

doi:10.15199/48.2016.10.24

Narażenia przepięciowe układów izolacyjnych transformatorów podczas prób napięciem udarowym i w warunkach eksploatacji

Streszczenie: Transformatory w warunkach eksploatacji są narażone na oddziaływanie przepięć o zróżnicowanych przebiegach. Narażenia przepięciowe układów izolacyjnych wewnętrznych są zależne od reakcji transformatora na przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych. Doskonale konstrukcji układów izolacyjnych oraz zwiększenie niezawodności pracy wymaga analizy tych narażeń.

W artykule przedstawiono narażenia przepięciowe układów izolacyjnych transformatorów podczas prób napięciem udarowym oraz w warunkach eksploatacji. Podstawą analizy były wyniki rejestracji przepięć wewnętrznych w uzwojeniach transformatora podczas oddziaływania napięć udarowych piorunowych pełnych i uciętych oraz udarów modelujących przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych.

Abstract Transformers in exploitation conditions are impact to action overvoltags with different courses. Influence of overvoltages on internal insulation systems depend from reaction of transformer to overvoltages generated in electrical power systems. Development of construction for insulation systems and increase of reliability of work need analysis of such impacts.

Analysis of overvoltage impacts on insulation systems during voltage tests and in exploitation conditions is presented in the paper. As a basis of the analysis are results of investigations for overvoltages in insulation systems of transformer windings during action full and chopped lightning voltage strokes and voltage strokes modeling overvoltages generated in electrical power systems. (**Overvoltage impacts of insulation systems for transformers during voltage tests and in exploitation conditions**).

Słowa kluczowe: transformatory, układy izolacyjne, próby napięciowe, przepięcia wewnętrzne, narażenia przepięciowe

Keywords: transformers, insulation systems, voltage tests, internal overvoltages, overvoltage impact

Wprowadzenie

Dążenie do zwiększania niezawodności dostaw energii elektrycznej powoduje, iż szczególna uwaga zwracana jest na takie rozwiązania układów elektroenergetycznych, które do minimum ograniczają prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. Dlatego jednym z podstawowych zadań realizowanych w elektroenergetyce jest zapewnienie niezawodności pracy układów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Duży wpływ na ciągłość pracy układów elektroenergetycznych ma niezawodność transformatorów. Zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych, zapewniających utrzymanie odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej ich układów izolacyjnych, wynikającej ze spodziewanych narażeń, ma podstawowe znaczenie dla spełnienia tych wymagań. Występujące równocześnie czynniki ekonomiczne i techniczne powodują konieczność obniżania zapasu wytrzymałości elektrycznej urządzeń. Wynika stąd konieczność optymalizacji rozwiązań technicznych transformatorów. Wymaga to szczegółowej analizy narażeń przepięć eksploatacyjnych transformatorów i występujących podczas prób napięciowych udarowych. W warunkach eksploatacji transformatory są poddawane działaniu przepięć o zróżnicowanych przebiegach i wartościach maksymalnych. Obecnie, z powodu stosowania w układach elektroenergetycznych nowych urządzeń o parametrach odmiennych od parametrów urządzeń stosowanych dotychczas, takich jak na przykład wyłączniki próżniowe lub zasilacze impulsowe maszyn elektrycznych, układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych są narażone na oddziaływanie przepięć nie występujących wcześniej [1,2]. Przepięcia narażają układy izolacyjne zewnętrzne transformatorów oraz są źródłem przepięć wewnątrz uzwojeń.

Transformatory energetyczne chronione są od przepięć głównie przez zastosowanie ograniczników beziskiernikowych. Zastosowanie tej metody nie rozwiązało jednak całkowicie problemów związanych z ochroną przepięciową. Z analizy literatury wynika, że ochrona przepięciowa transformatorów energetycznych może być nieskuteczna. Wiele transformatorów uległo bowiem uszkodzeniom w wyniku oddziaływania przepięć w warunkach eksploatacji pomimo, że transformatory przeszły znormalizowane próby napięciowe z wynikiem pozytywnym i były chronione z zastosowaniem ograniczników przepięć [1,3,4].

