

ANALIZA PRZEPIĘĆ W TRANSFORMATORACH ENERGETYCZNYCH

Bartłomiej ADAMCZYK¹, Jakub FURGAL²

1. Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków
tel: 12 433-44-16 fax: 12 424-41-01 e-mail: bartlomiej.adamczyk@pl.abb.com
2. AGH 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

Streszczenie: Transformatory energetyczne są narażone na oddziaływanie udarów napięciowych stosowanych do prób napięciowych oraz przepięć o zróżnicowanych przebiegach i wartościach maksymalnych w warunkach eksploatacji. Przepięcia zawierają zwykle składowe oscylacyjne tłumione o częstotliwościach zawartych w szerokich granicach i oddziałują na transformatory pomimo powszechnie stosowanej ochrony przepięciowej. Zjawiska przejściowe w transformatorach, wpływające na przebiegi i wartości maksymalne przepięć wewnętrznych, są zależne od reakcji uzwojeń na napięcia pojawiające się na zaciskach wejściowych. Analiza przepięć w transformatorach ma duże znaczenie dla oceny warunków pracy ich układów izolacyjnych i doskonalenia ich konstrukcji. W artykule przedstawiono analizę przepięć generowanych w uzwojeniu transformatora rozdzielczego przy oddziaływaniu napięć przejściowych o różnych przebiegach.

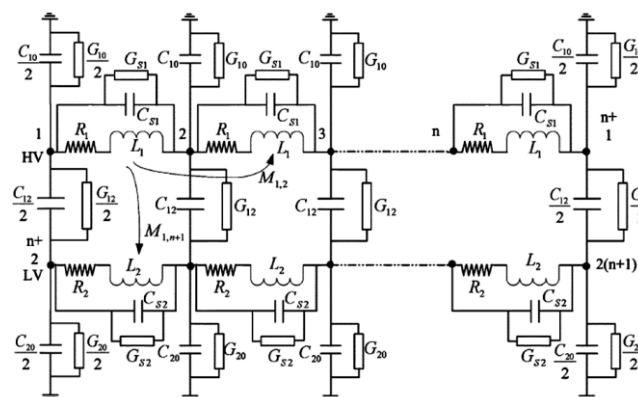
Słowa kluczowe: transformatory, uzwojenia, przepięcia

1. WPROWADZENIE

Transformatory energetyczne są narażone na oddziaływanie przepięć o zróżnicowanych wartościach maksymalnych i przebiegach czasowych. Podczas prób napięciowych, stosowane są znormalizowane udary napięciowe piorunowe i łączeniowe, mające na celu odwzorowanie rzeczywistych narażeń przepięciowych jakim mogą być poddane transformatory. W warunkach eksploatacji, transformatory są narażone na oddziaływanie przepięć powstających w sieci elektroenergetycznej najczęściej podczas wyładowań piorunowych, czynności łączeniowych lub niektórych stanów awaryjnych. Przepięcia te zawierają zwykle składowe oscylacyjne tłumione o zróżnicowanych częstotliwościach.

Przepięcia pojawiające się na zaciskach wejściowych transformatorów, stanowią narażenie ich układów izolacyjnych (zewnętrznych i wewnętrznych), pomimo zastosowanej ochrony przepięciowej. Wynika to z faktu, iż poziom ochrony ograniczników przepięć jest około trzykrotnie wyższy od napięcia roboczego sieci. Na przebiegi napięć przejściowych pojawiających się na zaciskach wejściowych transformatorów szczególnie wpływ mają wartości maksymalne i przebiegi przepięć powstających w sieciach elektrycznych, jak również charakterystyki napięciowo-prądowe samych ograniczników.

Napięcia przejściowe na zaciskach transformatora są źródłem przepięć wewnątrz uzwojeń. Te z kolei są efektem zjawisk przejściowych zależnych od konstrukcji transformatora. Uzwojenia stanowią złożony układ RLC (Rys.1), a występujące w nich sprzężenia pojemnościowe i indukcyjne decydują o zagrożeniach przepięciowych układów izolacji wewnętrznej [1-4].



