Narażenia urządzeń elektrycznych niskiego napięcia od przepięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze

Jakub Furgał[1], Maciej Kuniewski[2]

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
furgal@agh.edu.pl[1], maciej.kuniewski@agh.edu.pl[2]

Streszczenie:

Urządzenia elektryczne niskiego napięcia są poddawane działaniu przepięć powstających w sieciach i instalacjach niskiego napięcia oraz przepięć powstających w sieciach rozdzielczych. Analiza narażeń przepięciowych w sieciach niskiego napięcia ma duże znaczenie ze względu na wzrastającą liczbę urządzeń elektrycznych niskiego napięcia i aparatury elektrycznej wrażliwej na oddziaływanie przepięć oraz zwiększające się wymagania odnośnie do niezawodności ich działania. Przepięcia powstające w sieciach rozdzielczych docierają do sieci niskiego napięcia między innymi w wyniku zjawiska przenoszenia przepięć przez uzwojenia transformatorów rozdzielczych. Uzwojenia transformatorów stanowią bowiem złożone nieliniowe układy elektryczne między którymi istnieją silne sprzężenia elektromagnetyczne. Przyczyną powstawania przepięć o największych wartościach w sieciach rozdzielczych są wyładowania piorunowe do linii napowietrznych. Podstawą analizy przepięć w układach elektroenergetycznych są głównie wyniki symulacji komputerowych wykonane z zastosowaniem modeli urządzeń odzwierciedlających zjawiska fizyczne w warunkach szybkozmiennych zjawisk przejściowych.

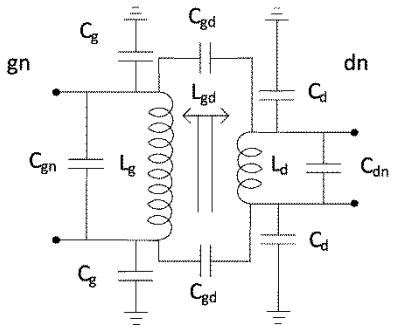
W artykule przedstawiono analizę przepięć w sieciach średniego napięcia przenoszonych przez transformatory rozdzielcze do sieci niskiego napięcia na podstawie wyników obliczeń przepięć wykonanych z zastosowaniem programu Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP). Do obliczeń zastosowano wysokoczęstotliwościowy model transformatora rozdzielczego, opracowany na podstawie wyników rejestracji funkcji przenoszenia. Analizowano wpływ lokalizacji beziskiernikowych ograniczników przepięć z tlenków metali na przepięcia łączeniowe przenoszone przez transformatory rozdzielcze do sieci niskiego napięcia.

1. Wstęp

Głównymi przyczynami powstawania przepięć w instalacjach elektrycznych obiektów budowlanych są wyładowania piorunowe do instalacji odgromowych budynków, zjawiska podczas łączenia urządzeń elektrycznych zasilanych z instalacji oraz przepięcia powstające w sieciach rozdzielczych przenoszonych przez transformatory zasilające. Wysokie wymagania odnośnie niezawodności pracy urządzeń niskiego napięcia i aparatury elektronicznej, ich wysoki koszt oraz mała odporność na działanie przepięć szczególnie aparatury elektronicznej powodują konieczność stosowania skutecznej ochrony przepięciowej instalacji elektrycznych. Ochrona taka jest realizowana jest przy zastosowaniu urządzeń ograniczających przepięcia (*SPD - Surge Protectiv Device*), które stanowią między innymi beziskiernikowe ograniczniki przepięć zawierające warystory z tlenków metali. Ograniczniki beziskiernikowe są obecnie także powszechnie stosowane w sieciach przesyłowych i rozdzielczych. Ograniczniki takie zawierają warystory wykonane głównie z tlenków metali o silnie nieliniowych zależnościach napięciowo-prądowych. Napięcia obniżone ograniczników przepięć są około trzykrotnie większe od napięć roboczych chronionych transformatorów, a przebiegi przejściowe napięć na ogranicznikach beziskiernikowych podczas ich zadziałania są zbliżone do przebiegu prostokątnego. Jeżeli wartości

maksymalne przepięć są mniejsze od napięcia zadziałania ogranicznika, to ograniczniki z tlenków metali pracują na początkowych, praktycznie prostoliniowych fragmentach charakterystyk napięciowo-prądowych i przepięcia takie nie są zmniejszane przez ograniczniki. Przepięcia o niewielkich wartościach maksymalnych, zawierające zwykle składowe oscylacyjne o zróżnicowanych częstotliwościach, są generowane zwykle w układach elektroenergetycznych podczas czynności łączeniowych lub niektórych stanów awaryjnych takich jak na przykład zwarcia [1-3]. Przepięcia powstające w sieciach rozdzielczych docierają do zacisków transformatorów i propagują przez uzwojenia, narażając układy izolacyjne uzwojeń i urządzeń niskiego napięcia połączonych z transformatorami [4-8].

