

Propagacja przebiegów łączeniowych w uzwojeniach transformatorów

Streszczenie: Zwiększające się wymagania odnośnie do niezawodności dostaw energii elektrycznej oraz niezawodności pracy odbiorników energii powodują, że niezbędne są szczegółowe analizy narażeń przebiegowych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych i urządzeń połączonych z transformatorami od przebiegów. Narażenia uzwojeń transformatorów od przebiegów łączeniowych są efektem warunków propagacji fal napięciowych w sieciach elektrycznych oraz uzwojeniach. Szczególnie znaczenie ma analiza reakcji uzwojeń transformatorów na zjawiska przejściowe w układzie: linia zasilająca kablowa-transformator, od których są zależne przebiegi wewnętrzne w uzwojeniach. W artykule przedstawiono analizę wpływu zjawisk przejściowych w typowych fragmentach sieci z transformatorami rozdzielczymi podczas czynności łączeniowych oraz zwarcia doziemnych na przebiegi narażające układy izolacyjne uzwojeń transformatorów. Podstawą analizy były symulacje przebiegów łączeniowych, wykonane w programie Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP) przy zastosowaniu modelu z parametrami skupionymi uzwojeń transformatorów.

Abstract: The increasing requirements for improved reliability of supply of electrical power and reliability of work of electrical receivers means that the analysis of impact of insulation systems of power transformers and devices connected to transformers are necessary. Impact of switching overvoltages on transformer windings is the result of conditions for traveling of voltage wave in electrical networks and windings. Analysis of reaction of transformer windings to transient phenomena in the system: supply cable line-transformer influencing on internal overvoltages in windings have special means. This paper presents analysis of the influence of transient phenomena in typical electrical networks with distribution transformers during switching operations and short-circuit to earth on overvoltage in transformer windings. Analysis is based on simulation results of switching overvoltages done in the Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP) using the model with concentrate parameters of transformer windings (*Propagation of switching overvoltages in transformer windings*).

Słowa kluczowe: transformatory, przebiegi łączeniowe wewnętrzne, symulacje komputerowe

Keywords: transformers, internal switching overvoltages, computer simulations

1. Wprowadzenie

Analiza narażeń przebiegowych transformatorów i skuteczność ochrony przebiegowej nabierają dużego znaczenia ze względu na wzrost wymagań odnośnie do niezawodności pracy sieci elektrycznych, na którą duży wpływ ma niezawodność pracy transformatorów.

Przebiegi oraz wartości maksymalne przebiegów w uzwojeniach są zależne przede wszystkim od źródła przebiegu, zjawisk przejściowych zachodzących w transformatorach oraz od interakcji transformatorów z układami elektroenergetycznymi, uwarunkowanej propagacją przebiegów, zależnie od układu połączeń i impedancji falowych linii [1-5]. Dla wybranych konfiguracji sieci elektrycznych przebiegi narażające układy izolacyjne transformatorów mogą osiągać wartości przekraczające znacznie wartości napięcia roboczego sieci. W literaturze (np. [6-8]) przedstawiono przyczyny i skutki awarii wielu transformatorów spowodowanych przez oddziaływanie przebiegów powstających w układach elektroenergetycznych. Na narażenia przebiegowe transformatorów zasadniczy wpływ ma interakcja między transformatorem, a układem elektroenergetycznym [9]. Konsekwencją interakcji może być wzrost napięcia wewnątrz uzwojeń na skutek zjawiska rezonansu, jeżeli częstotliwość napięcia na zaciskach jest zgodna z częstotliwością własną transformatora. Może ono wystąpić na przykład podczas załączania transformatora lub zwarcia w linii zasilającej. Na zaciskach transformatora powstaje wówczas napięcie zawierające składowe oscylacyjne o częstotliwości zależnej od warunków propagacji fal napięciowych, długości linii i parametrów transformatora. Do obliczenia tej częstotliwości można wykorzystać zależność uwzględniającą wpływ impedancji transformatora na przebieg zjawiska propagacji fal napięciowych w układzie kabel-transformator. Dla częstotliwości większych od kilkunastu kiloherców impedancja transformatorów jest zależna głównie od ich pojemności. Z tego powodu transformatory pracujące w układach, w których występują szybkozmienne przebiegi, mogą być reprezentowane przez pojemność zastępczą transformatorów C_T .

