

ANALIZA ROZKŁADÓW NAPIĘĆ PRZEJŚCIOWYCH W UZWOJENIACH, GENEROWANYCH PODCZAS ŁĄCZENIA TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH

Jakub FURGAŁ¹, Piotr PAJĄK² Łukasz FUŚNIK³

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel: 012 617 37 61 fax: (012) 634 57 21, e-mail: furgal@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel: 012 617 44 16 fax: (012) 634 57 21, e-mail: ppajak@agh.edu.pl
3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, student V roku, e-mail: fusniklukasz@interia.pl

Streszczenie: Przepięcia generowane w układach elektroenergetycznych stanowią szczególne narażenia eksploatacyjne układów izolacyjnych transformatorów. Często przyczyną przecięć są stany łączeniowe. Do łączenia transformatorów rozdzielczych coraz szersze zastosowanie znajdują wyłączniki próżniowe, generujące przepięcia o nietypowych przebiegach. W artykule przedstawiono wyniki badań rozkładów przecięć w uzwojeniach podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi.

Słowa kluczowe: transformatory, przepięcia łączeniowe, badania rozkładów przecięć

1. WPROWADZENIE

Transformatory, pracujące w układach elektroenergetycznych, są narażone na oddziaływanie przecięć generowanych podczas czynności łączeniowych w niektórych stanach awaryjnych oraz w czasie wyładowań piorunowych. Przepięcia takie są źródłem przecięć wewnętrznych, narażających układy izolacyjne uzwojeń pomimo stosowanej ochrony przepięciowej.

Wartości przecięć powstających w uzwojeniach transformatorów są zależne nie tylko od wartości maksymalnych przecięć na zaciskach wejściowych, ale również od ich przebiegów. Mimo zastosowanych ograniczników narażenia przepięciowe transformatorów w niektórych stanach przejściowych w sieciach mogą stanowić znaczne narażenia układów izolacyjnych. Są to stany związane z czynnościami łączeniowymi oraz niektórymi awariami (np. zwarciami), podczas których generowane są przepięcia o charakterze oscylacyjnym i wartościach mniejszych od poziomu ochrony ograniczników. Przepięcia takie docierają do transformatorów praktycznie bez zmiany kształtu i wartości maksymalnych [1-3]. Zwykle składowe oscylacyjne przecięć mają przebiegi sinusoidalne tłumione.

Do łączenia transformatorów w sieciach średnich napięć coraz szersze zastosowanie znajdują wyłączniki próżniowe. Charakteryzują się one dużą trwałością

łączeniową. Wyróżniają je jednak specyficzne właściwości, wpływające na narażenia przepięciowe układów izolacyjnych. Najważniejsze z nich to zdolność ucinania prądu przed naturalnym przejściem przez zero oraz zdolność wyłączania prądów wielkiej częstotliwości, a także szybki wzrost wytrzymałości elektrycznej powrotnej. Konsekwencją zjawisk w komorach próżniowych są przepięcia narażające układy izolacyjne urządzeń wyłączanych. Kształty i wartości maksymalne przecięć generowanych podczas wyłączania urządzeń elektrycznych wyłącznikami próżniowymi zawierają składowe oscylacyjne o przebiegach odmiennych od przebiegów sinusoidalnych. Powstają one w warunkach otwierania wyłączników w wyniku przeskoków powrotnych pomiędzy stykami.

Przebiegi zjawisk przejściowych wewnątrz uzwojeń transformatorów są zależne od reakcji złożonego nieliniowego układu RLC , jaki stanowią transformatory na przepięcia zewnętrzne. Niezbędna jest, więc szczegółowa analiza narażeń układów izolacyjnych wszystkich uzwojeń od przecięć docierających do zacisków transformatora [4-7]. W celu oceny narażeń układów izolacyjnych transformatorów niezbędna jest analiza rozkładów napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń przy oddziaływaniu przecięć o zróżnicowanych przebiegach.

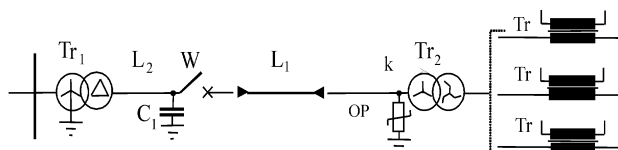
Ze względu na coraz szersze zastosowanie wyłączników próżniowych w sieciach elektrycznych szczególne znaczenie mają badania przecięć łączeniowych w urządzeniach elektrycznych współpracujących z wyłącznikami próżniowymi umożliwiające ocenę narażających układy izolacyjne [3,4].

