

Narazenia przepięciowe transformatorów w układach z wyłącznikami próżniowymi

Streszczenie: W sieciach elektroenergetycznych średnich napięć coraz szersze znaczenie znajdują wyłączniki próżniowe. Wyróżnia je duża trwałość i niezawodność działania. Wykazują one jednak specyficzne właściwości wpływające na przebiegi prądów łączeniowych. W artykule przedstawiono analizę narażeń przepięciowych transformatorów rozdzielczych. Podstawą analizy były wyniki badań prądów generowanych podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi. Analizowano wpływ konfiguracji układów elektrycznych i ograniczników prądów z tlenków metali na przepięcia łączeniowe.

Abstract: The importance of vacuum breakers used in medium voltage electrical networks has increased. They are extremely durable and reliable and due to their special qualities. They can influence the switching surge waveforms. The following paper presents an analysis of overvoltages generated by vacuum breakers during the process of switching off the transformers. Additionally, the influence of configuration of electrical network and metal oxide surge arresters on switching overvoltages was also analysed. (**Overvoltage impact on transformers in networks with vacuum breakers**)

Słowa kluczowe: transformatory, wyłączniki próżniowe, przepięcia łączeniowe, ochrona przepięciowa

Key words: transformers, vacuum breakers, switching overvoltages, overvoltage protection

doi:10.12915/pe.2014.10.32

Wprowadzenie

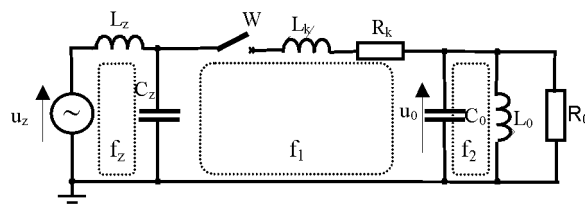
W sieciach elektrycznych średniego napięcia do łączenia urządzeń elektroenergetycznych coraz szersze zastosowanie znajdują wyłączniki próżniowe. Charakteryzują je specyficzne właściwości, wpływające na narażenia układów izolacyjnych łączonych urządzeń od prądów łączeniowych. Najważniejsze z nich to ucinanie prądu przed naturalnym przejściem przez zero, zdolność wyłączania prądów wielkiej częstotliwości i szybki wzrost wytrzymałości elektrycznej powrotnej. Efektem zjawisk w komorach próżniowych wyłączników są napięcia przejściowe o dużych wartościach maksymalnych i nietypowych przebiegach powstające podczas czynności łączeniowych [1-3]. Przepięcia łączeniowe, narażające układy izolacyjne transformatorów w układach z wyłącznikami próżniowymi, są zależne nie tylko od zjawisk w komorach wyłączników, ale także od konfiguracji układów elektrycznych i parametrów urządzeń oraz ochrony przepięciowej. Przepięcia docierające do zacisków transformatora są źródłem prądów wewnętrznych w uzwojeniach. Wartości prądów w transformatorach są efektem reakcji transformatora na przebiegi napięć przejściowych w układach elektroenergetycznych i jest zależna od przebiegów prądów zawierających składowe o zróżnicowanych częstotliwościach oraz wartościach maksymalnych. Przepięcia powstające podczas łączenia transformatorów wyłącznikami próżniowymi były przyczyną stanów awaryjnych wielu transformatorów chronionych przy zastosowaniu bezskiernikowych ograniczników prądów z tlenków metali. Dlatego niezbędne są dalsze badania w zakresie interakcji między transformatorami a układem elektroenergetycznym i analizy wpływu konfiguracji układów na przebiegi prądów łączeniowych oddziałujących na transformatory. Prace takie prowadzone są między innymi w ramach Grupy Roboczej A2/C4.39 CIGRE [4].

W artykule przedstawiono analizę prądów łączeniowych, powstających podczas wyłączania transformatorów średniego napięcia w układach z wyłącznikami próżniowymi. Podstawą analizy były wyniki badań eksperymentalnych prądów powstających w układach o różnych konfiguracjach.