Przy założeniu, że w linii kablowej o impedancji Z_k nie występują straty energii, częstotliwość oscylacji fal napięciowych w układzie "kabel zasilający-transformator" może być obliczona ze wzoru [10]:

$$(1) \quad f = \frac{v}{4l_k} \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan(2\pi f C_T Z_k) \right]$$

gdzie: v - prędkość fali napięciowej w linii kablowej, ms^{-1} ,
 l_k - długość linii kablowej zasilającej transformator, m.

Ze wzoru (1) wynika, że zwiększenie wartości składnika $fC_T Z_k$ powoduje zmniejszenie częstotliwości drgań fal napięciowych w układzie "linia zasilająca-transformator". Ogólnie częstotliwość w takim układzie jest mniejsza od częstotliwości fal napięciowych w linii kablowej nieobciążonej $f_{4t} = 1/4t = v/4l_k$, gdzie: $t = l_k/v$ - czas propagacji fali napięciowej. Zmniejszenie częstotliwości fal napięciowych f w relacji do f_{4t} jest determinowane przez długość linii kablowej. Większe zmniejszenie częstotliwości występuje w liniach kablowych o mniejszej długości.

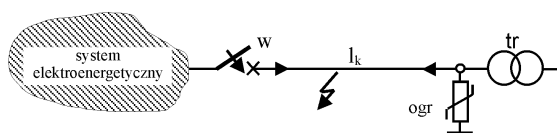
W literaturze (np. [10-13]) są zamieszczone wyniki licznych symulacji przebiegów łączeniowych w układzie: linia zasilająca-transformator. Są to jednak głównie przebiegi na zaciskach wejściowych transformatorów. Na podstawie przebiegów na zaciskach nie można prowadzić analizy narażeń układów izolacyjnych uzwojeń. Przebiegi wewnętrzne mogą znacznie różnić się od przebiegów na zaciskach wejściowych transformatorów. Przebiegi w uzwojeniach wynikają z reakcji uzwojeń, stanowiących złożone układy cewek, pomiędzy którymi istnieją silne sprzężenia magnetyczne oraz pojemnościowe, na napięcia przejściowe zewnętrzne.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji przebiegów w uzwojeniach transformatora powstających podczas załączania linii kablowej zasilającej transformator i zwarcia jednofazowych doziemnych w linii, wykonane przy zastosowaniu programu komputerowego Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program

(EMTP-ATP). Do modelowania transformatora zastosowano model z parametrami skupionymi uzwojeń, opracowany z uwzględnieniem parametrów konstrukcyjnych uzwojeń. Na podstawie wyników symulacji analizowano wpływ długości linii zasilającej na przebiegi wewnętrzne w transformatorze.

2. Charakterystyka fragmentu sieci: linia kablowa-transformator

Obiektem doświadczalnym był transformator 20 kVA 15/0,4 kV (Y/z) (Tabela 1 i 2) [15] zasilany linią kablową (Tabela 3). Schemat fragmentu układu elektroenergetycznego w którym pracuje transformator przedstawiono na rysunku 1. Badania obejmowały symulacje przebiegów napięć doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojenia jednej fazy uzwojenia górnego napięcia transformatora ($x/l = 0$ - zacisk wejściowy fazy L1 uzwojenia, $x/l = 0,18$; $x/l = 0,33$; $x/l = 0,67$) podczas załączania transformatora zasilanego linią kablową o różnej długości oraz zwarcia jednej fazy kabla z ziemią.