Przepięcia są przenoszone przez transformatory w wyniku sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych między uzwojeniami o innym napięciu znamionowym [9]. Przykładowy schemat zastępczy uzwojeń jednej fazy transformatora przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy uzwojeń jednej fazy transformatora: C_{gn}, C_{dn} - pojemności wejściowe odpowiednio uzwojenia górnego napięcia (*gn*) i uzwojenia dolnego napięcia (*dn*), C_g,C_d - pojemności doziemne odpowiednio uzwojenia górnego napięcia i uzwojenia dolnego napięcia, C_{gd} - pojemność między uzwojeniami uzwojenia górnego napięcia i dolnego napięcia, L_g, L_d, L_{gd} - indukcyjności własne odpowiednio uzwojenia górnego napięcia i uzwojenia dolnego napięcia oraz indukcyjność wzajemna między uzwojeniami [10].

Przepięcie powstające na zaciskach wejściowych jednego uzwojenia transformatora jest przenoszone do innych uzwojeń. Wartości maksymalne i przebiegi przepięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze są zależne od przebiegów przepięć powstających w sieciach średniego napięcia, zjawisk przejściowych w transformatorach , zjawisk w układach zasilanych niskiego napięcia i zastosowanej ochrony przepięciowej [5]. Dodatkowy wpływ na przepięcia przenoszone mogą mieć zjawiska rezonansowe wewnątrz transformatorów. Przepięcie indukowane w uzwojeniach sprzężonych posiada odmienny kształt od przepięcia wymuszającego. Zmiana kształtu przepięcia przenoszonego wynika z nieliniowej charakterystyki częstotliwościowej przepięć przenoszonych.

Problematyka przepięć przenoszonych jest między innymi treścią prac grupy roboczej A2/C4-39 CIGRE powołanej w 2008 roku której zadaniem jest analiza zjawisk przejściowych związanych z oddziaływaniem pomiędzy transformatorami a elementami systemu elektroenergetycznego [11].

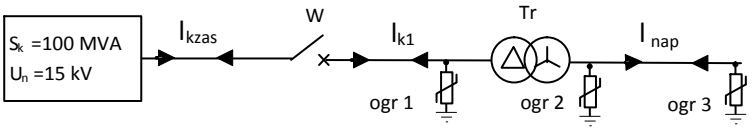
Zależności analityczne umożliwiające wykonanie obliczeń wartości maksymalnych przepięć przenoszonych przez uzwojenia w wyniku sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych zamieszczono na przykład w normie [9]. Przy zastosowaniu tych wzorów możliwe jest wyznaczenie tylko przybliżonych wartości maksymalnych przepięć między zaciskami wejściowymi transformatorów generowanych w wyniku zjawiska przenoszenia

przez uzwojenia. W obliczeniach wykorzystywane są współczynniki, których wartości są zależne od wielu parametrów i zmieniają się w szerokich zakresach.

W artykule przedstawiono analizę narażeń urządzeń elektrycznych niskiego napięcia od przepięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze. Podstawą analizy były wyniki symulacji przepięć przenoszonych przez uzwojenia transformatora rozdzielczego 250 kVA 15,75/0,4 kV podczas wykonywania operacji łączeniowych wyłącznikiem próżniowym we fragmencie sieci 15 kV. Obliczenia wykonano z zastosowaniem programu komputerowego Electromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP-ATP). Analizowano wpływ ograniczników przepięć na przepięcia przenoszone z sieci rozdzielczych narażających urządzenia niskiego napięcia.

2. Charakterystyka fragmentu sieci SN/nn

Wykonano symulacje przepięć narażających urządzenia elektryczne w sieci niskiego napięcia 0,4 kV podczas operacji łączeniowych wyłącznikiem próżniowym w sieci zasilającej 15 kV przenoszonych przez transformator rozdzielczy. Schemat fragmentu układu elektroenergetycznego, w którym wykonano obliczenia, przedstawiono na rysunku 2. Układ zawiera transformator rozdzielczy *Tr* typu TNOSCT-250/15.75PNS 250 kVA 15,75/0,4 kV, linę kablową 15 kV l_{k1}, linię napowietrzną niskiego napięcia l_{nap} oraz ograniczniki przepięć z tlenków metali (ogr. 1, ogr. 2). Linia kablowa L_{k1} i jest połączona z wyłącznikiem próżniowym *W*. Wyłącznik jest połączony z szynami zbiorczymi rozdzielni 15kV o mocy zwarciowej S_k = 100 MVA przez linię kablową L_{zas} o długości 5 km.