W artykule przedstawiono analizę przecięć łączeniowych na zaciskach i rozkładów przecięć wewnątrz uzwojeń transformatorów. Podstawą analizy były wyniki badań przecięć generowanych podczas łączenia transformatorów wyłącznikami próżniowymi.

4. BADANIA PRZEPIĘĆ PODCZAS ŁĄCZENIA TRANSFORMATORÓW

4.1. Charakterystyka stanowiska doświadczalnego

Badania przepięć łączeniowych na zaciskach transformatora wyłączanego wykonano w układzie doświadczalnym przedstawionym na rysunku 1, stanowiącym fragment sieci rozdzielczej średniego napięcia. Zawiera on transformator zasilający Tr_1 , transformator łączony Tr_2 wyłącznikiem W oraz linie zasilające L_1 i L_2 . Linia L_1 jest wykonana przy użyciu kabla o długości 80 m, a linia L_2 ma postać przewodów o długości 2 m. Do łączenia transformatorów zastosowano wyłącznik próżniowy typu $VD4$. Bateria C_1 zawiera trzy kondensatory jednofazowe o pojemności 500 nF. Transformator Tr_2 jest obciążony trzema transformatorami jednofazowymi typu TrCA o mocy 10 kVA i napięciu znamionowym 0,5/0,22 kV na biegu jałowym



Rys. 1. Schemat układu do badania przepięć łączeniowych na zaciskach transformatora Tr_2 . Tr_1 - transformator zasilający typu TNOSCT-250/15.75PNS, L_1 - linia kablowa, L_2 - szynoprzewody, W - wyłącznik próżniowy, C_1 - bateria kondensatorów, Tr_2 - transformator doświadczalny typu TOC 20/10, k - punkt rejestracji przepięć, OP - ograniczniki przepięć, Tr - transformatory obciążające transformator wyłączany

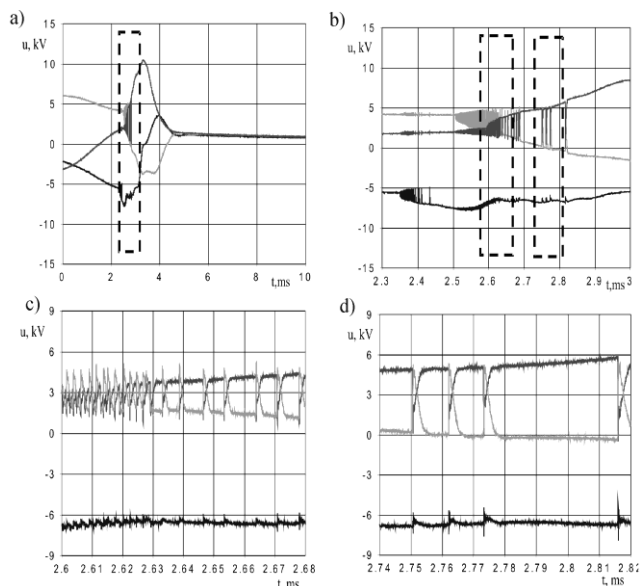
Tabela 1. Podstawowe parametry transformatorów stosowanych w stanowisku doświadczalnym

parametr/typ	TNOSCT-250/15.75PNS	TOC 20/10
S_n , kVA	250	20
U_n , kV	15,75/6	6/0,4
U_z , %	4,5	4,29
ΔP_{Fe} , kW	0,486	0,02
ΔP_{Cu} , kW	3,509	0,22
I_0 , %	1,0	0,54

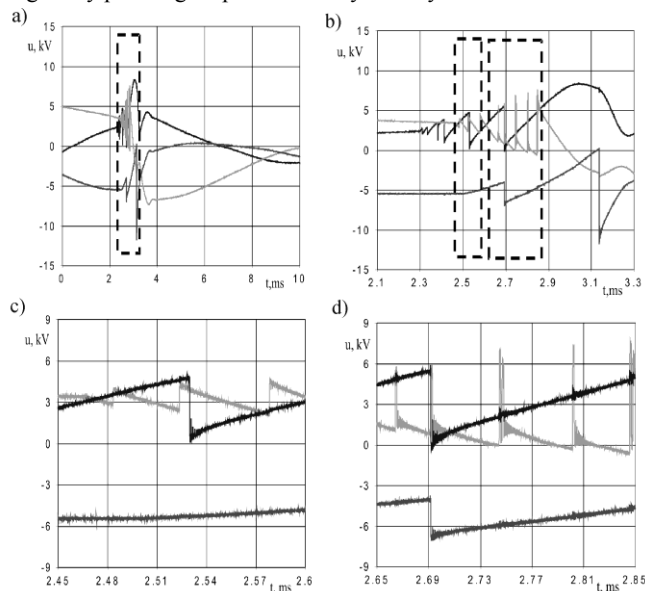
Do ochrony przepięciowej transformatora Tr_2 zastosowano beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali typu POLIM-D-6 [8].

