{U_{pLVmax}}$$

gdzie: U_{oLVmax} , U_{pLVmax} - odpowiednio wartości maksymalne przepięcia na zaciskach uzwojenia dolnego napięcia transformatora oraz napięcia fazowego w sieci 0,4 kV.

Długości linii zasilających oraz zasilanych przez transformator mają wpływ na wartości maksymalne przepięć przenoszonych w uzwojeniach 0,4 kV. Długości linii l_n , l_{k1} i l_{k2} , dla których przepięcia przenoszone na zaciskach uzwojeń 0,4 kV są największe, zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2: Wartości maksymalne przepięć przenoszonych na zaciskach fazy A uzwojenia 0,4 kV transformatora 250 kVA (punkt p_2) w układach elektrycznych pokazanych na rysunku 1 (na podstawie rysunków 2 i 3)

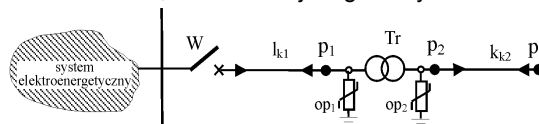
długości linii l_{k1} i l_n	długości linii l_{k2}	k_t
m	m	pu
układ 1: Rys. 1a - punkt p_2		
100	10	20,5
układ 2: Rys. 1b - punkt p_3		
20	14	9,2

Przepięcia osiągają największe wartości, przekraczające kilkakrotnie przepięcia wynikające z przekładni znamionowej transformatora, przy takich długościach linii, dla których częstotliwość drgań napięcia powstających w wyniku odbić fali od zacisków transformatora i końca linii zasilającej 15 kV jest równa częstotliwości rezonansowej układu transformator - linia kablowa 0,4 kV. Symulacje wykazały również, że przepięcia doziemne na końcu nieobciążonej linii kablowej l_{k2} , w wyniku wielokrotnych odbić fal napięciowych, osiągają wartości większe od wartości przepięć na zaciskach uzwojeń 0,4 kV.

Analiza przepięć łączeniowych przenoszonych przez transformator

Podstawą analizy były wyniki symulacji przepięć przenoszonych przez transformator podczas załączania transformatora do sieci wykonanych dla dwu układów (Rys. 4) zawierających linie l_{k1} i l_{k2} o różnych długościach:

- **układ 3:** $l_{k1} - 100$ m, $l_{k2} - 10$ m: długości linii krytyczne tzn. takie, dla których przepięcia przenoszone osiągają największe wartości (Rys. 1a, Rys. 2, Tabela 2),
- **układ 4:** $l_{k1} - 100$ m, $l_{k2} - 1000$ m: tj. długości wybrane linii l_{k1} i l_{k2} .



Rys. 4. Schemat układu do symulacji przepięć przenoszonych podczas włączania transformatora 250 kVA do sieci 15 kV: l_{k1} - linia kablowa 15 kV, l_{k2} - linia kablowa 0,4 kV, Tr - transformator 250 kVA, op_1 , op_2 - ograniczniki przepięć

Wynikiem symulacji są przepięcia przenoszone przez transformator:

- bez ochrony przepięciowej,
- chroniony ogranicznikami przepięć op_1 typu *POLIM-D 12* [16],
- chroniony ogranicznikami op_1 i op_2 typu *LOVOS 5/280* (Rys. 4) [17].

Beziskiernikowe ograniczniki przepięć modelowano przy zastosowaniu modelu wysokoczęstotliwościowego [18].

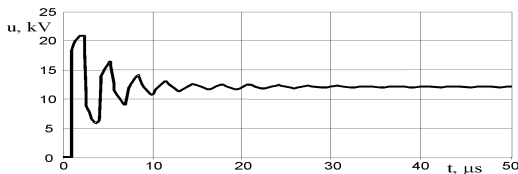
Przebiegi przepięć doziemnych w punktach p_1 , p_2 i p_3 układu (Rys. 4) podczas załączania transformatora 250 kVA, połączonych z liniami l_{k1} , l_{k2} o długościach odpowiednio 100 m i 10 m (**układ 3**), chronionego od przepięć ogranicznikami op_1 lub op_2 przedstawiono na rysunkach 5 - 7. Wartości współczynników przepięć doziemnych w punktach p_1 , p_2 i p_3 zamieszczono w tabeli 3.