W artykule przedstawiono analizę przepięć wewnętrznych narażających układ izolacyjny uzwojeń transformatora podczas prób napięciowych, wykonywanych z zastosowaniem udarów piorunowych pełnych i uciętych oraz badania przepięć powstających w transformatorze podczas oddziaływania napięć o przebiegach modelujących przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych.

Zakres badań przepięć i obiekt doświadczalny

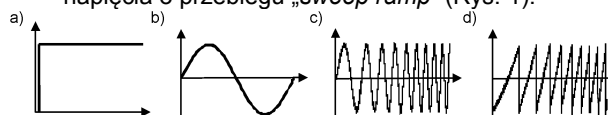
Program badań obejmował rejestrację przebiegów przepięć doziemnych w wybranych punktach uzwojeń, transformatorów. Badania wykonano z zastosowaniem napięć udarowych probierczych i napięć o przebiegach odzwierciedlających przebiegi przepięć powstających w układach elektroenergetycznych.

Badania przepięć narażających układy izolacyjne transformatorów występujących podczas prób udarowych napięciowych wykonano z zastosowaniem:

- udarów napięciowych piorunowych pełnych,
- udarów napięciowych piorunowych uciętych [5].

Przebiegi przepięć powstających w układach elektroenergetycznych modelowano przez zastosowanie:

- udaru napięciowego prostokątnego,
- napięcia sinusoidalnego,
- napięcia o przebiegu „sweep sinus”,
- napięcia o przebiegu „sweep ramp” (Rys. 1).

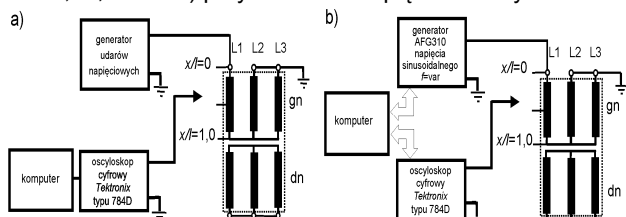


Rys. 1. Wybrane przebiegi napięć, modelujące przebiegi składowych oscylacyjnych przepięć powstających w układach elektroenergetycznych: a - udar napięciowy prostokątny, b - napięcie sinusoidalne, c - napięcie o przebiegu „sweep sinus”, d - napięcie o przebiegu „sweep ramp”

Udary napięciowe o przebiegu prostokątnym odzwierciedlają przebiegi napięć przejściowych na zaciskach wejściowych transformatorów podczas działania beziskiernikowych ograniczników przepięć z tlenków metali [1,2]. Napięcie sinusoidalne o zmieniającej się częstotliwością, umożliwia wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych napięć, przedstawiających reakcje

uzwojeń na składowe oscylacyjne przepięć o zróżnicowanych częstotliwościach, powstających w układach elektroenergetycznych. W badaniach stosowano napięcie sinusoidalne o częstotliwości zmieniającej się w zakresie 20 Hz - 2,5 MHz. Napięcie o przebiegu „sweep sinus” odzwierciedla składowe oscylacyjne przepięć łączeniowych w sieciach elektrycznych. Napięcie o przebiegu „sweep ramp” modeluje składowe oscylacyjne powstające na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikiem próżniowym [1,2]. Badania z zastosowaniem funkcji „sweep sinus” i „sweep ramp” wykonano dla częstotliwości w przedziale od 1 kHz do 100 kHz i przebiegu napięcia trwającym 100 ms.

Obiektem doświadczalnym był transformator 20 kVA 15/0,4 kV (Y/z) [6]. Schemat stanowiska doświadczalnego przedstawiono na rysunku 2. Uzwojenia niskiego napięcia podczas badań były zwarte. Badania obejmowały rejestrację przebiegów przepięć doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojenia jednej fazy uzwojenia górnego napięcia transformatora ($x/l = 0$ - zacisk wejściowy fazy L1 uzwojenia górnego napięcia transformatora, $x/l = 0,18$; $x/l = 0,33$; $x/l = 67$) przy działaniu napięć udarowych.