4.2. Wyniki badań przepięć na transformatorze wyłączanym

Badania obejmowały rejestrację przepięć doziemnych, generowanych na zaciskach transformatora Tr_2 podczas jego wyłączania. Przykładowe wyniki badań przepięć podczas wyłączania transformatora w układzie przedstawionym na rysunku 1 oraz w układzie bez transformatorów Tr oraz po zamianie linii L_1 przez linię L_2 przedstawiono na rysunku 3. Z analizy wyników badań przebiegów przepięć, powstających podczas wyłączania transformatora wyłącznikami próżniowymi widać, że układ izolacyjny transformatora jest narażony wówczas na oddziaływanie przepięć aperiodycznych o wartościach znacznie większych od wartości maksymalnych napięcia roboczego, zawierających składowe oscylacyjne. Oscylacje mają charakter powtarzających się udarów o czasach narastania znacznie dłuższych od czasów ucinania.



Rys. 2. Przebiegi doświadczalne fazowych napięć przejściowych na zaciskach transformatora Tr_2 (rys. 1) wyłączanego wyłącznikiem próżniowym: a - przebieg napięć w czasie 10 ms, b,c,d - wybrane fragmenty przebiegów przedstawionych na rysunku a



Rys. 3. Przebiegi doświadczalne fazowych napięć przejściowych na zaciskach transformatora Tr_2 (rys. 1) (bez obciążenia Tr i po zamianie linii L_1 linią L_2) wyłączanego wyłącznikiem próżniowym: a - przebiegi napięć w czasie 10 ms, b,c,d - wybrane fragmenty przebiegów przedstawionych na rysunku a

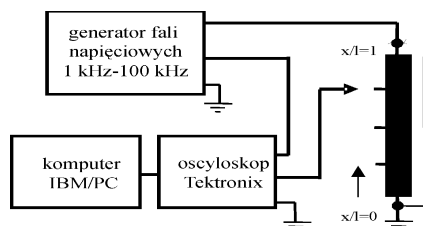
Częstotliwości serii udarów, które tworzą składową są zawarte w przedziałach od kilkudziesięciu kiloherców do kilkuset kiloherców. Składowe te są generowane w wyniku przeskoków pomiędzy stykami otwieranego wyłącznika próżniowego. Przeprowadzone badania potwierdzają także, że ograniczniki przepięć z tlenków metali nie mają istotnego wpływu na zmianę przebiegów tych przepięć i nie powodują tłumienia składowych oscylacyjnych przepięć.

5. BADANIA ROZKŁADÓW PRZEPIĘĆ ŁĄCZENIOWYCH W UZWOJENIACH

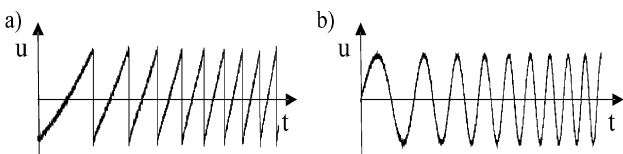
5.1. Stanowisko pomiarowe

Drugi etap badań napięć łączeniowych w transformatorach obejmował rejestrację napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń generowanych przez napięcia o przebiegach odzwierciedlających składowe oscylacyjne powstające na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikami próżniowymi. Jak wynika z badań przedstawionych na rysunkach 2 i 3, oscylacje mają charakter powtarzających się uderzeń o czasach narastania znacznie dłuższych od czasów ucinania. Do symulacji tych przebiegów zastosowano funkcję ramp. Wyniki badań porównano z badaniami przebiegów napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń podczas oddziaływania składowych oscylacyjnych sinusoidalnych. Składowe oscylacyjne o przebiegu sinusoidalnym zawierają zwykle przebiegi napięć łączeniowych w układach elektroenergetycznych. Celem wykonanych badań było wyznaczenie rozkładów napięć łączeniowych wewnątrz uzwojeń.

