



Wojciech PIASECKI¹, Marek FLORKOWSKI¹, Marek FULCZYK¹,
Wiesław NOWAK², Mariusz LUTO³

ABB Corporate Research (1), Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (2), ABB Spółka z o.o., oddział Przasnysz (3)

Zapobieganie zjawisku ferorezonansu z udziałem przekładników napięciowych w sieciach ŚN z izolowanym punktem neutralnym

Streszczenie. W artykule pokazano, że oscylacje ferorezonansowe, które mogą zostać zainicjowane procesami łączeniowymi bądź innymi zjawiskami o charakterze przejściowym, charakteryzują prądy powodujące zagrożenie dla uzwojeń pierwotnych przekładników. Pokazano, że zakres niebezpiecznej pojemności doziemnej zależy dla danego typu przekładnika od wartości napięcia fazowego. Dokonana analiza klasycznego sposobu zabezpieczenia przekładników, w postaci rezystora włączonego w obwód otwartego trójkąta uzwojeń dodatkowych wykazała, iż w celu zapewnienia pełnej skuteczności układu tłumiącego konieczne jest stosowanie rezystorów o bardzo małej wartości rezystancji. Przedstawiona została nowa metoda ochrony przed wzbudzeniem niebezpiecznych drgań ferorezonansowych w postaci kompaktowego obciążenia aktywnego (SmartLoad).

Abstract. (Prevention of ferroresonance involving voltage transformers in MV ungrounded networks). In the paper it was shown that the ferroresonant oscillations which may be initiated by the switching or other types of transient events are characterized by high primary current values and that they pose risk to the voltage transformers (VTs). It was shown that the hazardous values of the phase-to ground capacitance for the given transformer type depend on the actual value of the phase voltage. The analysis of the classic method of protecting the VTs by means of connecting the damping resistor to the open-delta arranged auxiliary winding has shown, that often a very low ohmic value of the resistor is required to provide reliable protection. A new method of protecting the VTs against the ferroresonance by means of a compact active load (SmartLoad) was presented.

Słowa kluczowe: ferorezonans, procesy komutacyjne, przekładniki napięciowe.

Keywords: ferroresonance, switching, voltage transformers.

Wstęp

Rdzenie ferromagnetyczne stosowane w aparatach i maszynach elektrycznych podlegają zjawisku nasycenia. Nasycenie magnetyczne powoduje, że element indukcyjny występujący w obwodzie elektrycznym staje się elementem nieliniowym. Z obecnością nieliniowego elementu indukcyjnego wiąże się niebezpieczeństwo wzbudzenia stanu ferorezonansowego, w którym wartości napięcia i/lub prądu mogą wielokrotnie przekraczać wartości znamionowe, co powoduje zagrożenie uszkodzenia na skutek zjawisk nadnapięciowych lub nadprądowych. Z literatury znanych jest wiele przykładów analizy zjawiska ferorezonansu w systemach energetycznych (np. [1,2,3]) jak również metod jego zapobiegania (np. [4]). Z uwagi na złożony charakter zjawisk zachodzących w obwodach nieliniowych metoda zapobiegania zjawisku ferorezonansu musi być oparta o analizę konkretnego urządzenia lub klasy urządzeń o dokładnie określonych parametrach elektrycznych.

Indukcyjne przekładniki napięciowe są transformatorami o specjalnej konstrukcji. Ze względu na fakt, iż podstawową funkcją jest pomiar a nie zasilanie obwodów elektrycznych, typowe moce znamionowe przekładników oraz gabaryty są niewielkie. Uzwojenia pierwotne jednofazowych przekładników średniego napięcia wykonane są z drutu nawojowego o niewielkich przekrojach, a ich rezystancja wynosi zwykle kilka kΩ. Z uwagi na to moc cieplna, która wydziela się w uzwojeniu pierwotnym przekładników jest znaczna w przypadku, gdy przekładnik pracuje w warunkach nasycenia, co wiąże się z wielokrotnym wzrostem wartości skutecznej prądu w stosunku do warunków znamionowych. Z tego względu zjawisko ferorezonansu jest szczególnie groźne dla przekładników, w których niewytłumiony stan ferorezonansowy często prowadzi do trwałego uszkodzenia uzwojenia pierwotnego przekładnika, którego konsekwencją jest często zwarcie doziemne.