Rys.1. Schemat ogólny fragmentu układu elektroenergetycznego z transformatorem średniego napięcia zasilanym linią kablową I_k

Tabela 1: Parametry znamionowe transformatora doświadczalnego [15]

S_n	U_n	U_{zw}	P_j	P_o	I_j
kVA	kV	%	kW	kW	%
20	15 /	4,2	0,114	0,525	2,8

Tabela 2: Parametry uzwojeń górnego napięcia transformatora doświadczalnego

parametr	wartość	
	cewki zwykłe	cewki wzmacnione
liczba cewek, -	4	4
średnica wewnętrzna, m	0,157	0,157
średnica zewnętrzna, m	0,205	0,205
odległość między cewkami, m	0,003	0,005
wysokość cewki, m	0,028	0,025
liczba zwojów w cewce, -	810	650

Tabela 3: Parametry kabla 15 kV linii I_k

przekrój żył	grubość izolacji	grubość ekranu	średnica zewnętrzna	R
mm ²	mm	mm	mm	$\Omega \text{ km}^{-1}$
95	4.5	2.5	31.6	0.193

Do ochrony przepięciowej uzwojeń górnego napięcia zastosowano ograniczniki napięć typu POLIM-D 12 z tlenków metali [17].

Badania napięć obejmowały symulacje przebiegów napięć podczas:

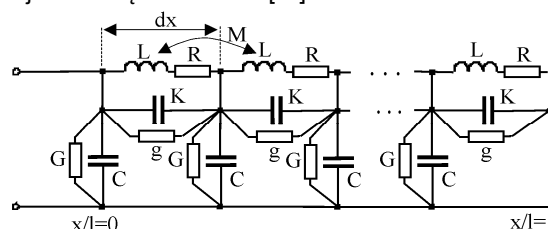
- załączania transformatora zasilanego linią kablową o różnej długości,
- jednofazowego zwarcia doziemnego w linii kablowej w różnych odległościach od transformatora.

Wartości napięć podano w stosunku do wartości maksymalnej napięcia na zaciskach wejściowych transformatora. Wartości maksymalne uderzeń napięciowych oddziaływujących na zaciskach wejściowych transformatorów nie mają praktycznego wpływu na przebiegi napięć wewnętrznych w transformatorze. W warunkach oddziaływania napięć o dużej stromości i dużej częstotliwości transformator jest obiektem o charakterze liniowym.

3. Symulacje napięć łączeniowych w uzwojeniach transformatora

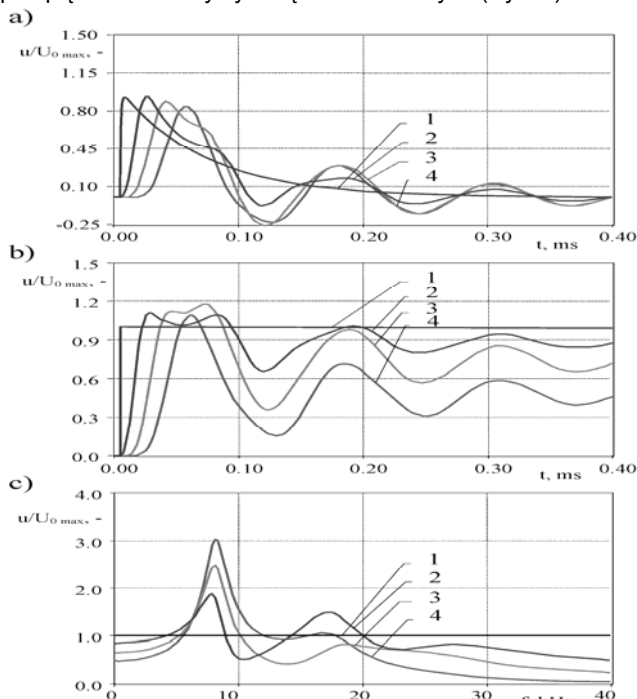
Metoda symulacji

Symulacje przebiegów napięć łączeniowych w transformatorze wykonano w programie Electromagnetic Transients Program/Alternative Transients Program (EMTP/ATP) [14]. Do modelowania kabli zastosowano procedurę Jmarti. Ograniczniki napięć modelowano przy zastosowaniu modelu Grupy Roboczej 3.4.11 IEEE [18]. Model uzwojeń transformatorów przedstawiono na rysunku 2. Symulacje w programie EMTP/ATP wykonano po uproszczeniu modelu, polegającym na pominięciu sprzężeń indukcyjnych między sekcjami uzwojenia i uzwojeniami sąsiednich faz [16].