Rys. 1. Schemat zastępczy uzwojeń transformatorów: C – pojemności szeregowo i doziemne, L – indukcyjność własna uzwojeń, M – indukcyjność wzajemna, R – rezystancja uzwojeń, G – konduktancja uzwojeń [4]

W wyniku tych zjawisk przebiegi napięć w uzwojeniach znacznie różnią się od przebiegów napięcia na zaciskach wejściowych transformatora. Dodatkowo, jeżeli częstotliwość składowej przejściowej przepięcia zewnętrznego jest równa częstotliwości własnej transformatora, to przepięcia wewnętrzne mogą być wzmacniane w wyniku zjawiska rezonansu [5-11].

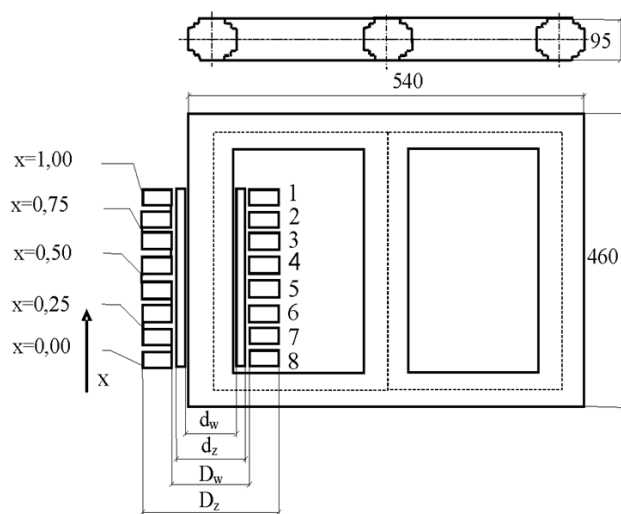
W artykule przedstawiono wyniki badań przepięć wewnątrz uzwojeń transformatora rozdzielczego. Badania obejmowały rejestracje przebiegów przepięć wewnątrz uzwojeń podczas działania znormalizowanych udarów napięciowych piorunowych oraz wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych przepięć. Badania przepięć powstających podczas działania udarów napięciowych piorunowych umożliwiają analizę narażeń układów izolacyjnych transformatorów podczas prób napięciowych, natomiast zależności częstotliwościowe ukazują reakcję uzwojeń transformatorów na składowe oscylacyjne przepięć.

2. CHARAKTERYSTYKA TRANSFORMATORA DOŚWIADCZALNEGO

Objektem doświadczalnym był transformator rozdzielczy typu T3ZoNe20/20 (Yzn5) (Tab. 1). Uzwojenia górnego napięcia zawierają osiem cewek. Cztery skrajne posiadają izolację wzmocnioną. Uzwojenia niskiego napięcia są uzwojeniami warstwowymi nawiniętymi przewodem miedzianym o przekroju poprzecznym prostokątnym. Uproszczony przekrój transformatora zamieszczono na rysunku 2, a podstawowe wymiary uzwojeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1: Parametry znamionowe transformatorarozdzielczego typu T3ZoNe20/20 o mocy 20 kVA

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



Rys. 2. Uproszczony przekrój transformatora rozdzielczego typu T3ZoNe20/20 o mocy 20 kVA: 1–8 – cewki uzwojenia górnego napięcia, d_w , d_z , D_w , D_z – podstawowe wymiary (Tab. 2)

Tabela 2: Parametry uzwojeń transformatora typu T3ZoNe20/20 20 kVA [12]

| Parametr | uzwojenie górnego napięcia | |
|-------------------------------|----------------------------|------------------|
| | cewki zwykłe | cewki wzmocnione |
| liczba cewek, - | 4 | 4 |
| średnica wewnętrzna d_w , m | 0,157 | 0,157 |
| średnica zewnętrzna d_z , m | 0,205 | 0,205 |
| liczba zwojów w cewce, - | 810 | 650 |
| odległość między cewkami, m | 0,003 | 0,005 |
| wysokość cewki, m | 0,028 | 0,025 |
| uzwojenie dolnego napięcia | | |
| średnica wewnętrzna d_w , m | 0,114 | |
| średnica zewnętrzna d_z , m | 0,137 | |
| liczba zwojów w uzwojeniu, - | 90 | |
| rdzeń | | |
| średnica zastępcza, m | 0,105 | |

