

WYZNACZANIE PRZEPIĘĆ PRZENOSZONYCH PRZEZ TRANSFORMATORY Z ZASTOSOWANIEM CHARAKTERYSTYK CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH

Jakub FURGAL¹, Maciej KUNIEWSKI²

Miejsce pracy:

1. 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
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: (12) 617 44 16 fax: (12) 634 57 21
maciek@agh.edu.pl

Streszczenie: Przepięcia generowane w układach elektroenergetycznych przenoszone przez uzwojenia transformatorów stanowią narażenia układów izolacyjnych uzwojeń sprzężonych z uzwojeniami poddawanych narażeniu przepięć zewnętrznych oraz oddziałują na zasilane odbiorniki elektryczne. W celu symulacji przepięć przenoszonych przez transformatory niezbędne jest stosowanie modeli uwzględniających przebiegi w transformatorach podczas oddziaływania przepięć zewnętrznych o zróżnicowanych przebiegach.

Treścią artykułu jest wyznaczenie przebiegów przepięć przenoszonych przez transformatory na podstawie charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia uzwojeń. Scharakteryzowano metodę wyznaczania przepięć przenoszonych, zamieszczono wyniki symulacji przykładowych przebiegów przepięć przenoszonych. Obliczenia porównano z wynikami badań.

Słowa kluczowe: transformatory, przepięcia przenoszone, symulacje komputerowe

1. WPROWADZENIE

W układach elektroenergetycznych generowane są przepięcia o zróżnicowanych przebiegach i wartościach szczytowych. Przepięcia powstają głównie podczas operacji łączeniowych, w niektórych stanach awaryjnych oraz podczas wyładowań piorunowych. Przepięcia generowane w warunkach eksploatacji są źródłem przepięć wewnętrznych w transformatorach energetycznych, narażających układy izolacyjne uzwojeń pomimo stosowania ochrony przepięciowej. Napięcia obniżone ograniczników przepięć są około trzykrotnie większe od napięć roboczych chronionych transformatorów, a przebiegi napięć przejściowych na ogranicznikach beziskiernikowych podczas ich działania są zbliżone do przebiegu prostokątnego. Przepięcia o wartościach szczytowych mniejszych od napięcia obniżonego ograniczników docierają do transformatorów praktycznie bez zmiany przebiegów.

Wartości przepięć powstających w uzwojeniach transformatorów są zależne od przepięć zewnętrznych oraz

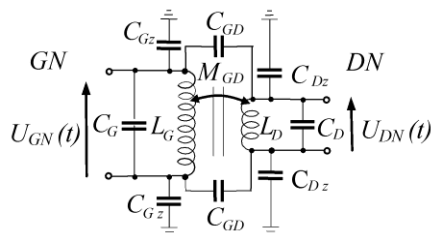
zjawisk przejściowych wewnątrz transformatorów, stanowiących złożone układy *RLC*. Jeżeli przepięcia zewnętrzne zawierają składowe oscylacyjne o częstotliwości równej częstotliwości własnej transformatora wewnątrz uzwojeń przepięcia mogą być silnie wzmacniane w wyniku zjawiska rezonansu [1-3]. Analiza reakcji transformatorów na stany przejściowe w układach elektroenergetycznych jest treścią prac prowadzonych w ramach Grupy Roboczej CIGRE A2/C4-39 (*Transient Electrical Interaction between Transformers and the Power System*) pracującej od 2008 roku [4].

Badania eksperymentalne i teoretyczne, dotyczące zjawisk przejściowych w transformatorach obejmują zwykle swym zakresem zjawiska w uzwojeniach, które są narażone na bezpośrednie oddziaływanie przepięć generowanych w układach elektroenergetycznych. Jednak analiza narażeń układów izolacyjnych uzwojeń powinna obejmować także narażenia od przepięć przenoszonych przez transformatory [4-10].

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania przepięć przenoszonych przez transformatory z zastosowaniem charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia oraz wyniki symulacji wybranych przepięć przenoszonych przez uzwojenia jednej fazy transformatora 160 kVA, 15/0,4 kV. Wyniki obliczeń porównano z badaniami.

2. MECHANIZM PRZENOSZENIA PRZEPIĘĆ PRZEZ TRANSFORMATORY

Napięcia przejściowe generowane w sieciach elektrycznych oddziałujące na transformatory są źródłem przepięć w uzwojeniach poddawanych działaniu napięcia i innych uzwojeniach tej samej fazy oraz faz sąsiednich. Przepięcia są przenoszone przez transformatory w wyniku sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami (rys. 1).