Rys. 2. Schematy stanowisk do rejestracji przebiegów przepięć wewnątrz transformatora: a) stanowisko do rejestracji przebiegów przepięć podczas oddziaływania udarów napięciowych, b) stanowisko do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

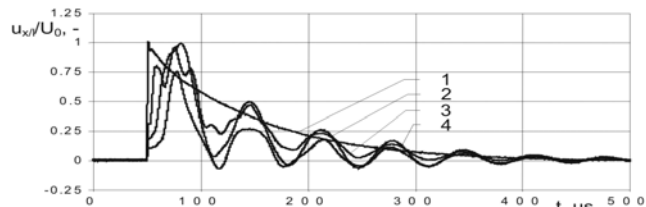
Badania przepięć wewnątrz uzwojeń podczas działania, a napięcia udarowego piorunowego 1,2/50 μ s wykonano przy napięciu 300 V, a rejestrację przy działaniu udaru prostokątnego, napięcia sinusoidalnego, napięcia o przebiegu „sweep sinus” i „sweep ramp”, prowadzono przy napięciu 20 Vpp.

Wartości maksymalne udarów napięciowych stosowanych w badaniach przepięć nie mają praktycznego wpływu na wyniki badań przepięć wewnętrznych w transformatorze. W warunkach oddziaływania napięcia o dużej stromości i dużej częstotliwości transformator jest obiektem o charakterze liniowym. Dla częstotliwości napięcia zasilającego większych od kilkudziesięciu kiloherców rdzeń ferromagnetyczny nie ma praktycznie wpływu na indukcyjności uzwojeń. Dlatego dla dużych stromości napięcia wymuszenia oraz dużej częstotliwości, wpływ rdzenia na zjawiska przejściowe w uzwojeniach może być pominięty [7].

Stanowisko do rejestracji przebiegów przepięć podczas oddziaływania udarów napięciowych o przebiegu prostokątnym, napięcia „sweep sinus” i „sweep ramp” (Rys. 2a) zawiera generator funkcji firmy Tektronix typu AFG310, oscyloskop cyfrowy typu 784D firmy Tektronix i komputer. Do pomiarów charakterystyk częstotliwościowych przepięć w uzwojeniach przy napięciu sinusoidalnym wykorzystano analizator FRA (Frequency Response Analyzer) zawierający generator funkcji typu AFG310 firmy Tektronix, oscyloskop cyfrowy typu 2020 firmy Tektronix i komputer (Rys. 2b). Generator funkcji oraz oscyloskop połączone są z komputerem za pomocą interfejsu GPIB-PCMCIA. Dedykowane oprogramowanie do pomiarów charakterystyk częstotliwościowych przepięć zostało zaimplementowane w środowisku LabView firmy National Instruments [8].

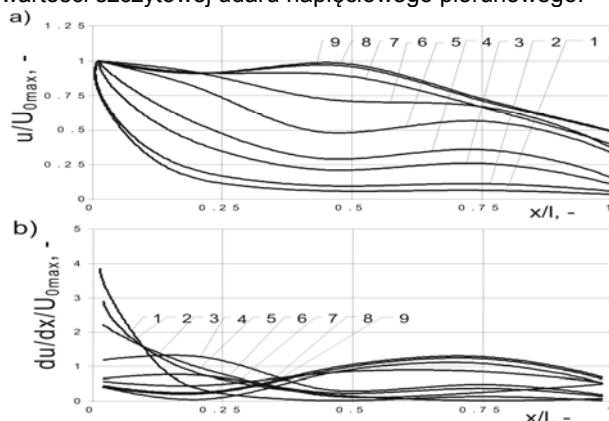
Wyniki badań przepięć wewnętrznych podczas działania udarów piorunowych pełnych i uciętych

Przebiegi przepięć doziemnych w punktach o współrzędnych $x/l=0,18$; 0,33; 0,62 uzwojenia górnego napięcia transformatora, zarejestrowane podczas działania udaru piorunowego $U_0(t)$ o wartości maksymalnej 300 V na zacisku o współrzędnej $x/l=0$, zamieszczono na rysunku 3. Wyniki badań przedstawiono w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości maksymalnej napięcia udarowego piorunowego.



Rys. 3. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w punktach x/l uzwojenia fazy L1 transformatora 20 kVA podczas działania napięcia udarowego piorunowego (Rys. 2a): 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,67$

Przebiegi przepięć wewnątrz uzwojenia są odmienne od przebiegu napięcia udarowego piorunowego na zaciskach transformatora. Przepięcia zawierają oscylacje i częstotliwości 8,9 kHz. Z badań wynika, że na przykład wartość maksymalna przepięcia w punkcie $x/l = 0,33$ uzwojenia, odniesiona do wartości maksymalnej napięcia udarowego piorunowego, wynosi 1.08 j.w., jest większa od wartości szczytowej udaru napięciowego piorunowego.