Rys. 2. Fragment sieci elektrycznej sn/nn, w której wykonano symulacje przepięć łączeniowych przenoszonych przez transformator rozdzielczy: $L_{k1,}$ L_{kzas} - linia kablowa 15 kV, L_{nap} – linia napowietrzna 0,4 kV, Tr - transformator rozdzielczy 250 kVA, 15,75/0,4 kV, ogr. 1, ogr. 2, ogr. 3 - ograniczniki przepięć z tlenków metali

Podstawowe parametry transformatora zamieszczono w tabeli 1

Tabela 1. Podstawowe parametry znamionowe transformatora rozdzielczego 250 kVA, 15,75/0,4 kV

parametr	S_n	U_n	U_z	ΔP_{fe}	ΔP_{cu}	I_0
jednostki	kVA	kV	%	kW	kW	%
wartości	250	15,75/0,4	4,5	0,486	3,509	1

Linia napowietrzna L_{nap} 0,4 kV, o długości 200 m, zawiera przewody fazowe AL o przekroju poprzecznym 50 mm^2 w układzie płaskim zawieszone na wysokości 10,25 m i ułożone w odległości 0,3 m od siebie. Linię L_{k1} oraz linie kablową L_{zas} stanowi kabel typu YHKXS 8,7/15 kV 95 mm^2 [12]. Do ochrony uzwojeń górnego napięcia transformatora zasilającego od przepięć zastosowano ograniczniki beziskiernikowe typu POLIM -D 12 [13] (ogr. 1) natomiast uzwojenia niskiego napięcia i linia kablowa niskiego napięcia jest chroniona od przepięć z zastosowaniem ograniczników typu LOVOS 5 [14] (ogr. 2, ogr. 3). Wyłącznik próżniowy *W* połączono z transformatorem *Tr* linią kablową L_{k1} 15 kV o długości 10 m.

Charakterystyka modelu urządzeń stosowanych do symulacji przepięć

Model transformatora rozdzielczego

Obliczenia przepięć przenoszonych przez transformator *Tr* do sieci niskiego napięcia wykonano z zastosowaniem programu Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP). Transformator rozdzielczy *Tr* (rys. 2) modelowano przy użyciu wysokoczęstotliwościowego modelu transformatorów, dla którego ogólna postać zależności napięciowo-prądowych przedstawia następująca równanie macierzowe:

$$I = YU \tag{1}$$

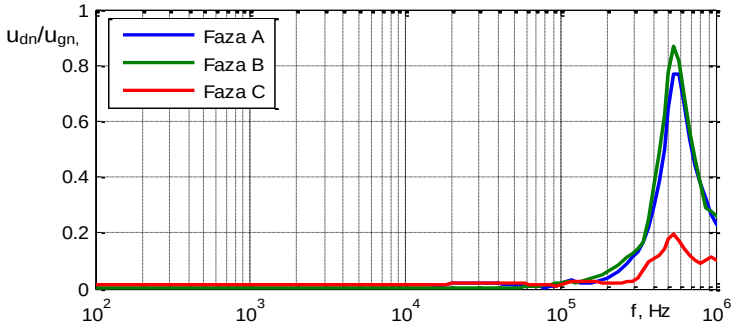
gdzie:

Y – macierz admitancji transformatora,
U – wektor napięć poszczególnych uzwojeń transformatora,
I – wektor prądów wpływających do zacisków transformatora.

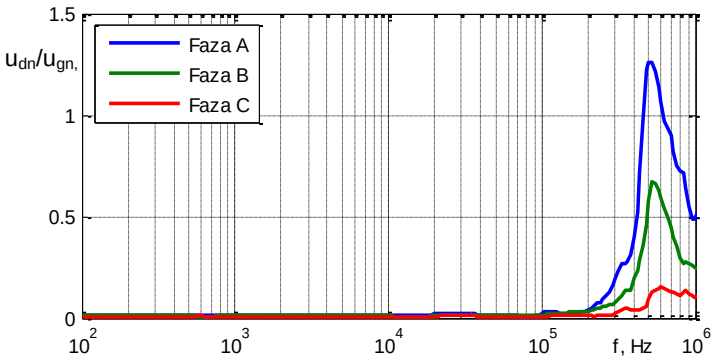
Elementy macierzy admitancyjnej stanowią zależności częstotliwościowe amplitudy i fazy odpowiednich admitancji uzwojeń transformatora. W celu wyznaczenia tych charakterystyk zastosowano metodę SFRA (Sweep Frequency Response Analysis). W metodzie rejestrowane są przebiegi napięć lub prądów przy wymuszeniu napięciem sinusoidalnym o zmieniającej się częstotliwości. Na podstawie wyników rejestracji wyznaczane są charakterystyki częstotliwościowe amplitudy i fazy wyrazów macierzy *Y* [5].

