

Marek FLORKOWSKI¹, Mariusz LUTO², Wiesław NOWAK³, Wojciech PIASECKI¹

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

Ferrorezonans z udziałem przekładników napięciowych w sieci średniego napięcia

Streszczenie. W artykule pokazano, że oscylacje ferorezonansowe mogą zostać zainicjowane procesami komutacyjnymi, a ich charakter zależy od wartości pojemności doziemnej sieci. Pokazano, że określenie pojemności, przy której oscylacje ferorezonansowe mogą stanowić zagrożenie dla przekładników wymaga dokładnego określenia charakterystyki $i(\psi)$, zwłaszcza w obszarze głębokiego nasycenia rdzenia.

Abstract. (Ferroresonance involving voltage transformers in medium voltage networks). The paper shows that ferroresonant oscillations may be triggered by switching operations and that they depend on the value of the phase-to-ground capacitance of the network. It was also shown that defining the values of the capacitance for which the oscillations may become dangerous for the voltage transformers requires detailed knowledge on the $i(\psi)$ curve, especially in the region of deep saturation of the transformer core.

Słowa kluczowe: sieci średnich napięć, ferorezonans, procesy komutacyjne, przekładniki napięciowe.

Keywords: medium voltage networks, ferroresonance, switching operations, voltage transformers.

Wstęp

Indukcyjność z rdzeniem ferromagnetycznym w obwodzie elektrycznym może być przyczyną występowania w nim zjawiska ferorezonansu. Zjawisko to ma miejsce, gdy rdzeń ferromagnetyczny pracuje w warunkach nasycenia, a indukcyjność staje się w takim przypadku elementem nieliniowym. W układach elektroenergetycznych indukcyjność tę stanowi indukcyjność magnesująca transformatorów oraz przekładników napięciowych. W przeciwieństwie do rezonansu liniowego, gdzie częstotliwość rezonansowa jest ściśle określona, ferorezonans może wystąpić dla częstotliwości uzależnionej od warunków pracy układu.

W praktyce ferorezonans może zostać zainicjowany nawet przez chwilowe wprowadzenie rdzenia w stan nasycenia. Może to nastąpić w przypadku np. czynności łączeniowej lub przy zmianie wartości napięcia zasilającego np. wskutek przełączenia.

Zjawisko ferorezonansu jest dla układów elektroenergetycznych groźne w skutkach z dwóch zasadniczych powodów: 1) znacznego nasycenia rdzenia, co może prowadzić np. do cieplnego zniszczenia uzwojenia pierwotnego przekładników napięciowych; 2) powstawania (niejednokrotnie długotrwałych) przebiegów ferorezonansowych o charakterze dorywczym.

Pomimo, że pierwsze publikacje dotyczące ferorezonansu ukazały się na początku wieku XX, to do dnia dzisiejszego nie sprecyzowano jednoznacznie skutecznych w praktyce kryteriów jego występowania, jak i sposobów przeciwdziałania. Wśród prac badawczych prowadzonych w tym obszarze wyróżnić można następujące grupy zagadnień:

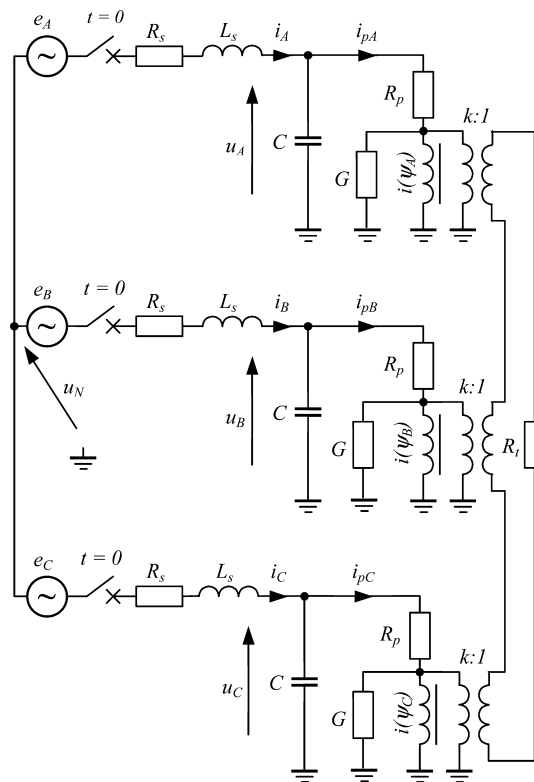
- analiza stanów ferorezonansowych (np. [1-10]), w tym od lat 90. ubiegłego wieku z wykorzystaniem nieliniowej dynamiki i teorii chaosu,
- rozpoznanie skutków ferorezonansu w układach elektroenergetycznych (np. dla eksploatacji ograniczników przebiegów z tlenków metali [11,12]),
- przeciwdziałanie powstawaniu ferorezonansu (np. [13]).