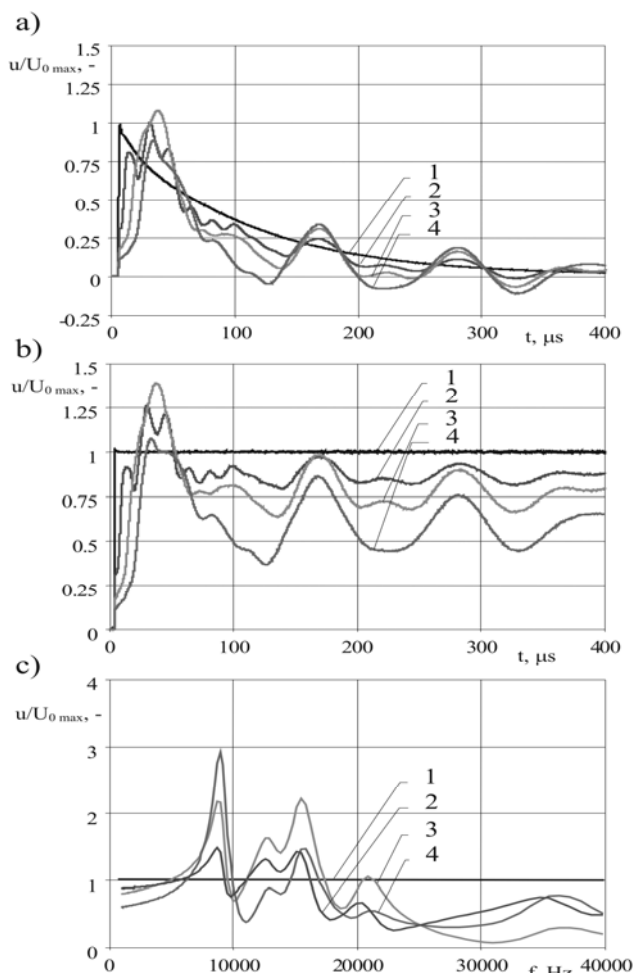


Rys.2. Schemat zastępczy uzwojeń transformatorów: C - pojemności szeregowe i doziemne, L, M - indukcyjności własne i wzajemne między elementami uzwojeń, R - rezystancja sekcji uzwojeń, G, g - konduktancja układu izolacyjnego uzwojeń [19]

W celu weryfikacji modelu wyniki symulacji napięć generowanych podczas oddziaływania uderzenia napięciowego piorunowego i prostokątnego, oraz charakterystyk częstotliwościowych napięć w uzwojeniu górnego napięcia transformatora (Rys. 3) porównano z wynikami rejestracji napięć i charakterystyk częstotliwościowych (Rys. 4).



Rys.3. Wyniki symulacji przebiegów $u=f(t)$ i zależności $u=g(f)$ w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora, wykonane w programie EMTP/ATP przy zastosowaniu modelu uzwojeń przedstawionego na rysunku 2: a - zależności $u=f(t)$ podczas działania uderzenia napięciowego o przebiegu 1,2/50 μs , b - zależności $u=f(t)$ podczas działania uderzenia prostokątnego, c - zależności $u=g(f)$; 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$



Rys.4. Wyniki rejestracji zależności $u=f(t)$ i zależności $u=g(f)$ w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora: a - zależności $u=f(t)$ podczas działania udaru napięciowego o przebiegu 1,2/50 μs , b - zależności $u=f(t)$ podczas działania udaru prostokątnego, c - zależności $u=g(f)$; 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$