Zjawiska przejściowe podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi

Przebiegi i wartości maksymalne prądów

generowanych podczas wyłączania urządzeń elektrycznych wyłącznikami próżniowymi w dużym stopniu zależą od wartości prądu uciętego przed naturalnym przejściem przez zero. Ucinanie prądu w komorach próżniowych wyłączników jest konsekwencją szybkiego zgaszenia łuku elektrycznego w fazie jego niestabilnego palenia się. Przy niewielkich wartościach chwilowych prądu łuku pojawia się składowa nieustalona prądu o dużej częstotliwości, płynąca w obwodzie $W-L_k-R_k-C_0-C_z-L_{p1}$ (rys. 1) nakładająca się na składową podstawową prądu o częstotliwości sieciowej. Prąd o dużej częstotliwości może zrównoważyć prąd o częstotliwości sieciowej wyłączanego obwodu i spowodować nagle zmniejszenie wartości chwilowej w obwodzie do wartości zbliżonej do zera. W takich warunkach następuje przerwanie obwodu przy niezerowej wartości prądu składowej podstawowej (prąd ucięcia), płynącego przez indukcyjność obciążenia L_0 (wirtualne ucięcie prądu) [7-9].

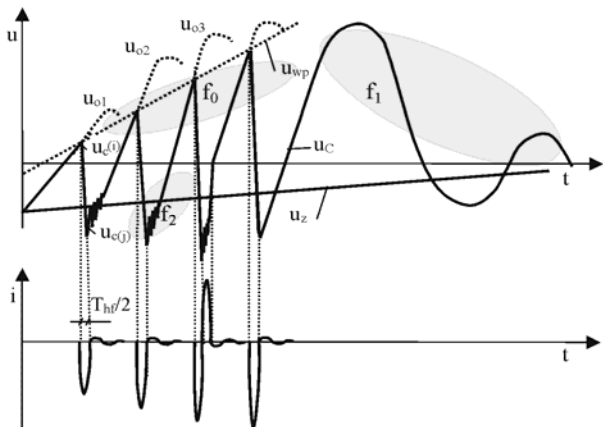


Rys. 1. Schemat zastępczy obwodu z wyłącznikiem próżniowym [1]

Ze względu na bardzo szybkie odzyskiwanie wytrzymałości elektrycznej przerwy międzystykowej, ponowne zapłony łuku elektrycznego zwykle nie występują w wyłącznikach próżniowych. Jeżeli jednak wystąpią, to powodują one zwiększenie prądów łączeniowych. Wartości prądów w takich przypadkach mogą znacznie przekraczać wartości napięć wynikające z energii zgromadzonej w wyłączanym urządzeniu w chwili ucięcia prądu.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi napięć i w wyłączanym obwodzie (rys. 1) podczas ponownych zapłonów łuku w wyłączniku W i prądu wyłącznika [5-7]. Po ucięciu prądu w wyłączniku, prąd w indukcyjności L_0 płynie nadal przez pojemność C_0 , powodując na jej zaciskach szybką zmianę napięcia u_0 . Jednocześnie wzrasta napięcie powrotne pomiędzy stykami wyłącznika, będące różnicą napięć zasilania u_z i wyłączanego obwodu $u_0 \approx u_c$. Przy

powolnym wzroście wytrzymałości przerwy między stykami u_{wp} i szybkim narastaniu napięcia powrotnego ($u_0 \approx u_C$) może wystąpić ponowny zapłon łuku. Towarzyszy temu przepływ prądu wysokiej częstotliwości w obwodzie $C_z-W-L_0-C_0$ (rys. 1) i bardzo szybkie przeładowanie pojemności C_0 do wyższego napięcia $u_C(j)$, jeśli prąd wysokiej częstotliwości zostaje wyłączony przy pierwszym przejściu przez zero. W krótkim czasie palenia się łuku $T_{hf}/2$ prąd w indukcyjności transformatora wyłączanego L_0 nie zdąży zmienić swojej wartości.