Wartości współczynnika k przepięć doziemnych na zaciskach uzwojeń 15 kV transformatora (Rys. 3, punkt p_1) obliczono ze wzoru:

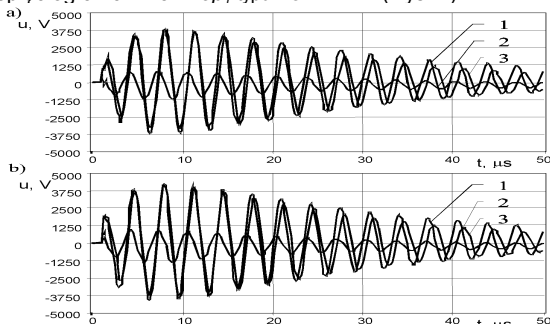
$$(2) \quad k = \frac{U_{o HV max}}{U_{p HV max}}$$

gdzie: $U_{o HV max}$, $U_{p HV max}$ - odpowiednio wartości maksymalne przepięcia na zaciskach uzwojenia górnego napięcia i napięcia fazowego w sieci 15 kV.

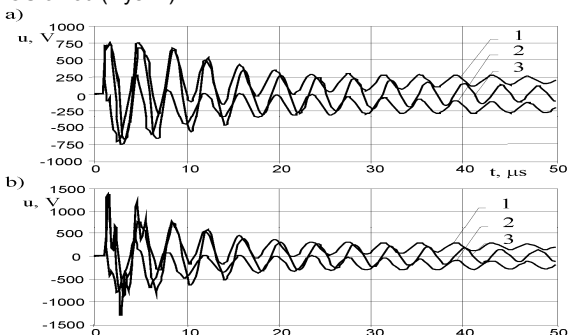
Wartości współczynnika k_t przepięć przenoszonych przez transformator w punktach p_2 i p_3 sieci 15/0,4 kV (Rys. 3) obliczono ze wzoru (1).



Rys. 5. Przebieg przepięcia doziemnego w fazie A uzwojenia 15 kV (punkt p_1 , Rys. 4) podczas załączania transformatora 250 kVA w układzie z liniami: l_{k1} - 100 m, l_{k2} - 10 m (układ 3) chronionego do przepięć ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12 (Rys. 4)



Rys. 6. Przebiegi przepięć doziemnych na zaciskach w uzwojenia 0,4 kV (punkt p_2) podczas załączania transformatora 250 kVA w układzie z liniami: l_{k1} - 100m, l_{k2} - 10 m (układ 3, Rys. 4), chronionego ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12: a - bez ograniczników op_2 typu LOVOS 5/280, b - z ogranicznikami op_2 typu LOVOS 5/280 (Rys. 4)



Rys. 7. Przebiegi przepięć doziemnych na końcu linii l_{k2} (0,4 kV) (Rys. 3, punkt p_3) podczas załączania transformatora 250 kVA w układzie z liniami: l_{k1} - 100m, l_{k2} - 1000m (układ 4, Rys. 4) z ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12: a - bez ograniczników op_2 typu LOVOS 5/280, b - z ogranicznikami op_2 typu LOVOS 5/280

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że przepięcia łączeniowe przenoszone przez transformator, propagujące w sieci niskiego napięcia 0,4 kV, zależą od długości linii połączonych z transformatorem. Przepięcia osiągają największe wartości w układzie 3, w którym transformator jest połączony z liniami l_{k1} , l_{k2} o długościach odpowiednio 100 m i 10 m, tzn. takich, dla których częstotliwość drgań napięcia powstającego w wyniku wielokrotnych odbić fali w linii zasilającej l_{k1} 15 kV jest równa częstotliwości układu: transformator - linia kablowa l_{k2} 0,4 kV.