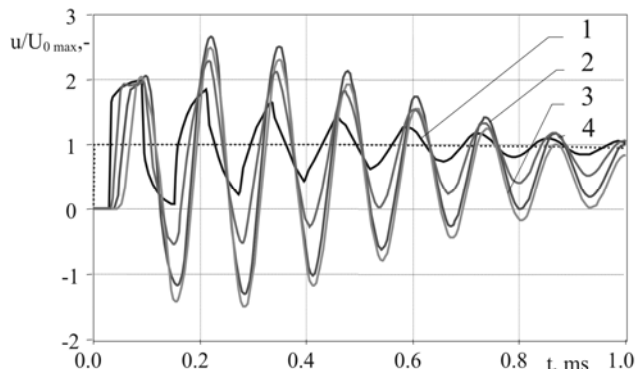
Na podstawie analizy porównawczej wyników symulacji prądów powstających w uzwojeniu górnego napięcia transformatora doświadczalnego (Tabela 1 i 2) podczas działania udaru napięciowego piorunowego i udaru prostokątnego oraz charakterystyk częstotliwościowych wykonanych po zaimplementowaniu w programie EMTP/ATP modelu z parametrami skupionymi uzwojeń (Rys. 2) przedstawionych na rysunku 3 i wyników rejestracji prądów pokazanych na rysunku 4 można stwierdzić, że model dobrze odzwierciedla warunki propagacji prądów w uzwojeniach transformatora. Przebiegi prądów oraz wartości maksymalne uzyskane w wyniku symulacji są bowiem zbliżone do przebiegów i wartości maksymalnych prądów otrzymanych z pomiarów.

Wyniki symulacji prądów łączeniowych w uzwojeniach transformatorów

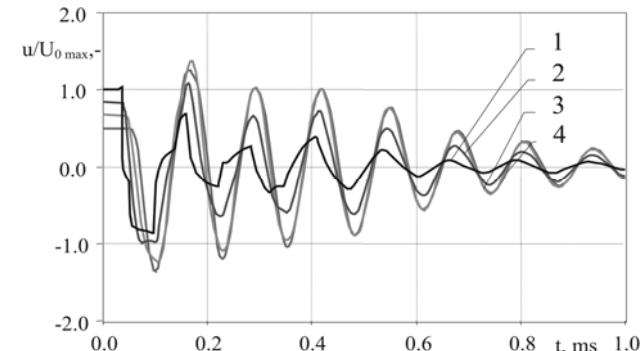
Wykorzystując model układu: linia kablowa-transformator, przedstawionego schematycznie na rysunku 1, w którym zastosowano zweryfikowany doświadczalnie schemat zastępczy uzwojeń transformatora opracowany w programie EMTP/ATP, wykonano obszerne symulacje przebiegów prądów w uzwojeniu górnego napięcia fazy L1 podczas załączania linii kablowej o długości zmieniającej się w zakresie od 500 m do 5000 m oraz podczas zwarcia jednej fazy z ziemią. Wybrane

przebiegi prądów wewnętrznych rejestrowano w wybranych punktach $x/l = 0; 0,18; 0,33$ i $0,62$ (rys. 2) uzwojenia górnego napięcia. Przebiegi prądów powstających podczas załączania linii l_k (Rys. 1) o długości 3260 m (tj. takiej, przy której częstotliwość napięcia na zaciskach podczas załączania linii jest równa częstotliwości własnej transformatora) zasilającej transformator oraz podczas zwarcia jednej fazy linii z ziemią przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

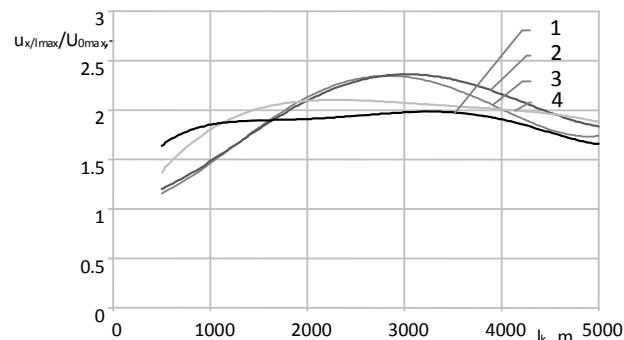
Na podstawie wyników symulacji wyznaczono zależności wartości maksymalnych prądów generowanych w uzwojeniach transformatora podczas załączania linii zasilającej i zwarcia doziemnego od długości linii kablowej $U_{x/lmax}/U_{0max}=f(l_k)$. Wykresy tych zależności przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