Z tego powodu konieczna jest świadomość tego problemu, z którą wiąże się przeciwdziałanie poprzez zastosowanie właściwych środków zaradczych.

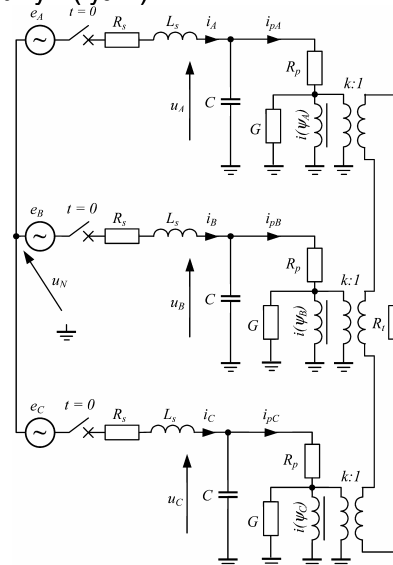
Analiza ferorezonansu w przekładnikach napięciowych

Dla celów analizy zjawiska ferorezonansu w praktycznych przypadkach przekładników napięciowych średniego napięcia, zastosowano model o nieliniowej charakterystyce magnesowania, opisaną w postaci funkcji wielomianowej:

$$(1) \quad i = a\psi + b\psi^n + c\psi^l$$

gdzie: i oznacza prąd w uzwojeniu przekładnika, ψ strumień skojarzony, natomiast a, b, c, n, l są stałymi. Jak pokazano wcześniej [5], właściwe odwzorowanie charakterystyki przekładnika w obszarze głębokiego nasycenia rdzenia wymaga odwzorowania przy pomocy funkcji o wartości wykładnika rzędu kilkudziesięciu.

Do analizy przyjęto układ trójfazowy z izolowanym punktem neutralnym (rys. 1).



Rys. 1. Schemat zastępczy analizowanego układu

Analizowany układ uwzględnia:

- rezystancje R_s oraz indukcyjności L_s odwzorujące impedancję zwarciovą układu zasilającego,
- pojemności doziemne C sieci,
- rezystancje R_p uzwojeń pierwotnych przekładników,
- konduktancje G reprezentujące straty w rdzeniu,
- nieliniowe indukcyjności $i(\psi)$ magnesowania przekładników określone zależnością (1),
- transformatory idealne o przekładni $k:1$ (uzwojenia dodatkowe przekładników) połączone po stronie wtórnej w otwarty trójkąt z rezystancją tłumiącą R_r .

Oscylacje ferrezonansowe mogą zostać zainicjowane przez procesy łączeniowe powodujące chwilowe nasycenie rdzeni przekładników [5]. W celu przeanalizowania warunków, w których wzbudzone są stabilne stany ferrezonansowe przyjęto dwójaki sposób pobudzenia układu: 1) załączenie w chwili $t = 0$ oraz 2) dwuwykładniczym impulsem łączeniowym. Wybrany sposób pobudzenia układu skutkuje wybraniem odpowiedniego wektora wymuszeń w równaniu stanu opisującym analizowany układ.