Rys. 4. Rozkłady wartości maksymalnych przepięć (a) i gradientów przepięć (b) powstających podczas działania udarów napięciowych piorunowych uciętych po czasie: 1 - 1 μ s, 2 - 2 μ s, 3 - 4 μ s, 4 - 6 μ s, 5 - 10 μ s, 6 - 20 μ s, 7 - 30 μ s, 8 - 55 μ s, 9 - napięcie udarowe piorunowe pełne

Stosowanie napięć udarowych piorunowych uciętych w próbach transformatorów powoduje zwiększenie gradientów przepięć narażających układ izolacyjny uzwojenia przy zaciskach liniowych transformatora (Rys. 3, 4).

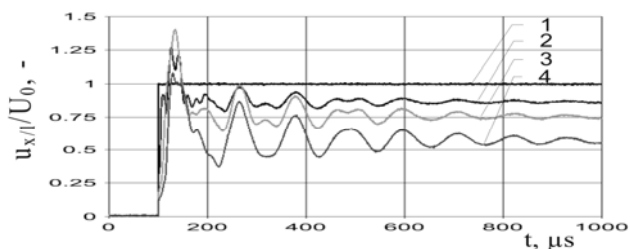
Badania modelowe przepięć eksploatacyjnych

Przepięcia wewnętrzne generowane przez udary napięciowe prostokątne

Przebiegi przepięć zarejestrowane w uzwojeniach transformatorów, powstających podczas działania udarów napięciowych prostokątnych między zaciskami uzwojenia $x/l = 0$ i $x/l = 1,0$ (Rys. 2a) przedstawiono na rysunku 5.

Przepięcia wewnątrz uzwojeń, powstające podczas działania udaru napięciowego prostokątnego, zawierają składowe oscylacyjne. Z analizy przebiegów przepięć wynika, że częstotliwość składowej oscylacyjnej wewnątrz uzwojenia transformatora 20 kVA wynosi 8,9 kHz. Wartości maksymalne przepięć w transformatorze są zróżnicowane. Na przykład w punkcie $x/l = 0,33$ uzwojenia przepięcia

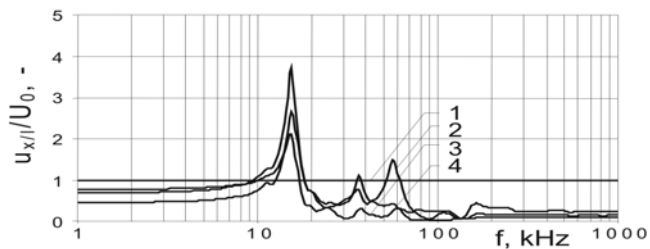
doziemne osiągają około 1,25 wartości maksymalnej udaru napięciowego pojawiającego się na zaciskach wejściowych transformatora.



Rys. 5. Przebiegi prądów doziemnych w punktach x/l fazy $L1$ uzwojenia górnego napięcia (Rys. 2a) podczas oddziaływania napięcia udarowego o przebiegu prostokątnym: 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$

Charakterystyki częstotliwościowe prądów

W celu wyznaczenia reakcji uzwojeń transformatora na składowe oscylacyjne prądy powstających w układach elektroenergetycznych wyznaczono zależności częstotliwościowe prądów $u_{x/l}/u_0 = g(f)$ wewnątrz uzwojeń. Od charakteru tej reakcji uzależnione są wartości prądów narażających układy izolacyjne transformatora. Z analizy charakterystyk częstotliwościowych (Rys. 6) wynika, że napięcia sinusoidalne o niektórych częstotliwościach są silnie wzmacniane wewnątrz uzwojeń. Częstotliwości te są zgodne z częstotliwościami składowych przejściowych przebiegów prądów (Rys. 3, 5). Współczynnik prądów w uzwojeniu 15kV dla częstotliwości 8,9 kHz wynosi 3,4 j.w. (Rys. 6).