Kolejnym krokiem tworzenia wysokoczęstotliwościowego modelu transformatora jest aproksymacja zarejestrowanych charakterystyk częstotliwościowych admitancji w dziedzinie operatora Laplace'a za pomocą metody dopasowania wektorowego (Vector Fitting) [15,16]. Na postawie uzyskanych wyników dopasowania w postaci zer i biegunów opisujących charakterystyki częstotliwościowe opracowywane są układy elektryczne RLC realizujące admitancje transformatorów w szerokim zakresie częstotliwości.

Charakterystyki częstotliwościowe teoretyczne przepięć przenoszonych przez transformator Tr (rys. 2, tab.1), uzyskane z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego przedstawiono na rysunku 3, natomiast charakterystyki doświadczalne zamieszczono na rysunku 4. Na podstawie analizy charakterystyk częstotliwościowych teoretycznych i doświadczalnych przepięć przenoszonych przez transformator *Tr* 250 kVA, przedstawionych na rysunkach 3 i 4 można stwierdzić, że model wysokoczęstotliwościowy odwzorowuje poprawne zachowanie się transformatora w szerokim zakresie częstotliwości.

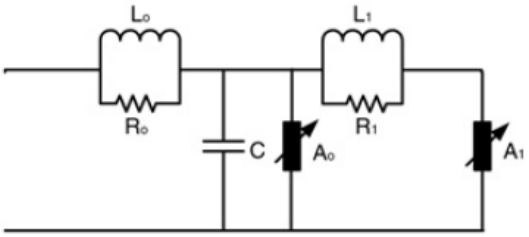


Rys. 3. Wyniki symulacji charakterystyk częstotliwościowych napięć przenoszonych w uzwojeniach 0,4 kV transformatora rozdzielczego *Tr* 250 kVA (tab, 1) symulowane z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów

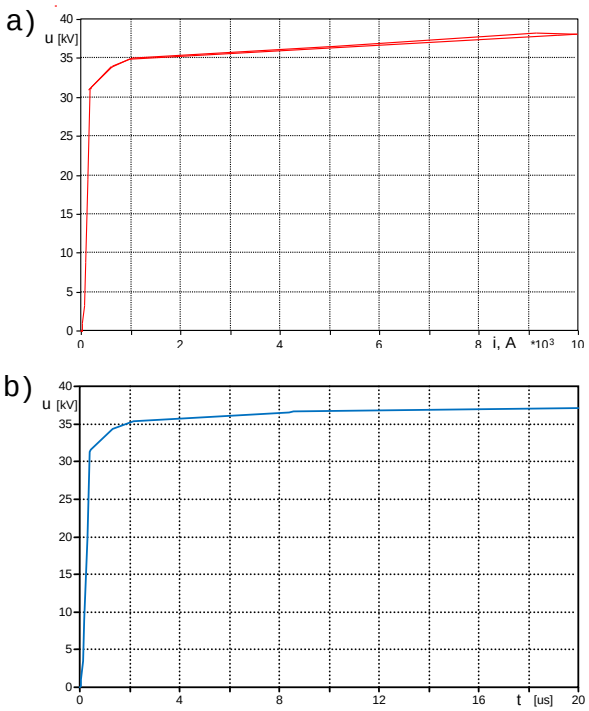


Rys. 4. Doświadczalne charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych w uzwojeniach 0,4 kV transformatora 250 kVA

Do modelowania ograniczników beziskiernikowych zastosowano model grupy roboczej IEEE WG 3.4.11 (rys. 5) [17]. Zawiera on dwie nieliniowe rezystancje A_0 i A_1 o rożnych charakterystykach napięciowo-prądowych, rozdzielone filtrem R_1 L_1. Dla udarów prądowych o małych stromościach prąd o dużym natężeniu płynie w warystorze A_1. W przypadku pojawienia się udarów o dużych stromościach impedancja filtra rośnie i duży prąd płynie przez warystor A_0. Indukcyjność L_0 jest związana z polem magnetycznym ogranicznika. Rezystor R_0 jest włączany w celu zapewnienia stabilności obliczeń. Kondensator C reprezentuje pojemność między zaciskami ogranicznika [17].