Ochrona transformatorów od przepięć przenoszonych łączeniowych wymaga stosowania ograniczników przepięć, chroniących uzwojenia górnego i dolnego napięcia szczególnie wówczas, gdy są one połączone z liniami kablowymi o niewielkich długościach. Ograniczniki przepięć

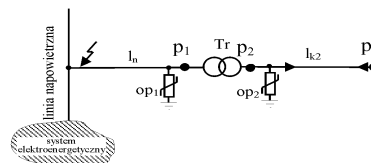
powinny być instalowane także na końcach linii 0,4 kV, gdyż przepięcia w liniach nieobciążonych o niewielkich długościach mogą być wyższe od przepięć na zaciskach uzwojenia zasilającego. Zwiększenie długości linii kablowej niskiego napięcia, zasilanej przez transformator rozdzielczy, powoduje zmniejszenie przepięć przenoszonych narażających układy izolacyjne urządzeń zasilanych.

Tabela 3: Wartości maksymalne przepięć przenoszonych podczas włączania transformatora 250 kVA (Rys. 4)

U_{p1max} kV	U_{p2max} kV	U_{p3max} kV	U_{p1max} kV	U_{p2max} kV	U_{p3max} kV
układ 3 (l_{k1} -100 m, l_{k2} -10 m) układ 4 (l_{k1} -100m, l_{k2} -1000m)					
bez ochrony przepięciowej					
21	3,75	4	21	1,1	0,42
ograniczniki op_1 typu POLIM-D 12					
21	0,7	1,45	21	1,1	0,42
ograniczniki op_1 typu POLIM-D 12 i op_2 typu LOVOS 5/280					
21	0,7	1,45	21	0,7	

Analiza przepięć piorunowych przenoszonych do sieci niskiego napięcia

Przeprowadzono symulacje przepięć piorunowych przenoszonych przez transformator rozdzielczy do sieci niskiego podczas wyładowań piorunowych o wartości maksymalnej prądu 10 kA do fazy A linii napowietrznej 15 kV w odległości 20 m od transformatora (Rys. 8).



Rys. 8. Schemat układu do symulacji przepięć piorunowych przenoszonych przez transformator: l_n - linia napowietrzna 15 kV, l_{k2} - linia kablowa 0,4 kV, Tr - transformator 250 kVA, op_1 , op_2 - ograniczniki przepięć

Wyładowanie piorunowe zastąpiono modelem CIGRE. Do modelowania przeskoku na izolatorach wykorzystano model FLASH, zaimplementowany w programie EMT-ATP [8].

Symulacje przepięć przenoszonych piorunowych wykonano dla dwu układów zawierających linie l_n i l_{k2} o różnych długościach:

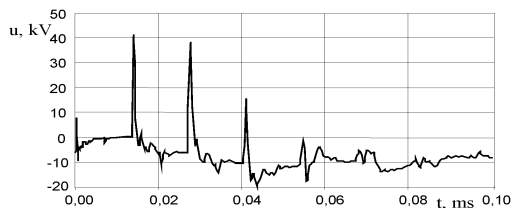
- układ 5: l_n - 20 m, l_{k2} - 14 m: długości linii krytyczne tzn. takie, dla których przepięcia przenoszone osiągają największe wartości (Rys. 1b, Rys. 2, Tabela 2),
- układ 6: l_n - 200 m, l_{k2} - 300 m: tj. długości wybrane linii l_n i l_{k2} .

Symulacje obejmowały przepięcia przenoszone przez transformator bez ochrony przepięciowej, z ogranicznikami przepięć op_1 typu POLIM-D 12 oraz zarówno ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12 jak i op_2 typu LOVOS 5/280 (Rys. 8).

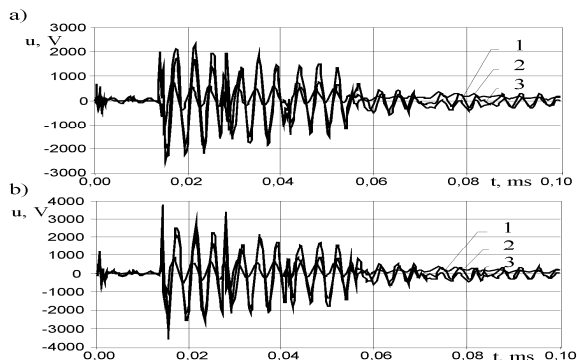
Przebiegi przepięć piorunowych doziemnych w punktach p_1 , p_2 i p_3 układu 1 chronionego ogranicznikami op_1 zamieszczono na rysunkach 9-11. Wartości maksymalne współczynnika k_t przepięć przenoszonych przez transformator w układach 5 i 6 zamieszczono w tabeli 4.