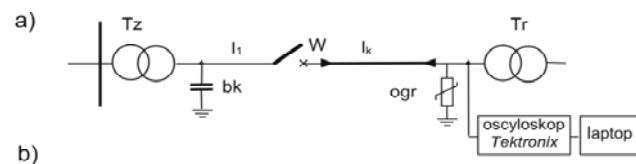
Rys.2. Przebiegi charakterystyczne napięcia sieci u_z , napięcia u_c na wyłączanym transformatorze i wytrzymałości powrotnej u_{wp} wyłącznika oraz przebieg prądu i wyłącznika próżniowego [5]

Jeśli w takiej sytuacji napięcie $u_C(j)$ na pojemności C_0 po zgaśnięciu łuku jest większe od napięcia $u_C(i)$ w chwili zapłonu łuku, to zgromadzona energia w elementach L_0 i C_0 zwiększa się. W konsekwencji tego zwiększać się będą również wartości maksymalne napięcia spodziewanego na zaciskach wyłączanego obwodu.

Badania przepięć narażających transformatory w układach z wyłącznikami próżniowymi

Charakterystyka stanowiska doświadczalnego

Przeprowadzono badania przepięć narażających układ izolacyjny transformatora średniego napięcia podczas wyłączania transformatora w układzie z wyłącznikiem próżniowym, stanowiącym fragment sieci średniego napięcia, przedstawionym na rysunku 1.



Rys.3. Układ do badań przepięć podczas wyłączania transformatora wyłącznikiem próżniowym: a – schemat układu badawczego, b – widok stanowiska: W – wyłącznik próżniowy, Tz – transformator zasilający, Tr – transformator wyłączający, l_k – linia kablowa o długości 85 m, l_1 – szynoprzewody o długości 2 m, ogr – ograniczniki przepięć, bk – bateria kondensatorów 60 nF

Układ zawiera transformator zasilający Tz i transformator wyłączający Tr, wyłącznik próżniowy W typu VD4, linię kablową zasilającą l_k , szynoprzewody l_1 . Podstawowe parametry transformatorów i wyłącznika zamieszczono w tabelach 1 i 2. Linia l_k jest wykonana przy użyciu kabla typu RG– 213U MIL.C 17/D o długości 85 m, a linia l_1 ma postać przewodów o długości 2 m. Ochronę transformatora od przepięć stanowiły ograniczniki beziskiernikowe typu POLIM– D [8-10].

Transformator doświadczalny Tr pracował na biegu jałowym. Do rejestracji przebiegów napięć zastosowano sondy wysokonapięciowe typu TESTEC HVP– 15HF połączone z oscyloskopem cyfrowym Tektronix typu TDS 784D współpracującym z komputerem.

Tabela 1: Dane znamionowe transformatorów Tz i Tr (rys. 3)

| Parametr | TNOSCT– 250/15,75PNS | TOC 20/10 |
|----------------------|----------------------|-----------|
| S_n , kVA | 250 | 20 |
| U_n , kV | 15,75/0,4 | 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 |

Tabela 2: Parametry wyłącznika próżniowego typu VD4 (rys. 3)

| Parametr | Jednostka | Wartość |
|---|----------------|---------|
| Napięcie znamionowe | kV | 12 |
| Szybkość rozchodzenia się styków | $m s^{-1}$ | 1 |
| Maksymalny odstęp pomiędzy stykami | mm | 5 |
| Szybkość odzyskiwania wytrzymałości powrotnej | $V \mu s^{-1}$ | 11,43 |

Tabela 3: Parametry kabla typu RG– 213U MIL.C 17/D linii l_k (rys. 3) [11]