Rys. 5. Model ograniczników tlenkowych opracowany przez Grupę Roboczą 3.4.11 IEEE



Rys. 6. Wyniki symulacji zależności u=f(i) i u=f(t) dla ogranicznika typu POLIM-D 12 wykonane z zastosowaniem modelu IEEE ograniczników przy wymuszeniu udarem prądowym 8/20 μs o wartości maksymalnej 10 kA: a – charakterystyka u=f(i), b – zależność u=f(t)

Na rysunku 6 przedstawiono zależności u=f(i) i u=f(t) dla ogranicznika typu POLIM-D 12, zastosowanego do ochrony uzwojeń górnego napięcia transformatora rozdzielczego *Tr* 250 kV (rys. 2), obliczone z zastosowaniem modelu IEEE ograniczników przy wymuszeniu udarem prądowym 8/20 μs o znamionowej wartości maksymalnej wynoszącej 10 kA.

Do modelowania linii kablowych i napowietrznych (rys. 2) zastosowano model wysokoczęstotliwościowy *Jmarti* [18].

Przerwy międzystykowe wyłącznika próżniowego *W* (rys.2) w podczas procesu załączania wyłącznika modelowano przy użyciu nieliniowej rezystancji, o wartości rezystancji zmieniającej się od 100 MΩ (dla otwartego wyłącznika) do 2 Ω (podczas przeskoku między stykami). Warunkiem przeskoku był wzrost napięcia między stykami do wartości większej od wartości napięcia przebicia, zmieniającej się podczas procesu zamykania wyłącznika [18].

3. Analiza narażeń urządzeń niskiego napięcia od przepięć przenoszonych

Podstawą analizy przepięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze narażające układy izolacyjne urządzeń niskiego napięcia były wyniki symulacji przepięć przenoszonych w typowym fragmencie układu elektroenergetycznego sn/nn przedstawionym na rysunku 2. Obliczenia wykonano dla trzech różnych układów połączeń ograniczników przepięć:

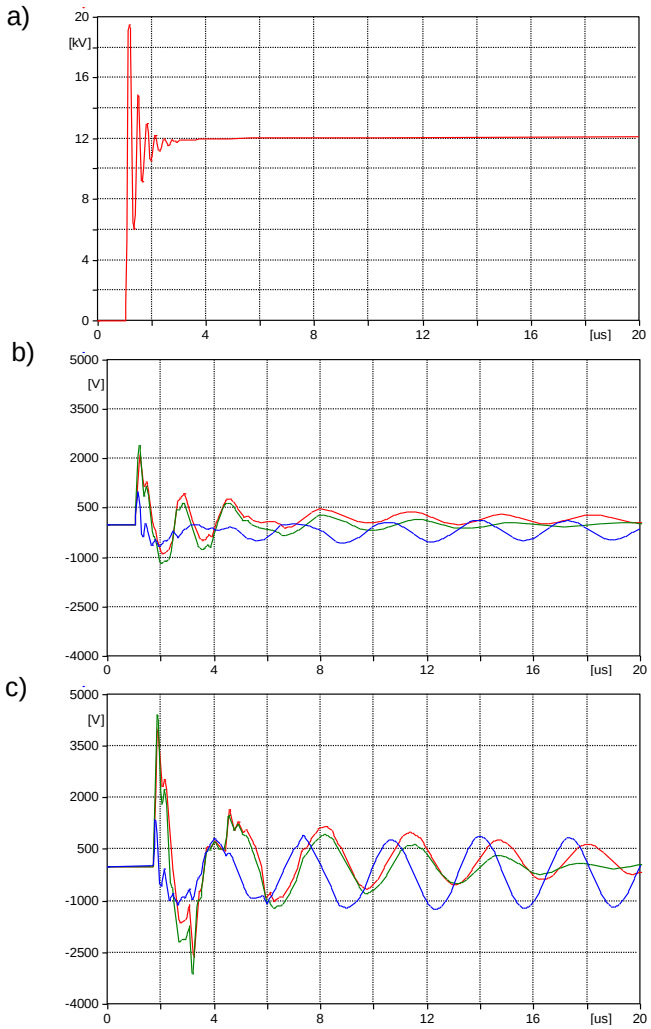
- ograniczniki przepięć połączone z zaciskami uzwojeń 15 kV transformatora rozdzielczego,
- ograniczniki przepięć połączone z zaciskami uzwojeń 15 kV oraz zaciskami uzwojenia 0,4 kV transformatora,

- ograniczniki połączone z zaciskami uzwojeń 15 kV oraz zaciskami uzwojenia 0,4 kV transformatora z końcem linii napowietrznej 0,4 kV.