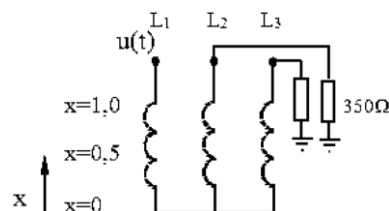
3. METODA BADAŃ I ICH ZAKRES

Badania obejmowały:

- rejestrację przebiegów przepięć w uzwojeniu górnego napięcia transformatora powstających podczas działania znormalizowanego udaru piorunowego 1,2/50 μ s,
- wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych napięć wewnątrz uzwojenia górnego napięcia transformatora w zakresie od 50 Hz do 1 MHz.

Rozkłady przepięć podczas działania udaru 1,2/50 μ s odzwierciedlają narażenia układu izolacyjnego transformatora podczas znormalizowanych prób napięciowych. Charakterystyki częstotliwościowe napięć wewnątrz uzwojeń umożliwiają natomiast analizę reakcji uzwojeń transformatora na składowe oscylacyjne przepięć zewnętrznych. Przepięcia wewnętrzne przedstawiono w jednostkach względnych, w odniesieniu do napięcia $U_{1,0}$ na zaciskach uzwojenia poddanego działaniu przepięcia zewnętrznego.

Schemat połączeń uzwojeń górnego napięcia podczas badań transformatora przedstawiono na rysunku 3. Uzwojenia dolnego napięcia były rozwarte. Rezystory 350 Ω dołączone do dwóch faz uzwojenia górnego napięcia reprezentują impedancję falową linii napowietrznej połączonej z transformatorem.

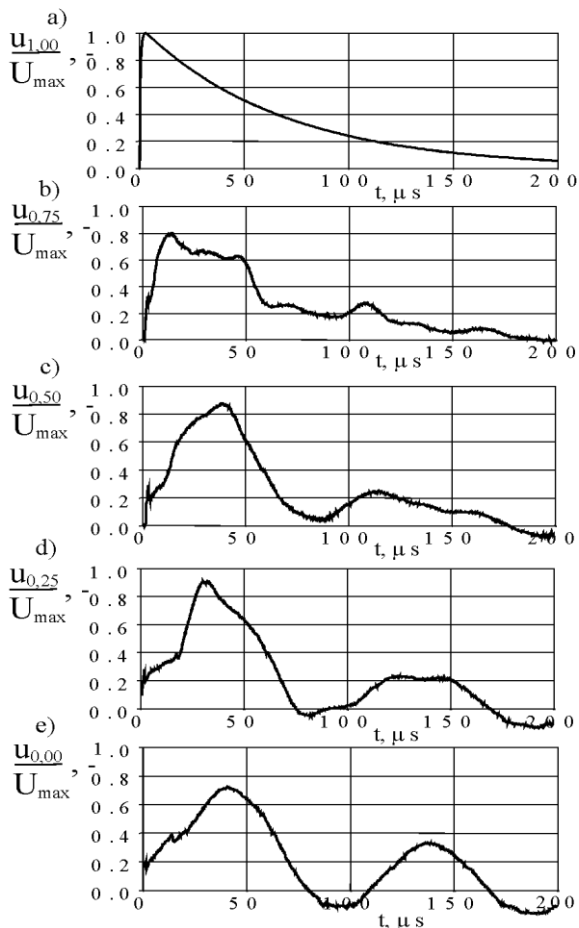


Rys. 3. Schemat połączeń uzwojeń górnego napięcia transformatora rozdzielczego podczas badań przepięć wewnętrznych