W przypadku analizy odpowiedzi po załączeniu układu w chwili $t = 0$, źródła napięcia tworzą trójfazowy układ kolejności zgodnej. W przypadku analizy odpowiedzi po wystąpieniu przepięcia w chwili $t_0 = 1,25/f$ (rys. 2), źródło $e_A(t)$ wyrażone jest zależnością:

$$(2) \quad e_A(t) = \begin{cases} E_m \sin(2\pi ft) & \text{dla } 0 \leq t < t_0 \\ E_m \sin(2\pi ft) + u_{OV}(t) & \text{dla } t \geq t_0 \end{cases}$$

gdzie:

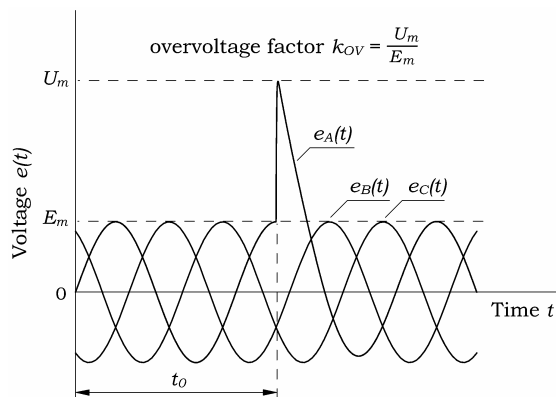
$$(3) \quad u_{OV}(t) = U_0 k_m \{ \exp[-(t-t_0)/\tau_1] - \exp[-(t-t_0)/\tau_2] \}$$

jest dwuwykładniczym modelem przepięcia. W szczególności dla współczynnika $k_m = 1,092$ oraz stałych czasowych $\tau_1 = 3,2 \cdot 10^{-3}$ s i $\tau_2 = 55 \cdot 10^{-6}$ s, funkcja (3) wyraża udar łączeniowy 250/2500 μ s o wartości szczytowej U_0 .

Współczynnik przepięcia dla wymuszenia (3) określa równanie:

$$(4) \quad k_{OV} = \frac{U_m}{E_m} \approx \frac{E_m + U_0}{E_m}$$

Do rozwiązywania równania stanu opisującego analizowany obwód dla zdefiniowanych wymuszeń wykorzystano opracowany do tego celu program FerroSim, napisany w języku Fortran z wykorzystaniem bibliotek numerycznych IMSL i środowiska graficznego Winteracter.



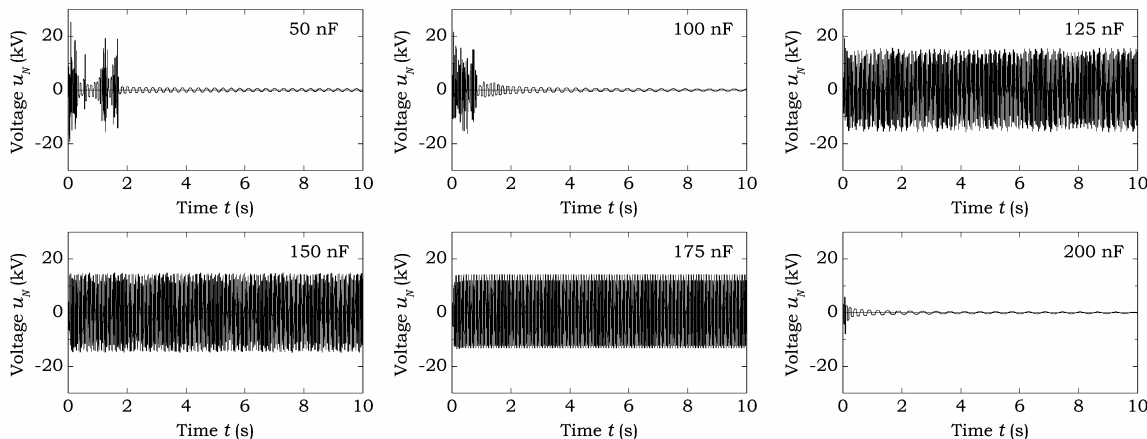
Rys. 2. Wymuszenie przepięciowe w analizowanym układzie