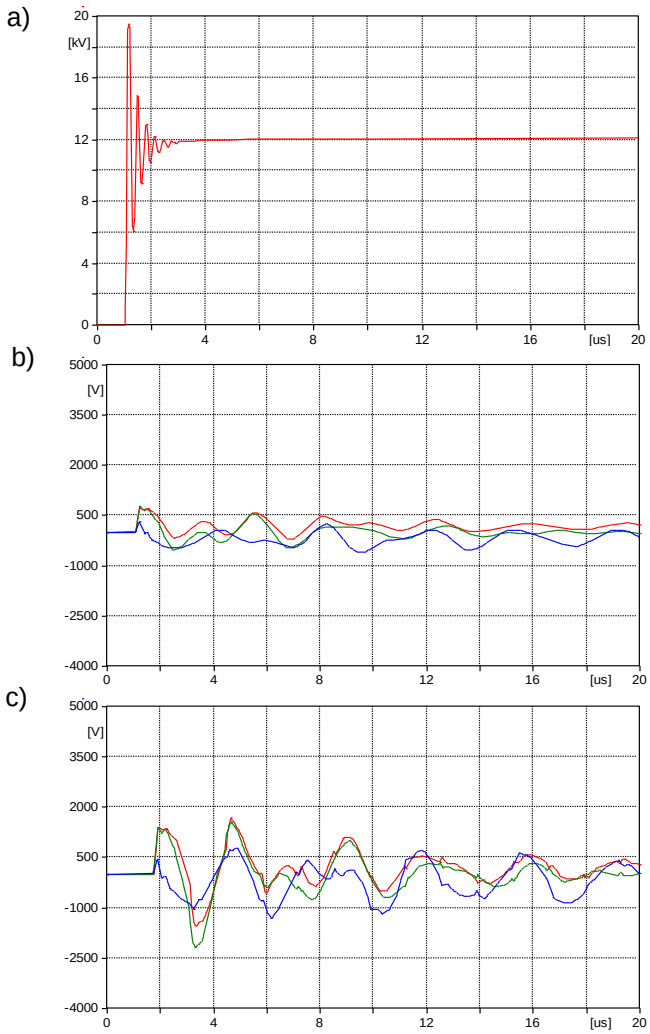
Wyznaczono przebiegi przepięć przenoszonych przez transformator rozdzielczy podczas operacji łączeniowych wyłącznikiem próżniowym po stronie 15 kV oraz przepięcia na końcu nieobciążonej linii napowietrznej podłączonej do zacisków uzwojenia 0,4 kV. Wyniki obliczeń zamieszczono na rysunkach 7-9. Mają one postać przebiegów napięć fazowych w fazie A uzwojenia 15 kV, przepięć przenoszonych w uzwojeniu 0,4 kV oraz przepięć na końcu linii napowietrznej 0,4 kV.

Na rysunku 7a przedstawiono przepięcie docierające do zacisków transformatora, po wystąpieniu przeskoku między stykami wyłącznika próżniowego podczas wyłączania transformatora rozdzielczego. Ograniczniki chronią uzwojenia strony 15 kV od przepięć, których wartości maksymalne przekraczają napięcie zadziałania ogranicznika. W przypadku przepięć łączeniowych ich wartości maksymalne posiadają wartości niższe niż napięcie zadziałania ogranicznika, dlatego przepięcie dociera do zacisków uzwojenia bez zmiany kształtu. Współczynnik przepięć k_u dla przepięć występujących po stronie 15 kV wynosi 1,59 p.u. Przepięcie pojawiające się po stronie górnego napięcia transformatora przenosi się do uzwojeń sprzężonych dolnego napięcia. Przepięcia indukowane w uzwojeniach dolnego napięcia bez ograniczników przepięć pokazano na rysunku 7b. Obliczenia potwierdzają, że przepięcia przenoszone do uzwojeń dolnego napięcia posiadają kształt odmienny od przepięć wymuszających. W przebiegach przepięć przenoszonych występują częstotliwości rezonansowe, wynikające z połączenia układu transformator-linia napowietrzna niskiego napięcia, wartości maksymalne przepięć znacznie przekraczają wartości znamionowe napięć uzwojenia (k_u = 7,2 pu) Przepięcia przenoszone do uzwojeń dolnego napięcia narażają układy izolacyjne uzwojeń oraz urządzeń podłączonych do ich zacisków. Przepięcia przenoszone przez uzwojenia transformatora w konfiguracji z nieobciążoną linią napowietrzną mogą zostać wzmocnione na jej końcu. Efekt ten uwidacznia wykres zamieszczony na rysunku 7c. Przepięcie na końcu linii napowietrznej posiada wartości maksymalne większe niż na zaciskach uzwojenia dolnego napięcia (k_u = 13,3 pu). W celu zabezpieczenia układów izolacyjnych transformatorów oraz urządzeń elektrycznych połączonych z ich zaciskami należy stosować ochronę przepięciową w postaci układu beziskiernikowych ograniczników przepięć instalowanych również po stronie dolnego napięcia transformatora. Podłączenie ograniczników niskiego napięcia do zacisków strony 0,4 kV uzwojeń transformatora skutecznie ogranicza wartości przepięć na zaciskach (rys. 8b) do wartości dopuszczalnych (k_u = 2,26 pu). Takie rozwiązanie nie gwarantuje jednak ograniczenia przepięć na końcu linii napowietrznej 0,4 kV (rys. 8c) (k_u = 6,4 pu).