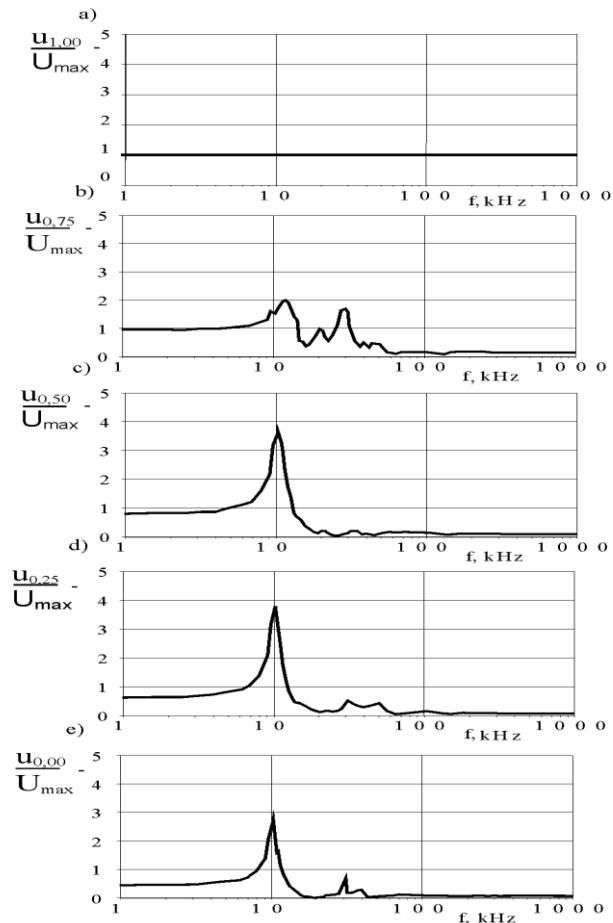
W badaniach zastosowano udary napięciowe piorunowe o wartości maksymalnej 300 V wytwarzane za pomocą jednostopniowego generatora napięć udarowych. Charakterystyki częstotliwościowe przepięć w uzwojeniu wyznaczono przy zastosowaniu napięcia sinusoidalnego o amplitudzie 20 V_{pp} i zmiennej częstotliwości. Do rejestracji przebiegów napięcia zastosowano oscyloskop cyfrowy Tektronix typu TDS 1200.

4. WYNIKI BADAŃ PRZEPIEĆ WEWNĘTRZNYCH APERIODYCZNYCH

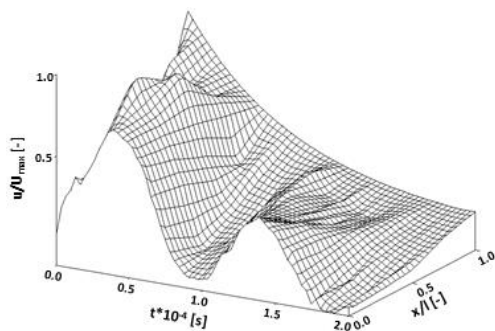
Wyniki rejestracji przepięć doziemnych w uzwojeniu górnego napięcia transformatora, powstających podczas działania znormalizowanego napięcia udarowego piorunowego przedstawiono na rysunku 4. Trójwymiarowe rozkłady napięć doziemnych piorunowych w badanym transformatorze rozdzielczym zamieszczono natomiast na rysunku 5. Przepięcia doziemne zarejestrowane w różnych punktach uzwojenia górnego napięcia transformatora (oznaczenia na Rysunku 2), mają odmienne przebiegi czasowe w porównaniu do przebiegu napięcia wymuszającego. Przebiegi te zawierają składowe oscylacyjne tłumione o częstotliwości 12 kHz. Współczynnik przepięć doziemnych w połowie wysokości uzwojenia (punkt $x=0,5$ na Rysunku 2) osiąga wartość 1,58 (Rys.4c).