Rys. 6. Zależności częstotliwościowe prądów w punktach x/l fazy $L1$ uzwojenia górnego napięcia transformatora (Rys. 2b): 1 - $x/l = 0$; 2 - $x/l = 0,18$; 3 - $x/l = 0,33$; 4 - $x/l = 0,62$

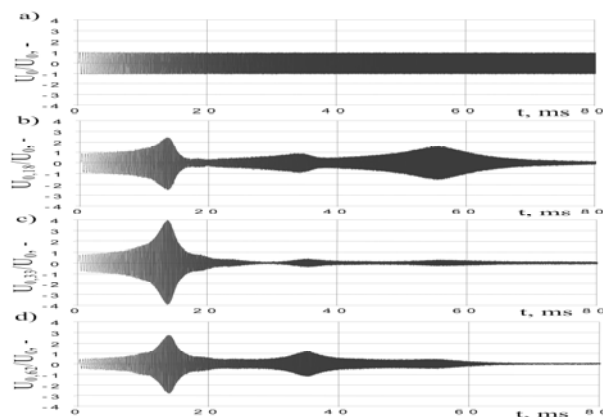
Badania wykazały, że reakcja transformatorów na prądy powstające w układach elektroenergetycznych jest zależna od konstrukcji i parametrów uzwojeń. Prądy zawierające składowe przejściowe o charakterze oscylacyjnym mogą być silnie wzmacniane w transformatorach w wyniku zjawisk rezonansowych, jeśli częstotliwości tych przebiegów są równe częstotliwościom własnym transformatorów.

Prądy wymuszone przez napięcia o przebiegach „sweep sinus” i „sweep ramp”

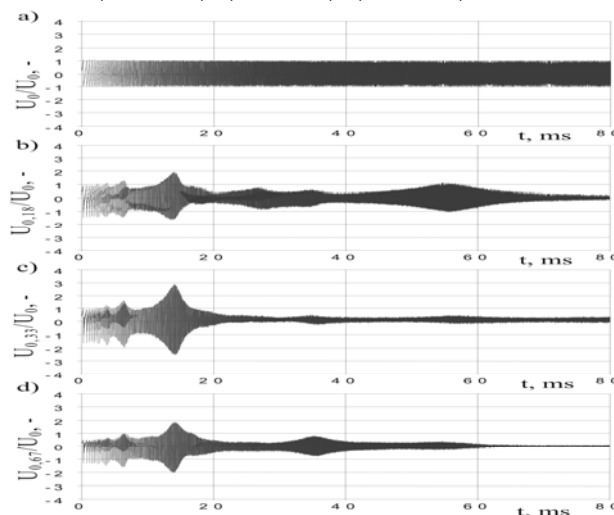
Wyniki badań, w postaci przebiegów prądów doziemnych powstających podczas działania prądów „sweep sinus” i „sweep ramp” w zakresie częstotliwości 1–100 kHz w wybranych punktach x/l uzwojenia fazy $L1$ transformatora przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że rozkłady prądów w transformatorze podczas oddziaływania funkcji „sweep sinus” i „sweep ramp” są silnie nieliniowe. Dla wybranych częstotliwości, napięcia przejściowe wewnątrz uzwojeń są silnie wzmacniane. Efekty tych zjawisk ujawniają się w uzwojeniu transformatora i mają postać prądów o dużych wartościach szczytowych. Na przykład podczas oddziaływania prądu o przebiegu „sweep sinus”, wartości prądów w punkcie $x/l = 0,33$ osiągają około 3,8 - krotną wartość napięcia na zaciskach

transformatora (Rys. 7c), dla napięcia o przebiegu „sweep ramp”, prądy w tym punkcie sięgają 3 - krotnej wartości prądu zewnętrznego (Rys. 8c).



Rys. 7. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających w punktach o współrzędnych x/l fazy $L1$ uzwojenia górnego napięcia (Rys. 2a) podczas działania napięcia „sweep sinus”: a - $x/l = 0$; b - $x/l = 0,18$; c - $x/l = 0,33$; d - $x/l = 0,62$



Rys. 8. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających w punktach o współrzędnych x/l uzwojenia fazy $L1$ (Rys. 2a) uzwojenia górnego napięcia transformatora podczas działania napięcia „sweep ramp”: a - $x/l = 0$; b - $x/l = 0,18$; c - $x/l = 0,33$; d - $x/l = 0,62$

Analiza porównawcza prądów

Przedstawione powyżej wyniki badań prądów w transformatorze wykazały, że z powodu różnych przebiegów udarów napięciowych probierczych i prądów powstających podczas pracy transformatora przebiegi i wartości maksymalne prądów wewnątrz transformatora podczas prób napięciem udarowym układów izolacyjnych i w warunkach eksploatacji są znacznie zróżnicowane.