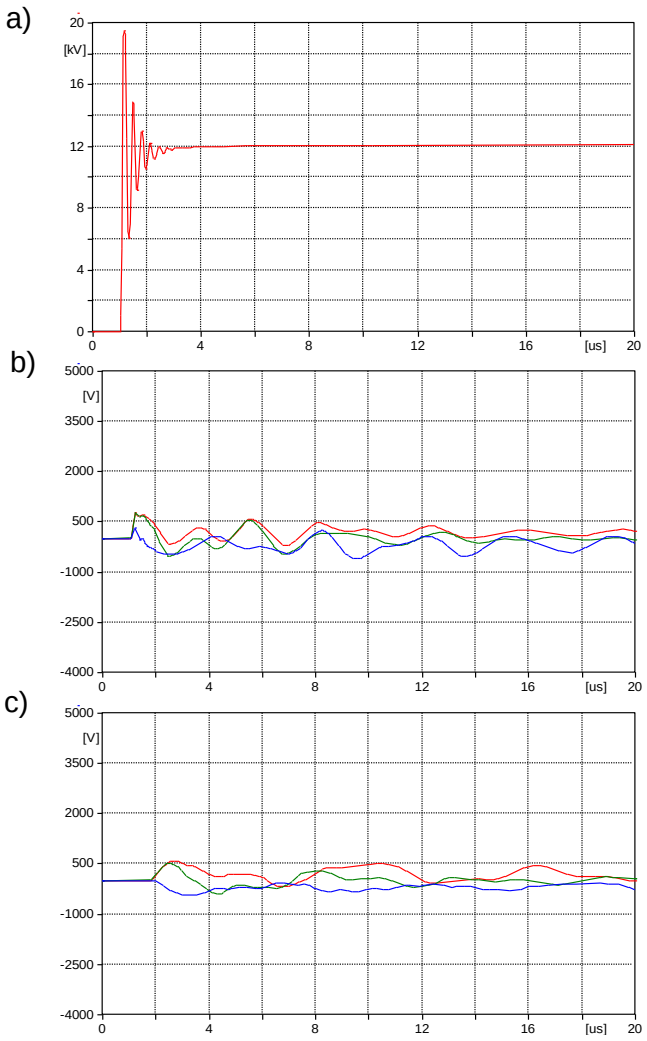
Jak wynika bowiem z wyników obliczeń przepięć przenoszonych zamieszczonych na rysunku 9, w celu skutecznej ochrony urządzeń niskiego napięcia połączonych z zaciskami transformatora rozdzielczego ograniczniki przepięć należy instalować także na końcu linii niskiego napięcia zasilających urządzenia elektryczne. Przeprowadzone symulacje potwierdzają, że takie rozwiązanie zapewnia skuteczne ograniczenie wartości maksymalnych przepięć na końcu kabla niskiego napięcia zasilanego z transformatora rozdzielczego (rys. 9c) do wartości bezpiecznych dla układów izolacyjnych wynikających z napięć obniżonych stosowanych ograniczników przepięć (k_u = 2,26 pu).