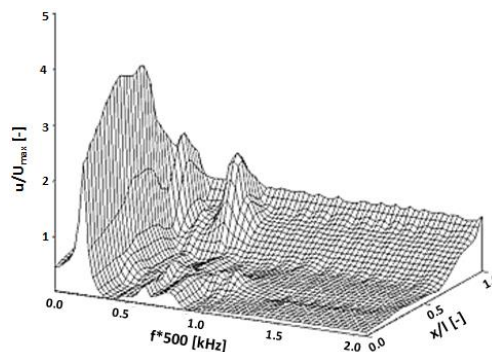
Rys. 4. Przebiegi napięć doziemnych $u=f(t)$ w uzwojeniu górnego napięcia transformatora 20 kVA przy oddziaływaniu znormalizowanego udaru napięciowego piorunowego 1,2/50 μ s: a) $x=1,0$; b) $x=0,75$; c) $x=0,5$; d) $x=0,25$; e) $x=0$



Rys. 6. Zależności napięć doziemnych od częstotliwości $u=g(f)$ w uzwojeniu górnego napięcia transformatora doświadczalnego 20kVA: a) $x=1,0$; b) $x=0,75$; c) $x=0,5$; d) $x=0,25$; e) $x=0$



Rys. 5. Trójwymiarowy rozkład napięć doziemnych piorunowych $u=g(x,t)$ w uzwojeniu wysokiego napięcia transformatora doświadczalnego 20 kVA



Rys. 7. Trójwymiarowy rozkład napięć doziemnych $u=g(x,f)$, wymuszanych przez napięcie sinusoidalne w uzwojeniu wysokiego napięcia transformatora doświadczalnego 20 kVA

5. BADANIA CHARAKTERYSTYK CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH PRZEPIĘĆ WEWNĘTRZNYCH

Przebiegi o charakterze oscylacyjnym powstają w sieciach elektrycznych najczęściej w czasie czynności łączeniowych - podczas zwarć oraz odległych wyładowań atmosferycznych. Nie przekraczają one zwykle podwójnych wartości maksymalnych fazowych napięć roboczych, ale jak wynika z literatury - przebiegi takie były przyczynami uszkodzeń wielu transformatorów, które przeszły z wynikiem pozytywnym znormalizowane próby wytrzymałości izolacji.

W celu analizy reakcji transformatora na składowe oscylacyjne napięcia wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe napięć wewnątrz uzwojenia wysokiego napięcia transformatora doświadczalnego o mocy znamionowej 20 kVA. Wyniki rejestracji charakterystyk częstotliwościowych napięć wewnętrznych transformatora zamieszczono na Rysunku 6. Trójwymiarowy rozkład napięć $u=g(x,f)$, wymuszanych przez napięcie sinusoidalne wewnątrz transformatora przedstawiono natomiast na rysunku 7.

Przebiegi wewnątrz uzwojenia górnego napięcia osiągają największe wartości przy częstotliwości 12 kHz. Jest to częstotliwość równa częstotliwości drgań napięć doziemnych wewnętrznych, zamieszczonych na Rysunku 4, powstających podczas oddziaływania udaru napięciowego

aperiodycznego. Badania potwierdzają, że wartości maksymalne przepięć wewnątrz uzwojenia mogą być większe od przepięć pojawiających się na zaciskach wejściowych transformatora. Przykładowo, przepięcia rezonansowe doziemne w połowie wysokości uzwojenia górnego napięcia (punkt $x=0,5$, Rys. 6c) osiągają wartości ok. 3,5-krotnie większe od wartości maksymalnej napięcia wymuszającego.

Z analizy wyników badań widać, że składowe oscylacyjne przepięć powstających w układach elektroenergetycznych mogą być źródłem przepięć wewnętrznych o dużych wartościach maksymalnych.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono analizę przepięć w uzwojeniu górnego napięcia transformatora rozdzielczego o mocy 20 kVA. Podstawą analizy były przebiegi przepięć wewnątrz uzwojenia zarejestrowane przy dwóch rodzajach napięcia wymuszającego: znormalizowanego udaru piorunowego $1,2/50\mu s$ oraz przebiegu sinusoidalnego o zmiennej częstotliwości (50Hz - 1MHz).