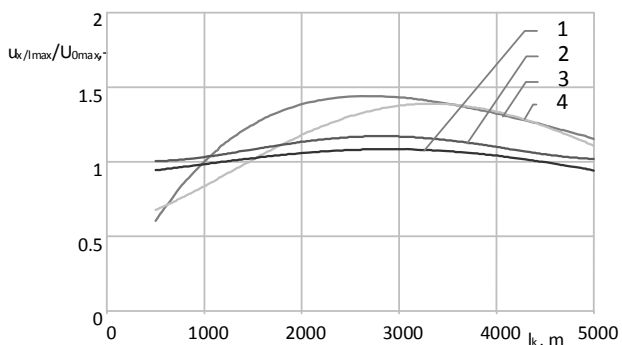
Rys.5. Przebiegi prądów wewnętrznych w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia podczas załączania linii l_k o długości 3260 m zasilającej transformator (rys. 2): 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$



Rys.6. Przebiegi prądów wewnętrznych w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia podczas zwarcia jednofazowego doziemnego w linii l_k zasilającej transformator w odległości 3260 m od transformatora (rys. 2): 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$



Rys.7. Zależności wartości maksymalnych prądów doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia podczas załączania linii l_k zasilającej transformator w funkcji długości linii $U_{x/lmax}/U_{0max}=f(l_k)$ (rys. 2): 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$



Rys.8. Zależności wartości maksymalnych przebiegów doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia podczas zwarcia jednofazowego doziemnego w linii l_k zasilającej transformator w funkcji długości linii $U_{x/lmax}/U_{0max} = f(l_k)$ (rys. 2): 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$

Na podstawie analizy wyników symulacji przebiegów łączeniowych, wykonanych w uzwojeniach transformatora, przedstawionych na rysunkach 5-8 można stwierdzić, że długość linii kablowych zasilających ma duży wpływ na przebiegi narażające układy izolacyjne uzwojeń podczas załączania transformatora oraz podczas zwarcia doziemnych w liniach zasilających. Przebiegi wewnętrzne podczas załączania lub zwarcia jednofazowego doziemnego osiągają największe wartości maksymalne wówczas, gdy częstotliwość napięcia przejściowego na zaciskach transformatora jest zgodna z częstotliwością własną transformatora. Dla transformatora doświadczalnego przebiegi łączeniowe w uzwojeniach osiągają wartości maksymalne sięgające 2,5-krotnej wartości maksymalnej przebiegów na zaciskach wejściowych uzwojeń podczas załączania linii kablowej zasilającej o długości 3260 m, gdy na zaciskach pojawia się napięcie przejściowe o częstotliwości 8,2 kHz.