Rys. 7. Przebiegi przepięć doziemnych przenoszonych przez transformator 250 kV podczas wyłączania transformatora rozdzielczego wyłącznikiem próżniowym 15 kV (rys. 2), (uzwojenie górnego napięcia chronione ogranicznikami przepięć): a - przebieg napięcia doziemnego w fazie A uzwojenia 15 kV, b - przebiegi przepięć przenoszonych doziemnych na zaciskach uzwojeń 0,4 kV, c - przebiegi przepięć na końcu linii napowietrznej 0,4 kV,



Rys. 8. Przebiegi przepięć doziemnych przenoszonych przez transformator 250 kV podczas wyłączania transformatora rozdzielczego wyłącznikiem próżniowym 15 kV (rys. 2), (uzwojenie górnego i dolnego napięcia chronione ogranicznikami przepięć): a - przebieg napięcia doziemnego w fazie A uzwojenia 15 kV, b - przebiegi przepięć przenoszonych doziemnych do uzwojeń 0,4 kV, c - przebiegi przepięć na końcu linii napowietrznej 0,4 kV,



Rys. 9. Przebiegi przepięć doziemnych przenoszonych przez transformator 250 kV podczas wyłączania transformatora rozdzielczego wyłącznikiem próżniowym 15 kV (rys. 2), (uzwojenie górnego, dolnego napięcia i koniec kabla chronione ogranicznikami przepięć): a - przebieg napięcia doziemnego w fazie A uzwojenia 15 kV, b - przebiegi przepięć przenoszonych doziemnych do uzwojeń 0,4 kV, c - przebiegi przepięć na końcu linii napowietrznej 0,4 kV,

4. Podsumowanie

Przepięcia powstające w sieciach średnich napięć są przenoszone przez uzwojenia transformatorów rozdzielczych w wyniku sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami i stanowią narażenia układów izolacyjnych urządzeń niskiego napięcia. Wykonano symulacje przepięć przenoszonych przez uzwojenia transformatora rozdzielczego narażających urządzenia elektryczne niskiego napięcia powstających podczas wyłączania transformatora wyłącznikiem próżniowym. Do symulacji wykonanych w programie EMTP-ATP zastosowano wysokoczęstotliwościowy model transformatorów opracowany przy zastosowaniu charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia. Przeprowadzone symulacje potwierdzają, że przebiegi przepięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze są odmienne od przebiegów oddziałujących przepięć łączeniowych, a ich wartości maksymalne są większe od wartości wynikających z przekładni transformatora. Symulacje wykazały także, że przepięcia przenoszone do uzwojeń dolnego napięcia mogą

ulec wzmocnieniu na końcu linii napowietrznych połączonych z uzwojeniami niskiego napięcia transformatora. Obliczenia potwierdzają konieczność stosowania ochrony urządzeń niskiego napięcia od przepięć przenoszonych przez transformatory rozdzielcze z zastosowaniem układów beziskiernikowych ograniczników przepięć z tlenków metali instalowanych na zaciskach wejściowych transformatorów oraz końcach zasilających linii napowietrznych niskiego napięcia.

5. Biblografia

[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] 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

[5] Furgał J., Kuniewski M.: Wyznaczanie napięć przenoszonych przez transformatory przy zastosowaniu charakterystyk częstotliwościowych, Zesz. Nauk. Wydz. Elektrot. i Autom. Polit. Gdańskiej, Nr 31, 2012, str. 49 - 52

[7] 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

[8] 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

[9] PN-EN 60071-2 Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania.

[10] Furgał J, Kuniewski M., Pająk P.: Badania i symulacje przepięć łączeniowych przenoszonych przez uzwojenia transformatorów, Przegl. Elektrot. R. 88, Nr 11b, 2012, str. 130 - 133

[11] Angélica da Costa Oliveira Rocha,: Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, on behalf of Cigré-Brazil Joint Working Group - JWG – A2/C4-03, CIGRE 2008

[12] Katalog: Kable i przewody elektroenergetyczne, Telefonika Kable Sp. z.o.o., wrzesień, 2009

[13] Ograniczniki przepięć z tlenków metali typu POLIM - D. ABB Power Distribution, Wyd. 08.2011 (strona internetowa: www.abb.pl)

[14] Ograniczniki przepięć z tlenków metali typu LOVOS - 5 i LOVOS - 10. ABB low voltage products, Wyd. 2009 (strona internetowa: www.abb.pl)

[15] Gustavsen B., Semelyen A.: Rational approximation of frequency domain response by vector fitting, IEEE Trans. Pow. Deliv., Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1052 - 1059

[16] Gustavsen B.: Wide band modeling of power transformers, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 19, No. 1, Jan. 2004, pp. 414 – 422

[17] IEEE Working Group 3.4.11.: Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Trans. Pow. Deliv., Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp. 302 – 309
[18] Dommel H. and et. al.: Electromagnetic Transients Program - Theory Book, Portland, prepared for BPA, 1986