Ponieważ równanie stanu opisujące układ należy do źle uwarunkowanych, to do jego rozwiązywania zastosowano metodę Geara (procedura DIVPAG z biblioteki IMSL) z maksymalnym dopuszczalnym krokiem symulacji 10^{-5} sekundy oraz tolerancją dla kontroli błędu wynoszącą 10^{-7} . Analizie poddano układ z rysunku 1 z wykorzystaniem programu FerroSim. Rozważano możliwości wzbudzenia ferrezonansu w wyniku załączenia układu przy zerowych warunkach początkowych oraz po zaistnieniu przepięcia łączeniowego 250/2500 μ s (rys. 2).

Do analizy przyjęto przekładnik napięciowy o znamionowym napięciu pierwotnym $22000/\sqrt{3}$ V. Przekładnia zwojowa pomiędzy uzwojeniem pierwotnym A – N a uzwojeniem dodatkowym an – dn wynosiła 26031:76, a rezystancja uzwojenia pierwotnego 5460 Ω .

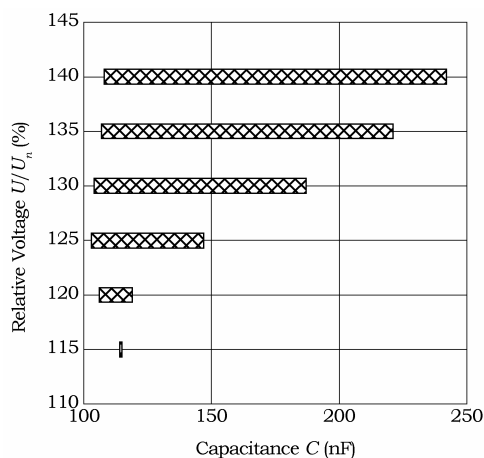
Analiza układu po załączeniu źródeł zasilania

W zależności od wartości parametrów odpowiedź układu po załączeniu źródeł zasilania może mieć różny charakter. Ilustruje to rysunek 3, na którym przedstawiono przebiegi napięcia punktu neutralnego dla różnych wartości pojemności C , otrzymane dla amplitudy E_m odpowiadającej 130% napięcia znamionowego U_n przekładnika parametrów R_s, L_s odpowiadającej mocy zwarciovowej 200 MVA. Dla pojemności C większych od pewnej pojemności i granicznej C_{g2} (np. $C = 200$ nF na rys. 3) napięcie punktu neutralnego ma charakter drgań gasnących o częstotliwości zmiennej i malejącej w czasie. Ze względu na stosunkowo krótki czas trwania oscylacji oraz niewielkie wartości prądów pierwotnych (kilkadziesiąt mA) stan taki nie powoduje zagrożenia dla przekładników.



Rys. 3. Napięcie punktu neutralnego po załączeniu układu przy napięciu 130% U_n (U_n – napięcie znamionowe przekładnika)

Po obniżeniu wartości pojemności C poniżej wartości granicznej C_{g2} następuje jakościowa zmiana charakteru zachowania układu. Wzbudzone zostają nietłumione drgania ferrezoansowe o charakterze chaotycznym lub podharmonicznym.