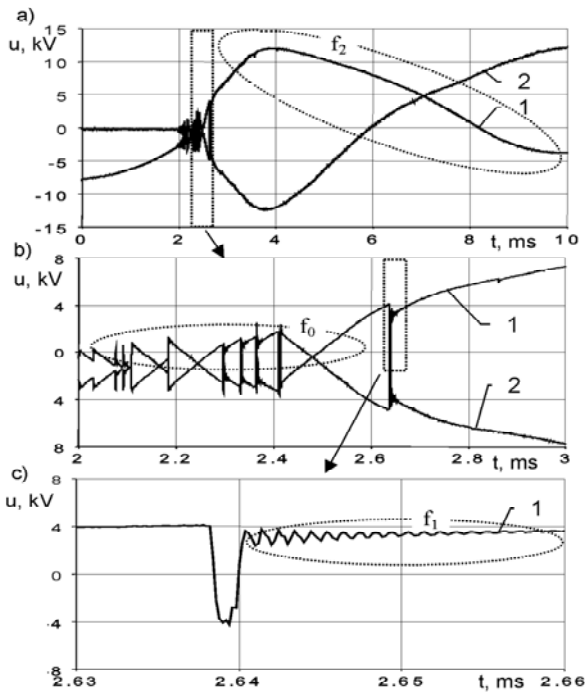
| Parametr | Jednostka | Wartość |
|----------|----------------|----------|
| Z | Ω | 50 |
| C | $pF m^{-1}$ | 101,055 |
| L | $\mu H m^{-1}$ | 0,252637 |

Wykonano badania przepięć w układzie jednofazowym i trójfazowym. Wyniki badań w układzie jednofazowym były podstawą analizy wpływu konfiguracji układu elektrycznego na przebiegi przepięć łączeniowych. W układzie jednofazowym brak jest wpływu napięć i prądów w fazach sąsiednich na przebiegi rejestrowanych przepięć łączeniowych. Celem badań w układzie trójfazowym była analiza wpływu konfiguracji układu elektrycznego i ograniczników przepięć z tlenków metali na przebiegi i wartości maksymalne przepięć narażających układ izolacyjny transformatora średniego napięcia podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym.

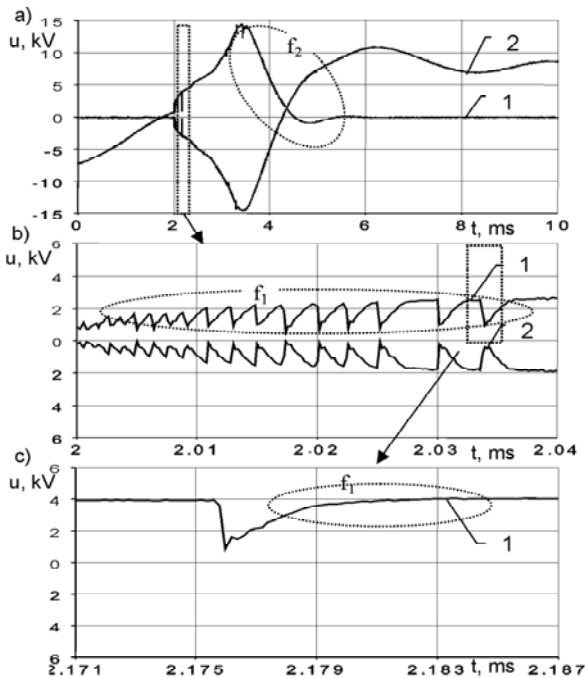
Badania przepięć w układzie jednofazowym

Wyniki badań miały formę przebiegów napięć przejściowych fazowych rejestrowanych na zaciskach transformatora (rys.3). Badania w układzie jednofazowym obejmowały także rejestracje zależności częstotliwościowych impedancji $Z=g(f)$ układów o różnych konfiguracjach.