Rys. 1. Wysokoczęstotliwościowy model uzwojeń (GN, DN) jednej fazy transformatora: C_{Gz} , C_{Dz} - pojemności doziemne uzwojeń, C_G , C_D - pojemności własne uzwojeń, C_{GD} - pojemności między uzwojeniami, L_G , L_D , M_{DG} - indukcyjności własne i wzajemne między uzwojeniami [11]

Przebiegi i wartości maksymalne prądów przenoszonych przez transformatory są zależne od przebiegów oddziaływujących prądów zewnętrznych oraz zjawisk przejściowych w uzwojeniach, stanowiących złożony układ elektromagnetyczny. Na przykład przy oddziaływaniu prądów zawierających składowe oscylacyjne może nastąpić wzmacnianie prądów przenoszonych w wyniku zjawiska rezonansu jeżeli częstotliwość prądów zewnętrznych jest równa częstotliwości własnej transformatora [12]. Przepięcia przenoszone przez transformatory stanowią zagrożenie nie tylko układów izolacyjnych uzwojeń, ale także zasilanych urządzeń elektrycznych.

3. MODEL UZWOJEŃ DO WYZNACZANIA PRZEPIĘĆ PRZENOSZONYCH

W celu symulacji przebiegów prądów przenoszonych przez transformatory zastosowano model uzwojeń opracowany z zastosowaniem charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia. Funkcja przenoszenia transformatora TF jest definiowana, jako zależność częstotliwościowa ilorazu napięcia indukowanego na zaciskach wybranego uzwojenia i napięcia zasilającego inne uzwojenie:

$$\overline{TF}(f) = \frac{\overline{U}_2(f)}{\overline{U}_1(f)} \quad (1)$$

gdzie: $U_1(f)$, $U_2(f)$ - odpowiednio napięcie zasilające i napięcie indukowane w innym uzwojeniu transformatora

Funkcja przenoszenia transformatorów jest przedstawiana w postaci zależności częstotliwościowej modułu funkcji i jej fazy zapisanych wzorami:

$$|\overline{TF}(f)| = \frac{|\overline{U}_2(f)|}{|\overline{U}_1(f)|} \quad (2)$$

$$\varphi(f) = \arctan \frac{\text{imag}(\overline{TF}(f))}{\text{real}(\overline{TF}(f))} \quad (3)$$

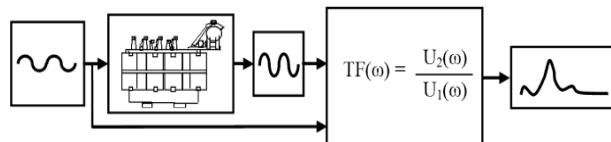
gdzie: $|\overline{TF}(f)|$ - moduł funkcji przenoszenia,

$\varphi(f)$ - faza funkcji przenoszenia,

Wykresy zależności $|\overline{TF}(f)|$ i $\varphi(f)$ przedstawiają poszczególne rezonanse, odpowiadające biegunom i zerom funkcji przenoszenia. Częstotliwości rezonansowe funkcji są charakterystyczne dla transformatora.

Funkcje przenoszenia transformatorów można wyznaczać różnymi metodami. Najczęściej w tym celu jest stosowana metoda polegająca na zasilaniu jednego uzwojenia napięciem o przebiegu sinusoidalnym i zmiennej częstotliwości oraz rejestracji przebiegu napięcia

zasilającego i napięcia indukowanego w innym uzwojeniu przy danej częstotliwości (*SFRA* – ang. *Sweep Frequency Response Analysis*) (rys. 2) [13].



Rys. 2. Schemat blokowy metody wyznaczania zależności $TF(f)$ transformatorów przy zastosowaniu wymuszenia sinusoidalnego (*SFRA*)

Charakterystyka doświadczalna funkcji przenoszenia jest aproksymowana zależnością w postaci:

$$TF(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (4)$$

gdzie: s – operator Laplace'a,

a_n – bieguny,

c_n – residua,

d, h – stałe.