Wyniki symulacji przepięć w punktach p_1 , p_2 i p_3 układu elektrycznego 15/0,4 kV (Rys. 8) wykazały, że układy izolacyjne transformatorów rozdzielczych oraz linii połączonych z transformatorami są narażane na działanie przepięć przenoszonych piorunowych o dużych wartościach maksymalnych. Dla niektórych długości linii wartości przepięć przenoszonych są silnie wzmacniane, podobnie jak w przypadku przepięć łączeniowych. W celu zapewnienia skutecznej ochrony transformatorów od przepięć przenoszonych powinny być stosowane ograniczniki przepięć chroniące uzwojenia górnego i dolnego napięcia. Ochrona przepięciowa układu

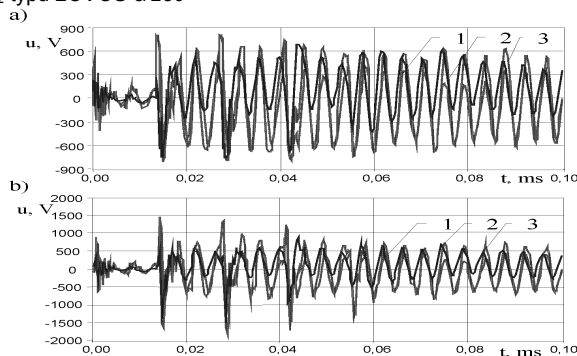
izolacyjnego linii kablowych 0,4 kV wymaga stosowania ograniczników przepięć na końcach linii kablowych w sieciach elektrycznych niskiego napięcia.



Rys. 9. Przebieg napięcia doziemnego piorunowego w fazie A uzwojenia 15 kV (punkt p_1 , Rys. 8) podczas załączania transformatora 250 kVA w układzie z liniami: l_n - 20m, l_{k2} - 14 m (układ 5, Rys. 8) i ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12



Rys. 10. Przebiegi napięć piorunowych w uzwojeniach 0,4 kV (punkt p_2) transformatora 250 kVA w układzie z liniami: l_n - 20m, l_{k2} - 14m (układ 5, Rys. 8) i ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12: a - bez ograniczników op_2 typu LOVOS 5/280, b - z ogranicznikami op_2 typu LOVOS 5/280



Rys. 11. Przebiegi napięć piorunowych na końcu linii l_{k2} (punkt p_3) zasilanej z transformatora 250 kVA w układzie z liniami: l_n - 200m, l_{k2} - 300m (układ 6, Rys. 8) i ogranicznikami op_1 typu POLIM-D 12: a - bez ograniczników op_2 typu LOVOS 5/280, b - z ogranicznikami op_2 typu LOVOS 5/280

Tabela 4: Wartości maksymalne napięć piorunowych przenoszonych przez transformator 250 kVA (Rys. 8)

U_{p1max} kV	U_{p2max} kV	U_{p3max} kV	U_{p1max} kV	U_{p2max} kV	U_{p3max} kV
układ 5 (l_n - 20 m, l_{k2} - 14 m) układ 6 (l_n - 200 m, l_{k2} - 300 m)					
bez ochrony przepięciowej					
142	6,8	11,8	80	4	4
ograniczniki op_1 typu POLIM-D 12					
42	2,2	3,8	40	1,8	2
ograniczniki op_1 typu POLIM-D 12 i op_2 typu LOVOS 5/280					
42	0,87	1,8	40	0,8	1,1