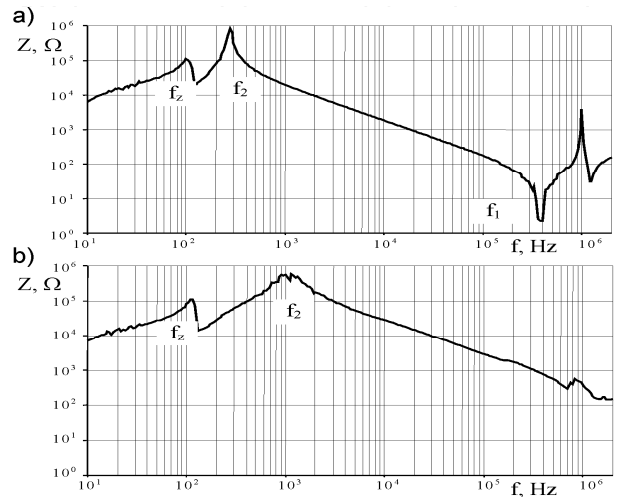
Na podstawie wyników rejestracji przepięć w układzie jednofazowym, przedstawionych na rysunkach 4 i 5, wyznaczono częstotliwości f_0 , f_1 i f_2 (rys. 2) składowych przebiegów przepięć na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikiem próżniowym. Częstotliwości te porównano z częstotliwościami własnymi układów wyznaczonymi na podstawie charakterystyk impedancji $Z=g(f)$ (tabela 4).



Rys.4. Przebiegi napięcia przejściowego fazowego na zaciskach transformatora Tr wyłączanego wyłącznikiem próżniowym W , połączonym z transformatorem za pomocą linii kablowej l_k o długości 85 m w układzie jednofazowym i napięcia między stykami wyłącznika W (rys. 3): a – przebiegi napięć w czasie 10 ms, b, c – fragmenty wykresu z rysunku 4a: 1 – napięcie fazowe na transformatorze Tr , 2 – napięcie między stykami wyłącznika próżniowego W



rys.5. Przebiegi napięcia przejściowego fazowego na zaciskach transformatora Tr wyłączanego wyłącznikiem próżniowym W , połączonym z transformatorem za pomocą przewodów l_1 o długości 2 m w układzie jednofazowym i napięcia między stykami wyłącznika W (rys. 3): a – przebiegi napięć w czasie 10 ms, b, c – fragmenty wykresu z rysunku 4a: 1 – napięcie fazowe na transformatorze Tr , 2 – napięcie między stykami wyłącznika próżniowego W



Rys.6. Zależności $Z = g(f)$ układu doświadczalnego jednofazowego z wyłącznikiem próżniowym W (rys. 3): a – układ: wyłącznik próżniowy W połączony z transformatorem za pomocą linii kablowej l_k o długości 85 m, b – układ: wyłącznik próżniowy W połączony z transformatorem za pomocą przewodów l_1 o długości 2 m

Tabela 4: Częstotliwości f_0 , f_1 i f_2 (rys. 2) składowych przejściowych przebiegów napięć na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikiem próżniowym wyznaczone na podstawie badań

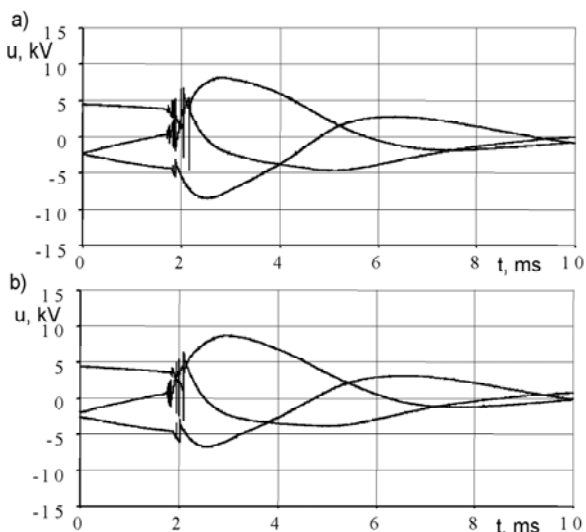
| Częstotliwość | Częstotliwości wyznaczone z przebiegów $u=f(t)$ (rys. 4, 5) | Częstotliwości wyznaczone z zależności $z=g(f)$ (rys. 6) |
|---|---|--|
| układ: wyłącznik W połączony z transformatorem Tr za pomocą linii kablowej l_k o długości 85 m (rys. 3) | | |
| f_0 | 15 kHz - 60 kHz | – |
| f_1 | 890 kHz | 355 kHz |
| f_2 | 160 Hz | 281 Hz |
| f_z | – | 112 Hz |
| układ: wyłącznik W połączony z transformatorem Tr za pomocą przewodów l_1 o długości 2 m (rys. 3) | | |
| f_0 | 300 kHz - 900 kHz | – |
| f_1 | > 2 MHz | > 2 MHz |
| f_2 | 0,46 kHz | 1,41 kHz |
| f_z | – | 112 Hz |