Aproksymacja zależności $TF(s)$ jest realizowana z zastosowaniem metody dopasowania wektorowego (ang. *Vector Fitting*) [14]. W tym celu, w badaniach przedstawionych w artykule, zastosowano program komputerowy, opracowany w środowisku *Matlab* z zaimplementowaną metodą dopasowania wektorowego. W środowisku *Matlab* (*Simulink*) wyznaczono także przebiegi prądów przenoszonych przez transformator korzystając z funkcji przenoszenia transformatora zapisanej w postaci (4) aproksymującej doświadczalną zależność $TF(f)$.

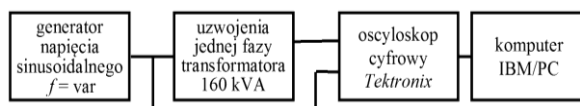
4. WYNIKI REJESTRACJI CHARAKTERYSTYKI $TF(f)$

Jako obiekt doświadczalny zastosowano uzwojenia jednej fazy transformatora 160 kVA, 15,75/0,4 kV (tab. 1). Podczas badań i symulacji uzwojenia nie były połączone z uzwojeniami innych faz.

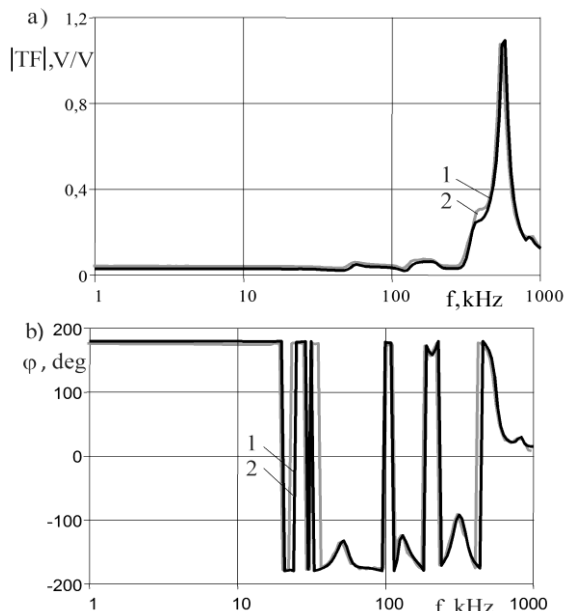
Tabela 1: Parametry podstawowe transformatora 160 kVA

parametr	wartość
S_n , kVA,	160
U_n , kV	15/0,4
$U_{z\%}$, %	4,5
ΔP_{Fe} , kW	0,3
ΔP_{Cu} , kW	2,35
I_0 , %	1,2

Schemat blokowy stanowiska doświadczalnego wykorzystywany do rejestracji zależności częstotliwościowej funkcji przenoszenia przedstawiono na rysunku 3. Zawiera on generator napięcia o przebiegu sinusoidalnym 10 V_{pp} i częstotliwości zmieniającej się w zadanym zakresie oraz oscyloskop cyfrowy typu *Tektronix* połączony z komputerem *IBM/PC*, umożliwiającym opracowywanie wyników badań.



Rys. 3. Schemat stanowiska do rejestracji funkcji przenoszenia $TF(f)$ uzwojeń transformatora doświadczalnego 160 kVA

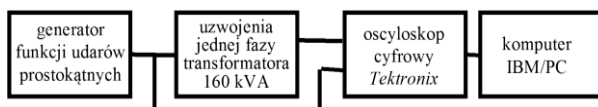


Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa funkcji przenoszenia transformatora 160 kVA: a - zależność $|TF|(f)$, b - zależność $\varphi(f)$; 1 - wynik badań, 2 - wynik obliczeń

Doświadczalne zależności częstotliwościowe modułu funkcji przenoszenia i przesunięcia fazowego dla uzwojeń jednej fazy transformatora 160 kVA zamieszczono na rysunku 4. Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że napięcia przenoszone w uzwojeniu dolnego napięcia osiągają największe wartości dla częstotliwości 550 kHz. Kształty teoretyczne zależności amplitudy i fazy funkcji przenoszenia aproksymowane wyrażone wzorem (4) są zbliżone do wyników rejestracji.

5. WYNIKI POMIARÓW I SYMULACJI PRZEPIĘĆ PRZENOSZONYCH

Wykonano badania i symulacje przebiegów napięć przenoszonych przez uzwojenia jednej fazy transformatora 160 kVA. Celem badań było potwierdzenie możliwości wyznaczania przebiegów teoretycznych napięć przenoszonych przez uzwojenia transformatorów przy zastosowaniu metody, której podstawą są charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatorów (rys. 5).