Schemat układu pomiarowego, do badań rozkładów napięć przejściowych łączeniowych w uzwojeniach transformatorów, przedstawiono na rysunku 4. Jako źródło napięcia wykorzystano generator firmy Tektronix typ AFG310 o napięciu wyjściowych 20 Vpp. Do rejestracji przebiegów zastosowano oscyloskop Tektronix typu TDS 750 D współpracujący z komputerem klasy IBM/PC. Wykonano pomiary napięć wewnątrz transformatorów przy wymuszeniu niskonapięciowym o zmiennej częstotliwości w zakresie 1-100 kHz.



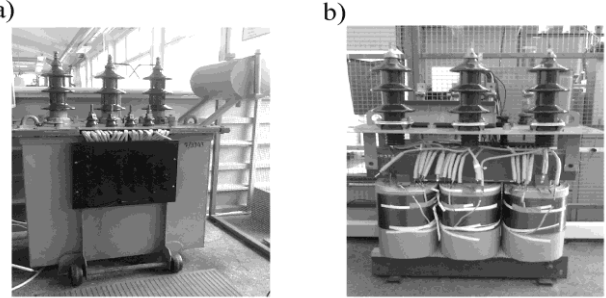
Rys. 4. Schemat stanowiska do rejestracji przebiegów napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń transformatorów generowanych przez składowe oscylacyjne napięć na zaciskach transformatora wyłączanego



Rys. 5. Przebiegi typu ramp i sinusoidalny, symulujące kształty składowych oscylacyjnych napięć łączeniowych: a - przebieg typu ramp, b - przebieg sinusoidalny

Pomiary przebiegów napięć w uzwojeniach wykonano przy zastosowaniu źródeł o napięciu 20 V. Rdzeń ferromagnetyczny nie ma praktycznie wpływu na indukcyjności uzwojeń dla częstotliwości większych od kilkudziesięciu kiloherców [9]. Dla dużych stromości napięcia wymuszenia i dużej częstotliwości wpływ rdzenia na zjawiska przejściowe w uzwojeniach może być pominięty. Dlatego dla takich napięć zasilających uzwojenia transformatorów mają liniowy charakter i wartości maksymalne napięć wymuszających o dużej stromości i częstotliwości praktycznie nie mają wpływu na przebiegi napięć wewnętrznych w uzwojeniach.

Obiektami doświadczalnymi były transformatory rozdzielcze: 20 kVA i 250 kVA (rys. 6, tab.2).



Rys. 6. Widok transformatorów doświadczalnych: a - transformator 20 kVA, 15/0,4 kV; b - transformator 250 kVA, 15/0,4 kV

Tabela 2: Podstawowe parametry mechaniczne uzwojeń transformatorów doświadczalnych

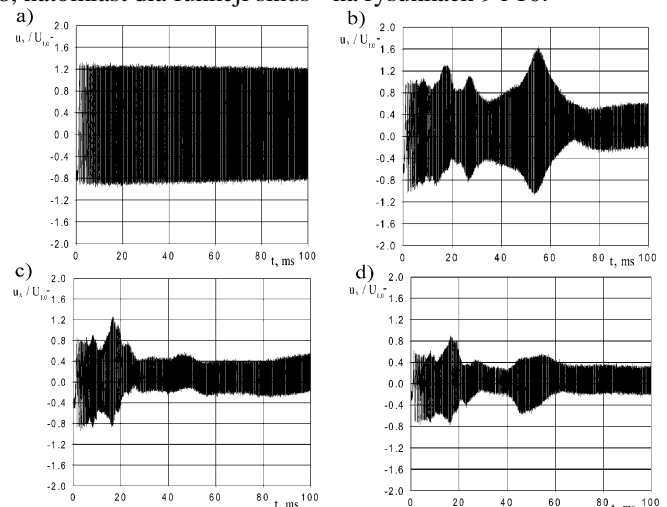
moc znam. transformatora, kVA	20	250
napięcie znamionowe uzwojenia, kV	15	15
typ uzwojenia	c*	w*
liczba zwojów w cewce (warstwie),	650	191
liczba cewek (warstw), -	4	14
wysokość uzwojenia H, mm	250	366
średnica wewnętrzna d_w , mm	157	0,201/0,233
średnica zewnętrzna d_z , mm	205	0,255/0,303
szerokość cewki (warstwy) h, mm	25	366
szerokość szczeliny pomiędzy cewkami (warstwami) d, mm	5	2