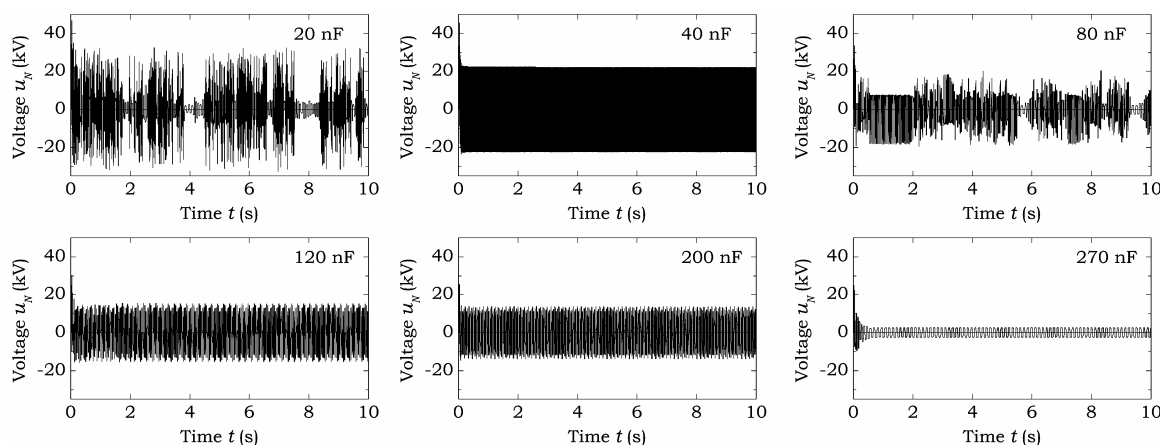


Rys. 4. Zakresy występowania ferrezoansu po załączeniu układu

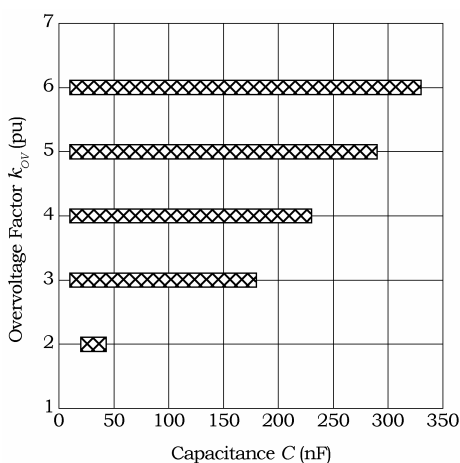
Napięcie punktu neutralnego może osiągać znaczne wartości, a wartości prądów pierwotnych przekładników mogą mieć wartości nawet kilku amperów, co jest na ogół przyczyną ich uszkodzenia. Stan ten utrzymuje się do pewnej pojemności granicznej C_{g1} , poniżej której (np. $C = 50$ nF i 100 nF na rys. 3) w układzie obserwowane są ponownie drganie ferrezoansowe gasnące. Analiza przebiegów czasowych pokazała, że trwałe oscylacje ferrezoansowe mogą zostać wzbudzone dla wartości pojemności C zawartych tylko w pewnym przedziale $C_{g1} - C_{g2}$, którego szerokość jest proporcjonalna do wartości napięcia źródeł zasilających (rys. 4). Ponadto dla napięcia odpowiadającego wartości napięcia znamionowego U_n , nie ma możliwości wzbudzenia trwałych drgań ferrezoansowych

Analiza układu przy pobudzeniu impulsowym

Analiza przeprowadzona dla pobudzenia impulsowego układu w postaci przepięcia łączeniowego 250/2500 μ s wykazała, że nietłumione stany ferrezoansowe obserwowane są w zdecydowanie szerszych przedziałach pojemności niż przy załączeniu układu. Przedstawione na rysunku 5 napięcia punktu neutralnego charakteryzują się znaczną różnorodnością. Możliwe przy tym jest wystąpienie nietłumionych drgań o charakterze zarówno chaotycznym, jak i podharmonicznym. Istotny wpływ na szerokość przedziału pojemności ma współczynnik przepięcia (rys.6).