W artykule przedstawiono wpływ aproksymacji charakterystyki indukcyjności magnesującej przekładnika napięciowego na przebiegi napięć i prądów w stanie ferorezonansu po załączeniu układu elektroenergetycznego średniego napięcia.

Model matematyczny

Do analizy przyjęto układ trójfazowy z izolowanym punktem neutralnym (rys. 1), w skład którego wchodzi:

- 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 magnesowania przekładników określone charakterystyką $i(\psi)$ prądu i od strumienia ψ ,
- transformatory idealne o przekładni $k:1$ (uzwojenia dodatkowe przekładników) połączone po stronie wtórnej w otwarty trójkąt z rezystancją tłumiącą R_t .



Rys. 1. Schemat analizowanego układu

Obwód po zamknięciu wyłączników w chwili $t = 0$ opisuje układ dziewięciu równań różniczkowych:

$$(1) \quad [A] \frac{d}{dt} [x(t)] = [B][x(t)] + [C][e(t)]$$

gdzie: $x(t)$ jest wektorem stanu

$$[x(t)] = [i_A(t), i_B(t), i_C(t), \psi_A(t), \psi_B(t), \psi_C(t), u_A(t), u_B(t), u_C(t)]^T$$

– $e(t)$ jest wektorem wymuszeń

$$[e(t)] = [e_A(t), e_B(t), e_C(t), 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\begin{cases} e_A(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) \\ e_B(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ e_C(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi - 4\pi/3) \end{cases}$$

– $[A]$, $[B]$, $[C]$ – macierze, których elementy określone są przez parametry obwodu.

Warunek początkowy dla układu (1) ma następującą postać:

$$[x(0)] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

Prądy przekładników $i_p(t)$ oraz napięcie punktu neutralnego $u_N(t)$ związane są z wektorem stanu zależnościami:

$$(2) \quad \begin{cases} i_{pA}(t) = \frac{1}{R_p} \left[u_A(t) - \frac{d\psi_A(t)}{dt} \right] \\ i_{pB}(t) = \frac{1}{R_p} \left[u_B(t) - \frac{d\psi_B(t)}{dt} \right] \\ i_{pC}(t) = \frac{1}{R_p} \left[u_C(t) - \frac{d\psi_C(t)}{dt} \right] \end{cases}$$

$$(3) \quad u_N(t) = e_A(t) - R_s i_A(t) - L_s \frac{di_A(t)}{dt} - u_A(t)$$

Do rozwiązywania równań (1), (2) i (3) wykorzystano autorski program użytkowy napisany w języku Fortran z wykorzystaniem bibliotek numerycznych IMSL i środowiska graficznego Winteracter. Ze względu na to, że układ (1) należy do tzw. źle uwarunkowanych, 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} .

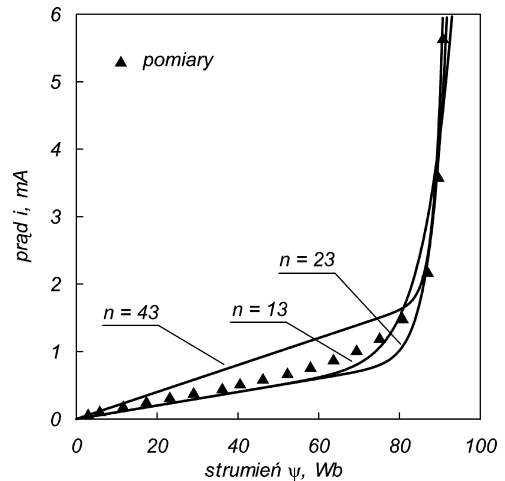
Aproksymacja charakterystyki $i(\psi)$

Do rozważań przyjęto przekładnik na napięcie znamionowe pierwotne 20 kV. Zmierzoną i przeliczoną na stronę pierwotną charakterystykę $i(\psi)$ przedstawiono na rysunku 2.