Z przeprowadzonych badań wynika, że konfiguracja układów elektrycznych ma wpływ na przebiegi napięć przejściowych podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi. Częstotliwości składowe przebiegów napięć przejściowych podczas wyłączania transformatorów są zależne również od konfiguracji układów elektrycznych. Częstotliwości wyznaczone z przebiegów $u=f(t)$ są zbliżone do częstotliwości określonych na podstawie zależności doświadczalnych $Z=g(f)$. Zaobserwowane różnice wynikają z różnych warunków pracy transformatorów podczas rejestracji przebiegów napięć i wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych impedancji.

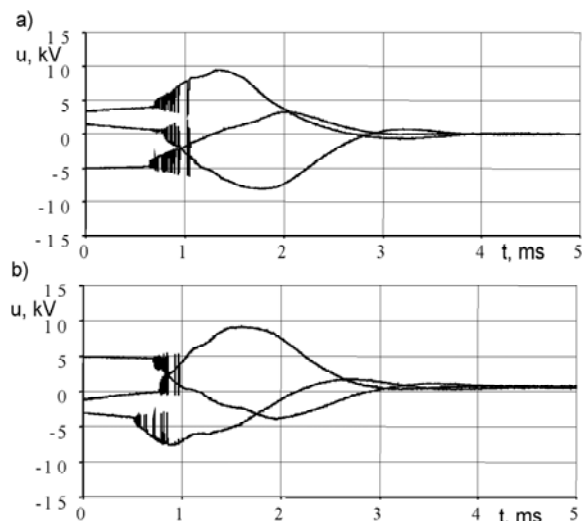
Badania napięć w układzie trójfazowym

Badania napięć łączeniowych w transformatorach obejmowały rejestrację przebiegów napięć fazowych podczas wyłączania transformatora w układach elektrycznych o różnych konfiguracjach. Układy zawierały kabel l_k włączony między wyłącznikiem próżniowym W a transformatorem Tr oraz z kabel l_k włączony między wyłącznikiem próżniowym W a transformatorem zasilającym Tz . Celem badań była analiza porównawcza napięć łączeniowych powstających podczas wyłączania transformatorów w układach o różnych konfiguracjach oraz analiza wpływu ograniczników napięć na

przebiegi prądów łączeniowych w układach z wyłącznikami próżniowymi. Badania obejmowały rejestracje przebiegów prądów w układach z ogranicznikami prądów i bez ograniczników (rys. 7, 8).