W dalszej kolejności przedstawiono analizę prądów w transformatorze poddanych działaniu udaru napięciowego probierczego piorunowego pełnego i wybranych napięć modelujących prądy docierające do transformatora w układzie elektroenergetycznym.

W celu porównania prądów wewnętrznych powstających w uzwojeniach transformatora wyznaczono wartości współczynników: $TDSF$ (Time Domain Severity Factor) i współczynnika $FDSF$ (Frequency Domain Severity Factor) wyrażonych przy zastosowaniu następujących zależności:

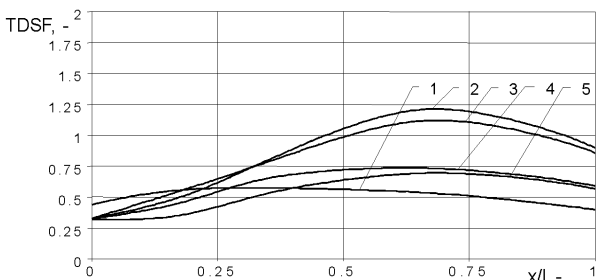
$$(1) \quad TDSF = \frac{U_{x/l \max}}{U_{x/l \max pr}}$$

gdzie: $U_{x/l \max pr}$ - wartość maksymalna przepięcia doziemnego w punkcie x/l uzwojenia podczas próby udarem napięciowym, $U_{x/l \max}$ - wartość maksymalna przepięcia w punkcie x/l uzwojenia generowanego w warunkach eksploatacji transformatora [9,10].

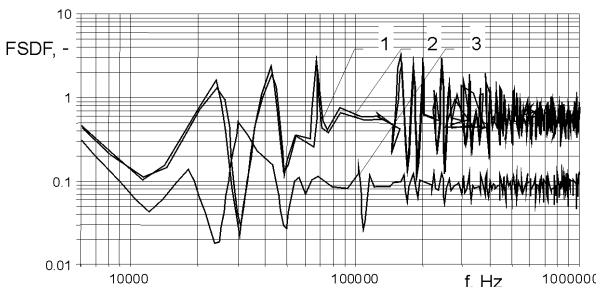
$$(2) \quad FDSF = \frac{p_{x/l}(f)}{p_{x/l pr}(f)}$$

gdzie: $p_{x/l pr}(f)$ - widmowa gęstość energii przepięcia w punkcie x/l podczas próby udarem napięciowym, $p_{x/l}(f)$ - widmowa gęstość energii przepięcia w punkcie x/l uzwojenia powstającego podczas eksploatacji transformatora [9,10].

Zależności $TDSF = f(x/l)$ dla uzwojenia górnego napięcia transformatora doświadczalnego przedstawiono na rysunku 9, a zależności $FDSF = g(f)$ zamieszczono na rysunku 10.



Rys. 9. Zależności $TDSF = f(x/l)$ dla uzwojenia górnego napięcia transformatora doświadczalnego badanego napięciem znormalizowanym piorunowym $U_{pr} = 95$ kV chronionego ogranicznikami o wartości napięcia pracy ciągłej $U_c = 12$ kV ($U_o = 42$ kV): 1 - napięcie probiercze piorunowe pełne, 2 - napięcie sinusoidalne o częstotliwości rezonansowej 8,9 kHz, 3 - napięcie „sweep ramp”, 4 - napięcie „sweep sinus” (U_o - znamionowy piorunowy poziom ochrony ograniczników)



Rys. 10. Zależności $FDSF = g(f)$ dla napięcia probierczego piorunowego (Rys. 3) i udarowego prostokątnego (Rys. 5) dla transformatora badanego napięciem piorunowym $U_{pr} = 95$ kV chronionego ogranicznikami o wartości napięcia pracy ciągłej $U_c = 12$ kV ($U_o = 42$ kV): 1 - $x/l = 0,18$; 2 - $x/l = 0,33$; 3 - $x/l = 0,67$ (U_o - znamionowy piorunowy poziom ochrony ograniczników)