Charakterystykę $i(\psi)$ aproksymowano zależnością typu wielomianowego o następującej postaci:

$$(4) \quad i = a\psi + b\psi^n$$

gdzie: a , b , n – stałe.



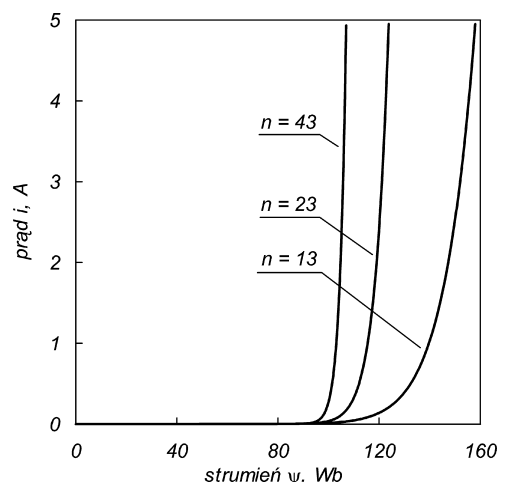
Rys. 2. Zmierzona charakterystyka $i = i(\psi)$ i jej aproksymacja dla różnych wartości wykładnika n

Wykorzystując program Origin aproksymowano charakterystykę (4) dla $n = 13$, 23 oraz 43, a wyniki tej aproksymacji przedstawiono w tabeli 1. Ponadto na rysunku 2 pokazano kształt aproksymowanych krzywych. Zgodność założonych krzywych w stosunku do zmierzonych punktów zwiększa się wraz ze wzrostem wykładnika n , a dla $n = 13$ zgodność ta wydaje się być wystarczająca.

Tabela 1. Wartości współczynników n , a , b oraz współczynnika zgodności R^2

i	Parametr			R_i^2
	n_i	a_i [A/Wb]	b_i [A/Wb n]	
1	13	$(1,00 \pm 0,21) \cdot 10^{-5}$	$(1,293 \pm 0,121) \cdot 10^{-28}$	0,939
2	23	$(1,00 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}$	$(3,646 \pm 0,200) \cdot 10^{-48}$	0,977
3	43	$(2,00 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$	$(2,721 \pm 0,074) \cdot 10^{-87}$	0,994

Należy mieć jednak na uwadze, że ferorezonansowi może towarzyszyć „głębokie nasycenie” rdzenia przekładnika, a tym samym zakres charakterystyki przedstawiony na rysunku 2 może nie dawać adekwatnej informacji o warunkach powstawania ferorezonansu. Pokazuje to rysunek 3, na którym przedstawiono aproksymowane charakterystyki dla prądów w zakresie do około 5 A.



Rys. 3. Kształt charakterystyk $i = i(\psi)$ w stanie „głębokiego nasycenia”

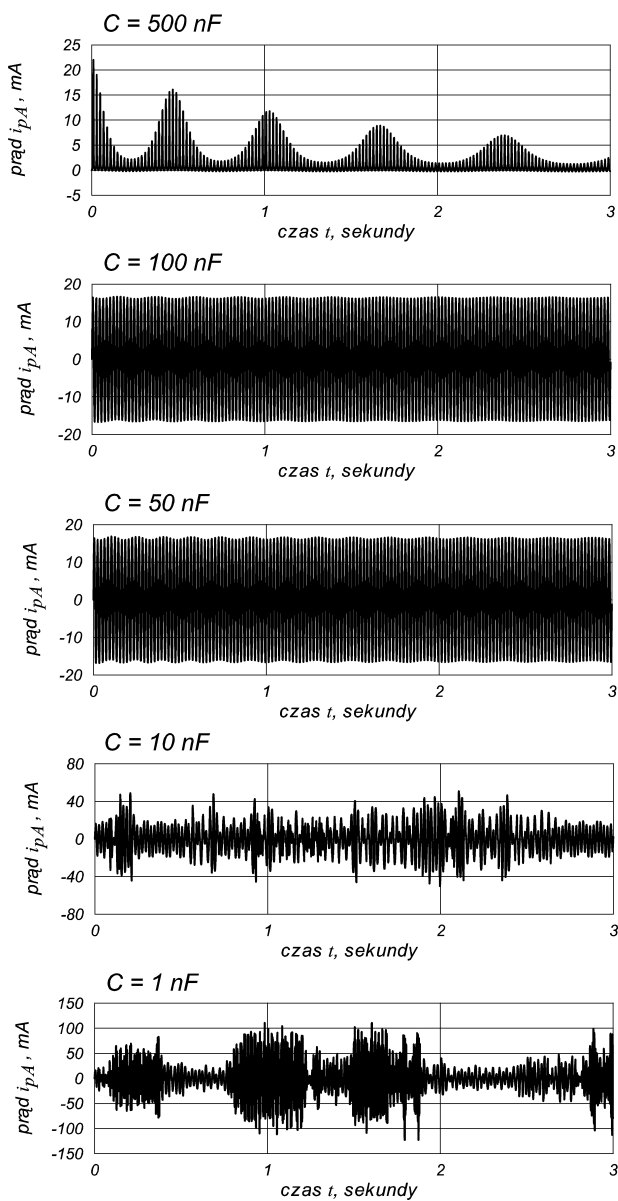
Analiza wpływu charakterystyki $i(\psi)$ na powstawanie ferorezonansu