Podsumowanie

Wyniki symulacji wykazały, że napięcia przenoszone przez transformatory zależą od przebiegów i wartości napięć powstających w układach elektroenergetycznych oraz zjawisk przejściowych w sieciach elektrycznych zależnych od układów połączeń i parametrów urządzeń elektrycznych. Napięcia łączeniowe i piorunowe przenoszone przez transformatory i propagujące w

układach elektrycznych są zależne od długości linii połączonych z transformatorami. Dla niektórych długości linii wartości napięć przenoszonych są silnie wzmacniane w wyniku reakcji między transformatorem a układem elektrycznym. Ochrona układów izolacyjnych urządzeń od napięć przenoszonych, propagujących w układach elektroenergetycznych, wymaga stosowania ograniczników napięć na zaciskach uzwojeń górnego i dolnego napięcia transformatorów również wówczas, gdy transformatory są połączone z liniami kablowymi, oraz na końcach zasilanych linii kablowych.

LITERATURA

- [1] Joint Working Group A2/C4.39-CIGRE: Electrical transient interaction between transformers and the power system (part 1- Expertise, part 2: Case studies), CIGRE, April 2014
- [2] Gustavsen, B.: Study of transformer resonant overvoltages caused by cable-transformer high-frequency interaction, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 25, No. 2, Apr. 2010, pp. 770-779
- [3] Rocha A. C. O.: Electrical transient interaction between transformers and the power system, *CIGRÉ Session*, Paris, Aug. 2008, pap. C4-106
- [4] Obase P. F., Romero F., Janiszewski J. M., Piantini A., Neto A. S., Carvalho T. O., Filho A. A.: Lightning surges transferred to the secondary of distribution transformers due to direct strikes on mv lines, considering different lv line configurations, *X Int. Symp. on Lightn. Prot.*, 2009, Curitiba, Brazil, pp. 581-586
- [5] Borghetti A., Morched A., Napolitano F., Nucci C. A., Paolone M.: Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 24, No. 1, Jan. 2009, pp. 360-372
- [6] Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines, ISBN 978-83-7464-614-7, *Wydawnictwa AGH*, Kraków, 2013
- [7] Florkowski M., Furgał J., Pająk P.: Analysis of fast transient voltage distributions in transformer windings under different insulation conditions, *IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul.*, Vol. 19, No. 6, Dec. 2012, pp. 1991-1998
- [8] Dommel H. W. and et.al.: Electromagnetic transients program reference manual, Portland, *Prepared for BPA*, Aug. 1986
- [9] Lnie napowietrzne średniego napięcia 15–20 kV z płaskim układem przewodów gołych 70 i 50 mm² na pojedynczych żerdziach wirowanych typu E i EM, *Energolinia*, Poznań, 2006
- [10] Kable i przewody elektroenergetyczne, *Telefonika Kable Sp. z o.o.*, wrzesień, 2009
- [11] ABBB distribution transformers (www.abb.pl)
- [12] Gustavsen B.: Wide band modeling of power transformers, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 19, No. 1, 2004, pp. 414-422
- [13] Papadopoulos T. A., Chrysochos A. I., Nousedilis A. I., Papagiannis G. K.: Simplified measurement-based black-box modeling of distribution transformers using transfer functions, *Electric Pow. Syst. Res.*, No. 121, 2015, pp. 77-88
- [14] Bjerkan E., Høidalen H. K.: High frequency FEM-based power transformer modeling: Investigation of internal stresses due to network-initiated overvoltages, *Int. Conf. on Pow. Syst. Trans. (IPST'05)*, Montreal, June 19-23, 2005, pap. 05-106
- [15] Furgał J., Kuniewski M., Pająk P.: Badania i symulacje napięć łączeniowych przenoszonych przez uzwojenia transformatorów, *Przegl. Elektrot.*, R. 88, Nr 11b, 2012, str. 130-133
- [16] ABB power distribution (www.abb.pl)
- [17] ABB low voltage products (www.abb.pl)
- [18] IEEE Working Group 3.4.11: Modeling of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp. 302-309

Autorzy:

dr hab. inż. Marek Florkowski, Centrum Badawcze ABB,

ul. Starowiślna 13a, Kraków

e-mail: marek.florkowski@pl.abb.com

dr hab. inż. Jakub Furgał prof. n, AGH Akademia Górniczo-

Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: furgal@agh.edu.pl

dr inż. Maciej Kuniewski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: maciej.kuniewski@agh.edu.pl