* c - uzwojenie cewkowe, w - uzwojenie warstwowe

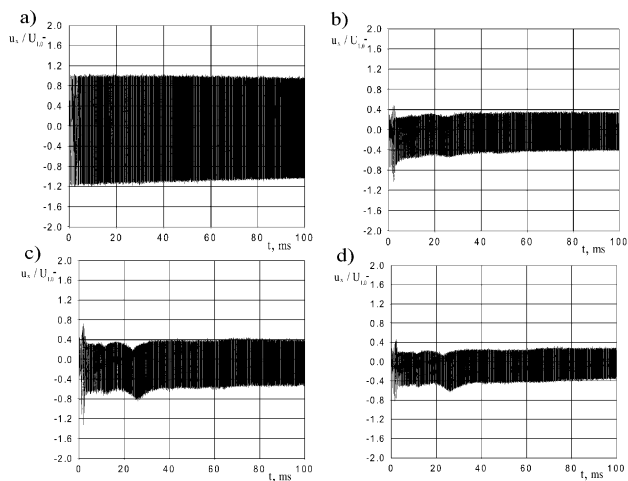
Konstrukcje i parametry uzwojeń transformatorów doświadczalnych są zróżnicowane. Uzwojenie górnego napięcia transformatora 20 kVA jest uzwojeniem cewkowym, a uzwojenie dolnego napięcia jest wykonane jako warstwowe. Uzwojenia transformatora 250 kVA są wykonane jako warstwowe.

5.2. Wyniki badań rozkładów napięć przejściowych łączeniowych w uzwojeniach

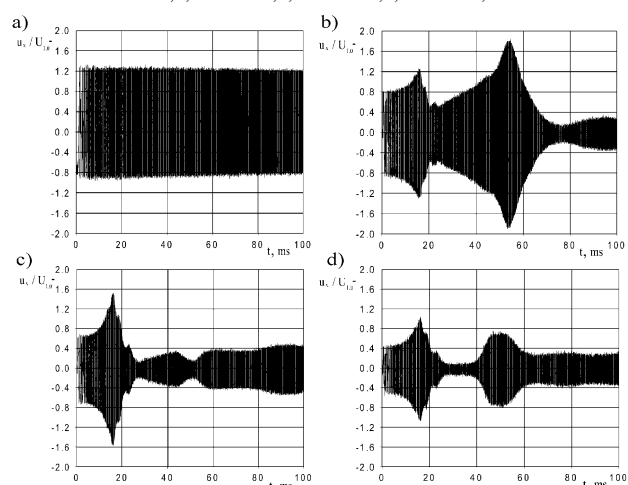
Wyniki badań mają postać przebiegów napięć przejściowych doziemnych generowanych przez funkcje ramp i sinus w zakresie 1-100 kHz w wybranych punktach uzwojeń transformatorów doświadczalnych. Wyniki badań, wykonanych przy zastosowaniu funkcji ramp, przedstawiono na rysunkach 7 i 8, natomiast dla funkcji sinus - na rysunkach 9 i 10.



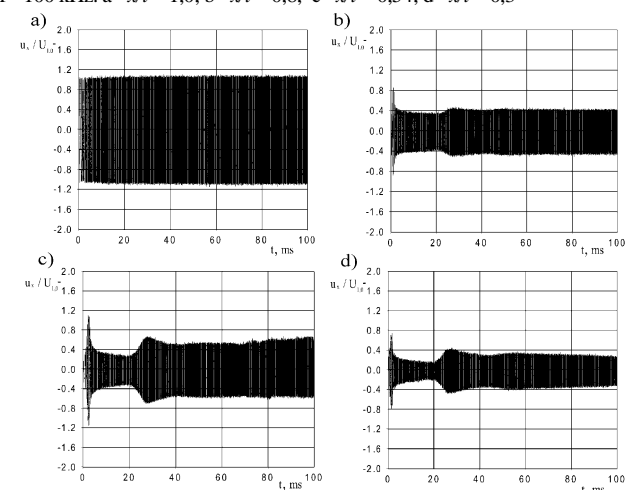
Rys. 7. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w wybranych punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA generowanych przez funkcję ramp (rys. 5a) w zakresie częstotliwości 1-100 kHz: a - $x/l = 1,0$; b - $x/l = 0,8$; c - $x/l = 0,54$; d - $x/l = 0,3$