Rys. 5. Napięcie punktu neutralnego po zaistnieniu przepięcia w układzie o współczynniku $k_{OV} = 5$ i przy napięciu 130% U_n



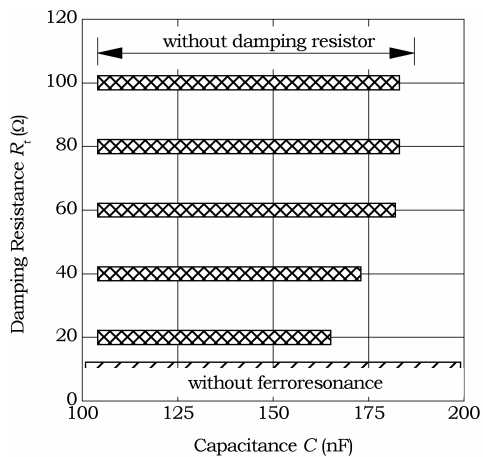
Rys. 6. Zakresy występowania ferrezoansu po zaistnieniu przepięcia w układzie (130% U_n)

Tłumienie stanów ferrezoansowych – podejście tradycyjne

W przypadku oscylacji ferrezoansowych, wartości szczytowe prądów w uzwojeniach pierwotnych przekładników mogą osiągać wartość kilku amperów, ze względu na pracę rdzeni przekładników w warunkach głębokiego nasycenia. Wynika stąd bezwzględna konieczność stosowania elementów zapobiegających utrzymywaniu się stanu ferrezoansowego przez zastosowanie, na przykład rezystora tłumiącego R , połączonego z uzwojeniami dodatkowymi przekładników w układzie otwartego trójkąta. Stosowanie rezystora tłumiącego okazuje się jednak często nieskuteczne w przypadku nowoczesnych, małogabarytowych przekładników o niewielkich mocach cieplnych i niewielkich stratach własnych.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że rezystancja skutecznie tłumiąca stany ferrezoansowe jest na poziomie kilkunastu omów. Ilustruje to rysunek 7, na którym przedstawiono zakresy występowania drgań ferrezoansowych dla różnych wartości rezystancji tłumiącej R . W rozważanym przypadku efektywne tłumienie ferrezoansu

ma miejsce dla rezystancji $R_i \leq 12 \Omega$ (rys. 7). Zastosowanie w praktyce tak małej wartości rezystancji tłumiącej niesie jednak za sobą ryzyko uszkodzenia cieplnego przekładników w przypadku długotrwałej obecności składowej zerowej napięcia, wynikającej np. z obecności zwarcia jednofazowego w sieci.



Rys. 7. Zakresy występowania ferorezonansu po załączeniu układu przy stosowaniu rezystora tłumiącego ($130\% U_n$)

Tłumienie ferorezonansu przy pobudzeniu impulsowym jest jeszcze bardziej utrudnione niż przy załączaniu układu. Cechą charakterystyczną jest selektywne tłumienie tylko pewnych modów drgań w zależności od wartości rezystancji tłumiącej. Dla analizowanego pobudzenia efektywne tłumienie ferorezonansu ma miejsce dla rezystancji $R_i < 9 \Omega$.

Tłumienie ferorezonansu przez zastosowanie aktywnego obciążenia

Jak wykazano, skuteczne tłumienie stanów ferorezonansowych poprzez zastosowanie rezystora tłumiącego wymaga doboru rezystancji o bardzo małej wartości. Jest to często wartość zbyt mała z punktu widzenia wymaganej odporności przekładników na stan długotrwałego (8h) zwarcia doziemnego w sieci. Powstająca wówczas składowa zerowa napięcia powoduje przepływ prądu przez rezystor R_i , co w przypadku małej wartości rezystancji skutkuje przeciążeniem cieplnym przekładników. Z tego powodu w praktyce stosuje się rezystory o rezystancji na poziomie 20Ω zapewniające tłumienie stanów ferorezonansowych w większości typowych sytuacji. Zastosowanie takiej rezystancji nie zapewnia jednak 100% skuteczności szczególnie w sytuacjach, gdy mamy do czynienia z częstymi procesami łączeniowymi i napięciami w przewyższającymi napięcie znamionowe.