Przeprowadzone badania napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń transformatora, potwierdzają, że przepięcia wewnętrzne powstające podczas oddziaływania udarów piorunowych znormalizowanych nie przekraczają kilkudziesięciu procent wartości maksymalnych przepięć oddziaływujących na uzwojenie transformatora. Składowe oscylacyjne, powstające zwykle w warunkach czynności łączeniowych w układach elektroenergetycznych, mogą być natomiast źródłem przepięć o wartościach znacznie większych od wartości maksymalnych napięcia wymuszającego. Przepięcia takie są wzmacniane wewnątrz transformatorów w wyniku zjawiska rezonansu przy przebiegach przepięć zewnętrznych, zawierających składowe oscylacyjne o częstotliwości równej częstotliwości drgań własnych transformatora.

7. LITERATURA

1. Shibuya Y., Fujita S., Shimomura T.: Effects of Very Fast Transient Overvoltages on Transformer, IEE Proc. – Gener. Transform. Distrib., Vol. 146, No. 4, July 1999, pp. 459-464
2. Shibuya Y., Fujita S., Hosokawa N.: Analysis of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Winding, IEE Proc.-Gener. Transf. Distr., Vol. 144, No. 5, Sept. 1997, pp. 461-468

3. Rodrigo H., Dang H. Q. S.: Behaviour of Transformer Windings under Surge Voltages, High Volt. Engin. Symp., 22-27 Aug. 1999, paper No. 1.287. P 6
4. Nilanga K. G., Abeywickrama B., Serdyuk Y. V., Gubanski S.: Exploring Possibilities for Characterization of Power Transformer Insulation by Frequency Response Analysis (FRA), IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1375-1382
5. Popov M., van der Sluis L., Smeets R. P. P.: Evaluation of surge-transferred overvoltages in distribution transformers, Elec. Pow. Syst. Research, Vol. 78, Issue 3, March 2008, pp. 441-449
6. Fujita S., Hosokawa N., Shibuya Y.: Experimental investigations of high frequency oscillation in transformer windings, IEEE Trans. Pow. Deliv., Vol. 13, No. 4, 1998, pp. 1201-1207
7. Zamanillo G., Gomez J., Tourn D., Floren E.: Experimental study of the transfer of overvoltage surges through distribution transformers, 18th Int. Conf. on Electr. Distrib., ICGRED 2005, Session no. 2, Turin, 6-9 June, 2005, pp. 1-6
8. Obase P. F., Romero F., Janiszewski J. M., Piantini A., Neto A. S., Carvalho T. O., Araújo 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 Light. Protection, 9th-13th Nov., 2009, Curitiba (Brazil), pp. 581-586
9. Cogo J. R., Dommel H. W.: Voltage surges induced in transformer secondaries with loads characterized by sensitive electronic equipment, X Int. Symp. on Light. Protection, 9th-13th Nov., 2009, Curitiba (Brazil), pp. 1-6
10. Ueda T., Funabashi T., Sugimoto T., Dube L.: Transformer model for transformer transfer voltage simulation, Int. Conf. on Power Syst. Trans., IPST 1999, 20-24 June, 1999, Budapest (Hungary), pp. 480-486
11. 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
12. Furgał J.: Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć, Wydawnictwa AGH, Kraków 2003

ANALYSIS OF OVERVOLTAGES IN POWER TRANSFORMERS

Key-words: power transformers, windings, overvoltages

Power transformers are subjected to action standard voltage strokes during voltage tests and overvoltages with different shapes and maximal values in exploitation. Overvoltages influence on transformers despite of overvoltage protection systems. Usually overvoltages contain oscillative dumped components with frequencies of wide ranges. Transient phenomena in transformers, which have influence on courses and maximal values of internal overvoltages, are dependent on the reaction of windings on transient voltages at input clamps of transformers. Analysis of overvoltages in transformers has important meaning for estimation of working conditions of insulation systems and improvement of its construction. Analysis of overvoltages generated in distribution transformers under action of transient voltages with different waveforms is presented in the paper.