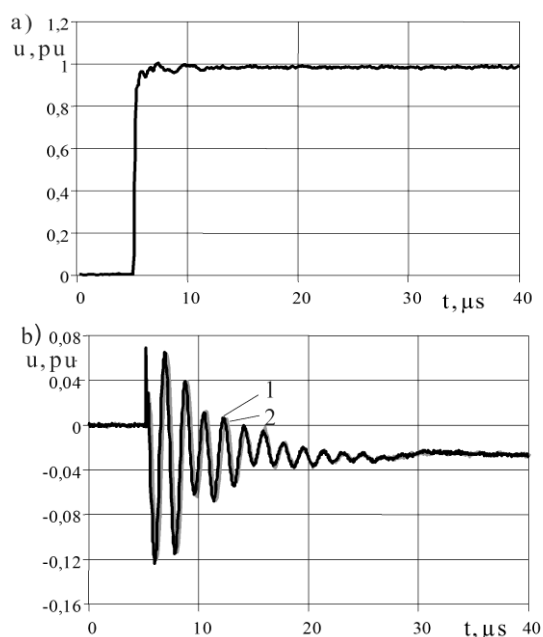


Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do rejestracji napięć przenoszonych przez uzwojenia transformatora doświadczalnego 160 kVA

Badania obejmowały rejestrację napięć przenoszonych w uzwojeniu dolnego napięcia przy oddziaływaniu między zaciskami uzwojenia górnego napięcia transformatora doświadczalnego udaru napięciowego o przebiegu prostokątnym $10 V_{pp}$ (tab. 1). Wyniki badań przedstawiono na rysunku 6 w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości maksymalnej napięcia wymuszającego napięcia.

Wyniki badań porównano z wynikami symulacji przebiegów napięć przenoszonych. Symulacje wykonano z zastosowaniem modelu uzwojeń mającego postać charakterystyki częstotliwościowej funkcji przenoszenia zapisanej wzorem (4) (rys. 4, krzywa 2), aproksymującej

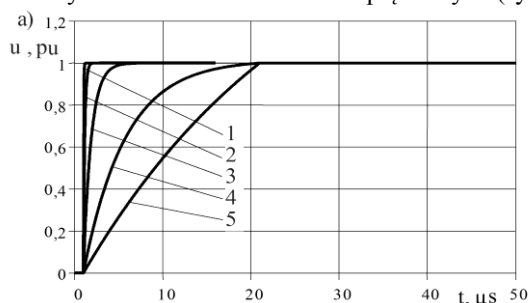
charakterystykę $TF(f)$ zarejestrowaną dla uzwojeń transformatora doświadczalnego (rys. 4, krzywa 1). Obliczenia wykonano w środowisku *Matlab (Simulink)*. Wyniki obliczeń zamieszczono na rysunku 6b (krzywa 2).

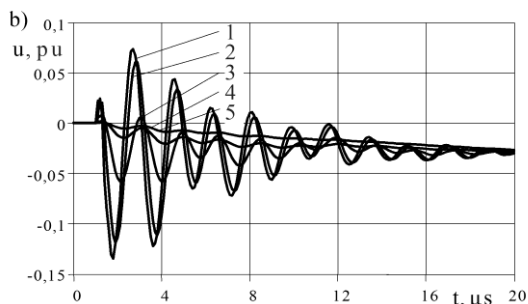


Rys. 6. Udar napięciowy prostokątny na zaciskach uzwojenia wysokiego napięcia transformatora 160 kVA (a) i przebiegi napięć przenoszonych w uzwojeniu dolnego napięcia transformatora (b): 1 - wynik rejestracji, 2 - wynik symulacji

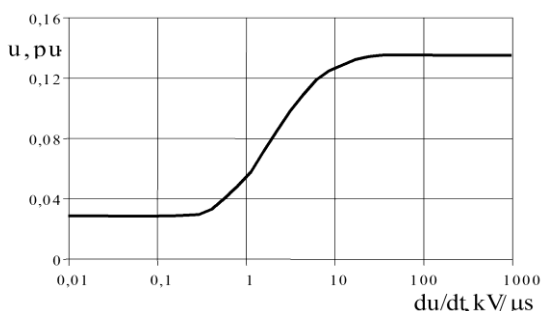
Na podstawie analizy porównawczej przebiegów napięć przenoszonych przez uzwojenia jednej fazy transformatora doświadczalnego, wyznaczonych przy zastosowaniu metody, której podstawą są charakterystyki doświadczalne funkcji przenoszenia i wyników rejestracji (rys. 6) napięć można stwierdzić, że przebiegi teoretyczne napięć są zbliżone do wyników badań.