Podsumowanie

Wyniki symulacji przebiegów łączeniowych wewnętrznych w transformatorach, wykonane w programie Electromagnetic Transients Program/Alternative Transients Program (EMTP/ATP) wykazały, że przebiegi narażające układy izolacyjne uzwojeń transformatorów podczas załączania linii zasilających i zwarcia jednofazowych doziemnych są efektem zjawisk przejściowych w układzie: linia zasilająca-transformator i warunków propagacji przebiegów w uzwojeniach. Przebiegi łączeniowe narażające układy izolacyjne uzwojeń są zależne od długości linii zasilających. Dla niektórych długości linii wartości przebiegów wewnętrznych są silnie wzmacniane w wyniku reakcji między transformatorem, a układem elektrycznym zewnętrznym. Przebiegi narażające transformatory połączone z liniami kablowymi osiągają największe wartości dla linii o takich długościach, dla których częstotliwość drgań fal napięciowych powstających w wyniku wielokrotnych odbić od końców linii zasilającej, jest równa częstotliwości własnej uzwojeń. W takich warunkach przebiegi doziemne na zaciskach transformatora oraz w uzwojeniach osiągają największe wartości. Zastosowanie do symulacji przebiegów wewnętrznych w transformatorach, prowadzonych w programie EMTP/ATP, modelu z parametrami skupionymi uzwojeń, umożliwia uzyskanie przebiegów przebiegów zbliżonych do wyników badań.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Jakub Furgał, 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
dr inż. Piotr Pająk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: ppajak@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Gustavsen B., Brede A. P., Tande J. O.: Multivariate analysis of transformer resonant overvoltages in power stations, IEEE Trans. on Pow. Deliv., 2011, 26, 4, pp. 2563-2572
- [2] Gustavsen, B.: Study of transformer resonant overvoltages caused by cable-transformer high-frequency interaction, IEEE Trans. on Pow. Deliv., 2010, 25, 2, 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] Piantini A., de Carvalho T. O., Obase P. F., Janiszewski J. M., Santos G. J. G., Fagundes D. R., Uchoa J. I. L., Kunz E. N.: The effect of the distance between transformer and MV arresters on the surges transferred to the LV side, Int. Conf. on High Volt. Engin. and Appl. (ICHVE), 17-20 Sept. 2012, pp. 105-109
- [5] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Propagation of overvoltages in distribution transformers with silicon steel and amorphous cores, IET Gener. Transm. Distrib., 2015, 9, 16, pp. 2736-2742
- [6] Hori M., Nishioka M., Ikeda Y., Naguchi K., Kajimura K., Motoyama H., Kawamura H.: Internal winding failure due to resonance overvoltages in distribution transformer caused by winter lightning, IEEE Trans. on Pow. Deliv., 2006, 21, 3, pp. 1600-1606
- [7] Lapworth J. A., Wilson A.: Transformer internal overvoltages caused by remote energisation, IEEE PES Power Africa 2007 Conf. and Exp., Johannesburg, July 2007, pp. 1-6
- [8] Lee C. H., Hsu S. C., Hsi P. H., Chen S. L.: Transferring of VFTO from an EHV to MV system as observed in Taiwan's 3 nuclear power plant, IEEE Trans. on Pow. Deliv., 2011, 26, 2, pp. 1008-1016
- [9] Joint Working Group A2/C4.39-CIGRE: Electrical transient interaction between transformers and the power system (part 1-Expertise, part 2: Case studies), CIGRE, ISSN: 978-2-85873272-2, April 2014
- [10] Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V.: Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network, CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, Zurich, Switzerland, 2013, pp. 1-8 [10]
- [11] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Propagation of overvoltages transferred through distribution transformers in electric networks, IET Gener. Transm. Distrib., 2016, Vol. 10, Iss. 10, pp. 2531-2537
- [12] Hoogendorp G., Popov M., van der Sluis L.: The Influence of a Cable on the Voltage Distribution in Transformer Windings, Int. Conf. on Pow. Syst. Trans.-IPST2011, Delft, Netherlands, June 14-17, 2011, pp.1-6
- [13] Kotlan V., Bensowa Z.: Overvoltage Propagation from Transmission Line into Transformer Winding, Pow. Engin. And Electr. Engineering, Vol. 13, No. 5, 2015, pp. 478-483
- [14] Dommel H. W. and et.al.: Electromagnetic transients program reference manual (EMTP Theory Book), Portland, Prepared for BPA, 1986
- [15] Transformator typu T3ZoNe20/20. Mikołowska Fabryka Transformatorów „Mefta”
- [16] Wilcox D. J., Conlon M., Hurlley W. G.: Calculation of self and mutual impedances for coils in ferromagnetic cores. IEE Proc., Vol.135, Pt. A, No. 7, Sept. 1988, pp. 470 – 476
- [17] Ograniczniki przebiegów z tlenków metali typu POLIM - D, ABB Power Distribution (www.abb.pl)
- [18] IEEE Working Group 3.4.11: Modeling of Metal Oxide Surge Arresters. IEEE Trans. on Pow. Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302 – 309
- [19] Heller B., Veverka A.: Surge phenomena in electrical machines, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 1968