Rys. 8. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w wybranych punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 250 kVA generowanych przez funkcję ramp (rys. 5a) w zakresie częstotliwości 1-100 kHz: a - $x/l = 1,0$; b - $x/l = 0,8$; c - $x/l = 0,4$; d - $x/l = 0,27$



Rys. 9. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w wybranych punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA generowanych przez funkcję sinus (rys. 5b) w zakresie częstotliwości 1 - 100 kHz: a - $x/l = 1,0$; b - $x/l = 0,8$; c - $x/l = 0,54$; d - $x/l = 0,3$



Rys. 10. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w wybranych punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 250 kVA generowanych przez funkcję sinus (rys. 5b) w zakresie częstotliwości 1-100 kHz: a - $x/l = 1,0$; b - $x/l = 0,8$; c - $x/l = 0,4$; d - $x/l = 0,27$

ANALYSIS OF DISTRIBUTION FOR TRANSIENT VOLTAGES IN WINDINGS GENERATED DURING SWITCHING OF POWER TRANSFORMERS

Keywords: transformers, switching overvoltages, investigations of overvoltage distributions

Overvoltages generated in power systems create special exploitation risks for insulation systems of power transformers. They are usually generated during switching operations. Vacuum circuit breakers are very often used in electric power systems. Unfortunately such circuit breakers generate surges of abnormal waveforms. The results of investigations for overvoltage distributions generated in windings during switching off of transformers by use of vacuum circuit breakers are presented in the paper.

Z analizy przebiegów przepięć wewnątrz uzwojeń wynika, że rozkłady napięć w transformatorach podczas oddziaływania funkcji ramp nie są liniowe. Dla wybranych częstotliwości napięcia przejściowe wewnątrz uzwojeń są wzmacniane. Efekty tych zjawisk ujawniają się szczególnie w uzwojeniu górnego napięcia transformatora 20 kVA. Ich skutkiem są przepięcia o dużych wartościach szczytowych. Np. w punkcie $x/l=0,8$ wartości przepięć osiągają 1,6-krotną wartość napięcia na zaciskach transformatora (rys. 7b). Z badań wynika również, że podczas oddziaływania przepięcia o przebiegu sinusoidalnym przepięcia w uzwojeniach są większe od przepięć generowanych przez napięcie o kształcie ramp (np. rys. 9b).

5. PODSUMOWANIE

Badania potwierdzają, że ograniczniki przepięć z tlenków metali nie mają zasadniczego wpływu na przebiegi składowych oscylacyjnych przepięć łączeniowych. Składowe oscylacyjne przepięć o zróżnicowanych przebiegach stanowią źródła przepięć o dużych wartościach maksymalnych wewnątrz uzwojeń jeżeli częstotliwość przepięć jest zgodna z częstotliwością własną transformatora. Konsekwencją tego jest nieliniowość rozkładów napięć łączeniowych wewnątrz uzwojeń.

LITERATURA

1. Shibuya Y., Fujita S., Shimomura T.: Effects of Very Fast Transient Overvoltages on Transformer. IEE Proc. - Gener. Transm. 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. Trans. Distr. Vol.144, No. 5, Sept. 1997, pp. 461 - 468,
3. Wróblewski Z.: Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych. PAN: Kom. Elektrot., Seria Wyd.: Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 25, Ofic. Wyd. Pol. Wrocław, 2005
4. Popov M., Acha E.: Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 14, Nr 4, Oct. 1999, pp. 1317 - 1322
5. Changping A., Wenxia S., Shiwei L., Leguan G.: Vacuum circuit breaker overvoltage for interrupting unloaded transformer. 12th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 20-24 August 2001, Bangalore (India), paper 3.4
6. Popov M., van der Sluis L.: Improved calculations for no-load transformer switching surges. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol.16, No. 3, July 2001. pp. 401 - 408
7. Wong S. M., Snider L. A., Loi E. W.: Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker. Int. Conf. on Power Systems Transients IPST'2003, 28 Sept.-2 Oct. 2003, New Orleans, paper 14a.3
8. Ograniczniki przepięć z tlenków metali typu POLIM - D. ABB Power Distribution, Wyd. 08.2000 (str. intern.: www.abb.pl)
9. 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