Stosując przedstawioną metodę symulacji napięć przenoszonych, wykonano także obliczenia przebiegów napięć przenoszonych przez uzwojenia transformatora 160 kVA generowanych przez udary o przebiegach napięciowych o różnych stromościach (rys. 7). Celem symulacji było przedstawienie przykładowego zastosowania przedstawionej metody symulacji napięć przenoszonych przez transformatory. Wykorzystując wyniki obliczeń napięć przenoszonych przez transformator opracowano wykres zależności wartości maksymalnych napięć przenoszonych od stromości udarów napięciowych (rys. 8).





Rys. 7. Udarы napięciowe o różnych stromościach narastania między zaciskami uzwojenia górnego napięcia transformatora 160 kVA (a) i przebiegi prępień przenoszonych do uzwojenia dolnego napięcia (b)



Rys. 8. Zależność wartości maksymalnych prępień przenoszonych do uzwojenia dolnego napięcia transformatora 160 kVA (rys. 7) od stromości udarów napięciowych

Na podstawie analizy wyników symulacji prępień zamieszczonych na rysunkach 7 i 8 można stwierdzić, że prępiecia przenoszone do uzwojenia dolnego napięcia transformatora doświadczalnego 160 kVA podczas oddziaływania udarów napięciowych o stromościach większych od $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$ osiągają wartości maksymalne przekraczające czterokrotnie wartości napięcia wynikającego z przekładni transformatora.

6. PODSUMOWANIE

Prępiecia generowane w układach elektroenergetycznych są przenoszone przez uzwojenia transformatorów w wyniku sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami. Wykonano badania i symulacje wybranych prępień przenoszonych do uzwojenia dolnego napięcia dla transformatora doświadczalnego podczas działania udarów o różnych stromościach. Podstawą symulacji był model transformatora, opracowany przy zastosowaniu charakterystyki częstotliwościowej funkcji przenoszenia transformatora. Na podstawie analizy porównawczej wyników symulacji i badań można stwierdzić, że przedstawiona metoda umożliwia wyznaczanie z dużą

dokładnością przebiegów prępień przenoszonych przez uzwojenia transformatorów.

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, 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] Rocha A. C. O.: Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, CIGRÉ Session 2008, C4-104, Paris, Aug. 2008, pp. 1-10
- [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, No3, 2008, pp. 441 - 449
- [6] Fujita S., Hosokawa N., Shibuya Y.: Experimental investigations of high frequency oscillation in transformer windings, IEEE Trans. Pow. Deliv., 13, 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, 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] 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, 2009, pp. 360-372
- [11] Florkowski M., Furgał J.: Rozpoznawanie uszkodzeń uzwojeń na podstawie funkcji przenoszenia transformatorów, Przegł. Elekt., R. 83, Nr 12/2007, str. 60-63
- [12] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Narażenia transformatorów od prępień przenoszonych przez uzwojenia, Przeg. Elektrot., R. 88, Nr 5a, 2012, s. 104-107
- [13] Florkowski M., Furgał J.: Detection of Transformer Windings Deformations Based on the Transfer Function - Measurements and Simulations, Meas. Scienc. and Techn., No. 14, 2003, pp. 1986-1992
- [14] Gustavsen B., Semlyen A.: Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting, IEEE Trans. Pow. Deliv., Vol. 14, No. 3, 1999, pp. 1052-1061

DETERMINATION OF OVERVOLTAGES TRANSFERRED THROUGH POWER TRANSFORMER WINDINGS WITH USE OF FREQUENCY CHARACTERISTICS

Keywords: transformers, transferred overvoltages, simulations, measurements

Overvoltages transferred through power transformer windings can be harmful to dielectric insulation windings and supplied electrical devices. Determination of overvoltages transferred through windings require usage of power transformer models in which are implemented measured transfer functions of power transformer. The method of simulation of transferred overvoltages through power transformer is presented in the paper. Simulations were done with usage of experimental frequency characteristics of transfer function for 160kVA, 15/0.4kV transformer. Simulations results are compared with measurements.