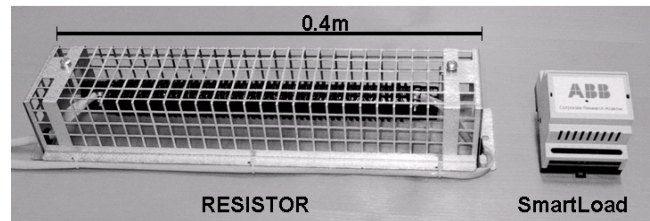
W celu rozwiązania tego problemu opracowane zostało urządzenie o nazwie SmartLoad, zastępujące tradycyjnie stosowany rezystor przez układ, którego rezystancja dostosowuje się aktywnie do warunków pracy w sposób opisany poniżej.

W przypadku występowania składowej zerowej o niewielkiej wartości, wynikającej z dopuszczalnych asymetrii w warunkach normalnej pracy, urządzenie reprezentuje

bardzo dużą rezystancję i nie powoduje obciążenia cieplnego zarówno przekładników jak i samego urządzenia.

W przypadku pojawienia się składowej zerowej na poziomie przewyższającym strefę nieczułości urządzenia, SmartLoad staje się rezystorem o wartości rezystancji, skutecznie wytlumiającej stan ferorezonansowy, co zostało potwierdzone zarówno metodą symulacji komputerowych, jak i eksperymentalnie.

W przypadku, gdy składowa zerowa, obecna w obwodzie otwartego trójkąta utrzymuje się przez czas dłuższy, co jest wynikiem dużej asymetrii w sieci, spowodowanej np. zwarcie doziemnym, urządzenie samoczynnie przechodzi w stan wysokoomowy, nie stanowiąc zbędnego obciążenia dla przekładników. Po ustąpieniu przyczyny asymetrii urządzenie samoczynnie powraca do stanu początkowego.



Rys. 8. Urządzenie SmartLoad do tłumienia stanów ferorezonansowych – porównane z tradycyjnym rezystorem tłumiącym

Zastosowanie opisanej powyżej koncepcji aktywnego układu tłumiącego pozwoliło na rozwiązanie wspomnianych wcześniej problemów związanych ze stosowaniem liniowego rezystora tłumiącego, a ponadto umożliwiło zbudowanie urządzenia o niewielkich wymiarach, nadającego się do zainstalowania na standardowej szynie DIN, jak pokazano na rysunku 8.

LITERATURA

- [1] Irvani M. R., et al., Digital time-domain investigation of transient behaviour of coupling-capacitor voltage transformer, *IEEE Trans. on PD.*, 1998, Vol.13, No 2, 622-629
- [2] Van Craenenbroeck T., et al., Bifurcation analysis of three-phase ferorezonant oscillations in underground power systems, *IEEE Trans. on PD.*, 1999, Vol.14, No 2, 531-536
- [3] Mork B. A., Five-legged wound-core transformer model: derivation, parameters, implementation, and evaluation, *IEEE Trans. on PD.*, 1999, Vol.14, No 4, 1519-1526
- [4] Graovac M., et al., Fast ferorezonance suppression of coupling capacitor voltage transformers, *IEEE Trans. on PD.*, 2003, Vol.18, No 1, 158-163
- [5] Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Nowak W., Luto M.: Problem eksploatacji przekładników napięciowych w sieciach rozdzielczych średniego napięcia z izolowanym punktem neutralnym. *Energetyka*, zeszyt tematyczny nr VI, 2005, 128-132

Autorzy:

dr inż. Wojciech Piasecki, ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, E-mail: wojciech.piasecki@pl.abb.com; dr inż. Marek Florkowski, ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, E-mail: marek.florkowski@pl.abb.com; dr inż. Marek Fulczyk, ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, E-mail: marek.fulczyk@pl.abb.com; dr inż. Wiesław Nowak, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wiesio@agh.edu.pl; dr inż. Mariusz Luto, ABB sp. z o.o. ul. Leszno 59, 06-300 Przasnysz, E-mail: marusz.luto@pl.abb.com