Rys.7. Przebiegi napięć przejściowych fazowych na zaciskach transformatora T_r (rys. 2) wyłączanego wyłącznikiem próżniowym W połączonym z transformatorem za pomocą linii kablowej l_k o długości 85m: a – układ z ogranicznikami prądów, b – układ bez ograniczników



Rys.8. Przebiegi napięć przejściowych fazowych na zaciskach transformatora T_r (rys. 2) wyłączanego wyłącznikiem próżniowym W połączonym z transformatorem za pomocą przewodów l_1 o długości 2 m: a – układ z ogranicznikami prądów, b – układ bez ograniczników

Wyniki badań prądów podczas wyłączania transformatora z ogranicznikami prądów, pokazano na rysunkach 7a i 8a, natomiast wyniki symulacji, wykonane dla transformatora bez ochrony prądowej przedstawiono na rysunkach 7b i 8b. Z analizy wynika, że układ izolacyjny transformatora jest narażony na oddziaływanie prądów o wartościach znacznie większych od wartości maksymalnych napięcia roboczego, zależnych od konfiguracji układu elektrycznego z wyłącznikiem próżniowym. Przepięcia mają charakter oscylacyjny, wynikający z przeskoków pomiędzy stykami otwieranego wyłącznika próżniowego. Współczynniki prądów w układzie z linią kablową o długości 85 m włączoną między wyłącznikiem próżniowym W a transformatorem wyłączanym T_r wynoszą 1,6, a wartości współczynników prądów w układzie, w którym wyłącznik próżniowy jest połączony z transformatorem za pomocą przewodów o długości 2 m,

wynoszą około 2. Badania potwierdzają, że ograniczniki prądów z tlenków metali, o parametrach zgodnych z zaleceniami normalizacyjnymi, dotyczącymi koordynacji izolacji w układach elektroenergetycznych [9,10], nie mają istotnego wpływu na przebiegi prądów i nie powodują tłumienia składowych oscylacyjnych jeżeli wartości maksymalne są mniejsze od poziomu ochrony ograniczników.

Podsumowanie

Podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi następuje wzrost stopnia narażeń układów izolacyjnych od prądów powstających na zaciskach wejściowych uzwojeń. Wartości maksymalne prądów, powstających podczas wyłączania transformatorów, są zależne od przebiegów zjawisk zachodzących wewnątrz komór wyłączników oraz w układach elektrycznych. Przebiegi prądów, powstających podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi, zawierają składowe przejściowe oscylacyjne. Częstotliwości składowych przebiegów napięć przejściowych podczas wyłączania transformatorów są zależne od konfiguracji układów elektrycznych. Beziskernikowe ograniczniki prądów z tlenków metali, stosowane powszechnie do ochrony prądowej transformatorów energetycznych, zmniejszają wartości maksymalne prądów łączeniowych, ale nie mają zasadniczego wpływu na składowe oscylacyjne prądów.

LITRERATURA

- [1] Popov M., Acha E.: Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, Nr 4, October 1999, pp. 317 - 1322
- [2] 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
- [3] Lopez-Roldan J., de Herdt H., Sels T., Van Dommelen D., Popov M., Van der Sluis L., Declercq J.: Analysis, simulation and testing of transformer insulation failures related to switching transients overvoltages, *CIGRE Session*, 2002, paper 12-116
- [4] 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
- [5] Wróblewski Z.: Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych, *PAN: Kom. Elektr., Seria Wyd.: Post. Techn. Wys. Napięć*, t. 25, Pol. Wroc., 2005
- [6] 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 (USA), paper 14a.3
- [7] 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
- [8] Ograniczniki prądów z tlenków metali typu POLIM – D, ABB Power Distribution, Wyd. 08.2000 (str. Intern.: www.abb.pl)
- [9] PN-EN 60071-1 Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły.
- [10] PN-EN 60099-5 Ograniczniki prądów. Zalecenia wyboru i stosowania.
- [11] str. Intern.: <http://www.belden.com/techdatas/metric/ 8267.pdf>

Autorzy:

dr hab. inż. Marek Florkowski, Centrum Badawcze ABB, 31 - 038 Kraków, ul. Starowiślna 13A, E - mail: marek.florkowski@pl.abb.com;
dr hab. inż. Jakub Furgał, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, E - mail: furgal@agh.edu.pl; dr inż. Maciej Kuniewski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, E - mail: maciej.kuniewski@agh.edu.pl; mgr inż. Piotr Pająk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, E - mail: ppajak@agh.edu.pl