Korzystając ze wzorów (1) i (2) wyznaczono zależności $TDSF = f(x/l)$ i $FDSF = g(f)$ dla transformatora badanego napięciem znormalizowanym piorunowym pełnym $U_{pr} = 95$ kV [11] chronionego beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć o wartości napięcia pracy ciągłej $U_c = 12$ kV ($U_o = 42$ kV), stosowanymi w sieciach 15 kV, w których zwarcia doziemne są wyłączane automatycznie [12,13] (Rys. 9 i 10).

Na podstawie analizy zależności $TDSF = f(x/l)$ (Rys. 9) można stwierdzić, że wartości maksymalne przepięć narażających układ izolacyjny wewnętrzny transformatora powstających podczas działania napięcia sinusoidalnego o częstotliwości równej częstotliwości własnej transformatora oraz podczas działania napięcia „sweep sinus” w wybranych punktach x/l uzwojenia fazy $L1$ są większe od wartości maksymalnych przepięć powstających podczas prób napięciowych udarowych prowadzonych z

zastosowaniem napięcia piorunowego pełnego. Również z analizy zależności $FDSF = g(f)$ (Rys. 10) wynika, że gęstość energii w wybranych zakresach częstotliwości przepięć eksploatacyjnych może przekraczać gęstość energii składowych częstotliwościowych przepięć powstających podczas prób napięciem udarowym piorunowym.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przepięcia narażające układy izolacyjne transformatorów rozdzielczych są zróżnicowane, zależnie od charakteru przepięć powstających w układach elektroenergetycznych i są odmienne od narażeń powstających podczas prób z zastosowaniem udarów napięciowych piorunowych. Przepięcia wewnątrz transformatorów w warunkach eksploatacji mogą przekraczać wartości maksymalne przepięć powstających w układach elektroenergetycznych. Dla celów koordynacji izolacji, doskonalenia konstrukcji i zwiększenia niezawodności transformatorów niezbędna jest szczegółowa analiza porównawcza narażeń przepięciowych probierczych i eksploatacyjnych oraz doskonalenie metod ochrony przepięciowej transformatorów.

Autorzy: dr hab. inż. Marek Florkowski, Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13 a, Kraków, marek.florkowski@pl.abb.com
 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] Joint Working Group A2/C4.39-CIGRE: Electrical transient interaction between transformers and the power system (part 1- Expertise, part 2: Case studies), CIGRE, ISBN: 978-2-85873272-2, April 2014
- [2] Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines, Wyd. AGH, Kraków, ISBN 978-83-7464-614-7, 2013
- [3] Rocha C. A. O.: Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, CIGRE-Brazil Joint Working Group JWG - A2/C4-03, paper C-104, 2008, pp. 1-6
- [4] Massaro U. R., Antunes R.: Electrical transient interaction between transformers and power system - brazilian experience, Int. Conf. on Pow. Syst. Trans. (IPST'2009), Kyoto, Japan, June 3-6, 2009, pp. 1-6
- [5] IEC 60076-3 Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- [6] Transformator typu T3ZnNe20/20. Mikołowska Fabryka Transformatorów „Mefta”
- [7] Wilcox D. J., Conlon M., Hurley 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
- [8] Florkowski M., Furgał J.: Detection of transformers winding deformation based on transfer function - measurement and simulations, Meas., Science and Techn., No. 14, 2003, pp. 1986 - 1992
- [9] Lopez-Fernandez X. M., Álvarez-Mariño C.: Induced transient voltage performance between transformers and VCB. severity factors and case studies; IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 30, No 3, June 2015, pp. 1137-1144
- [10] Holdyk A., Gustavsen B.: External and internal overvoltages in a 100 MVA transformer during high-frequency transients, Int. Conf. on Pow. Syst. Trans. (IPST2015), Cavtat, Croatia June 15-18, 2015, pp. 1-6
- [11] PN-EN 60071-1 Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły.
- [12] PN-EN 60099-5 Ograniczniki przepięć. Zalecenia wyboru i stosowania.
- [13] Ograniczniki przepięć z tlenków metali typu POLIM - D, ABB Power Distribution (www.abb.pl)