W celu analizy wpływu charakterystyki $i(\psi)$ na powstawanie drgań ferorezonansowych przeprowadzono symulacje odpowiedzi czasowej układu z rysunku 1 po załączeniu źródeł napięcia zasilania w chwili $t = 0$, dla różnych wartości pojemności równoległej C .

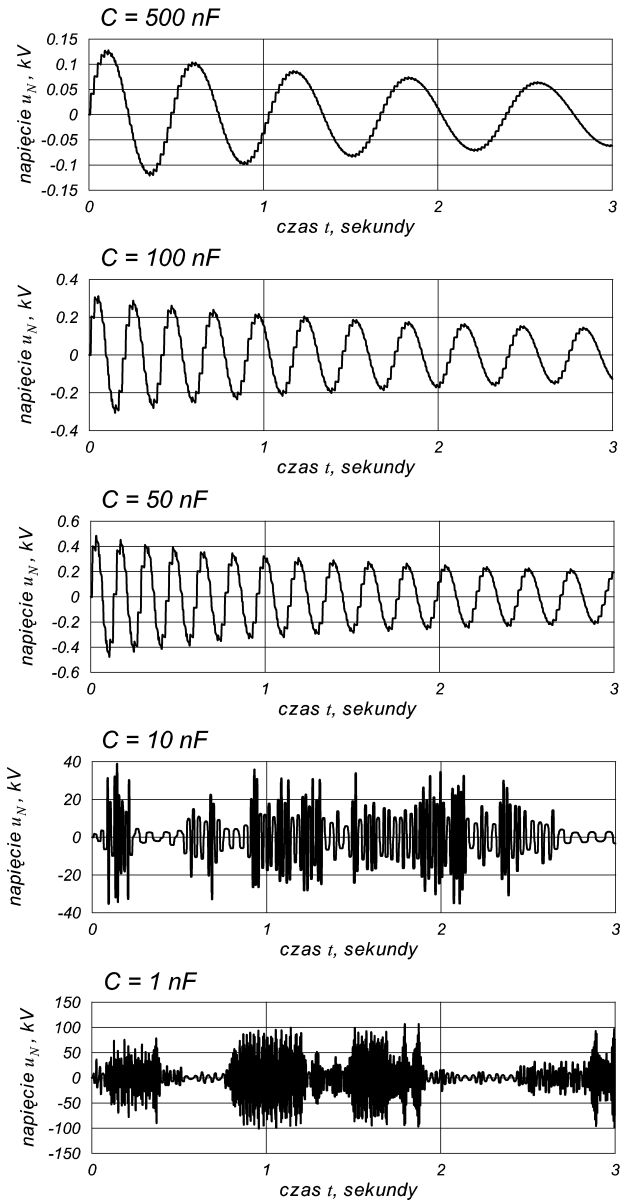
Porównaniu poddano zachowanie układu, w którym charakterystyka magnesowania określona jest funkcją (4), a wartości parametrów a_i , b_i , n_i określone są w tabeli 1.

Na rysunku 4 pokazano przebiegi czasowe prądów uzwojeń pierwotnych przekładników dla pojemności C równej 500 nF, 100 nF, 50 nF, 10 nF oraz 1 nF i dla najniższego stopnia $n = 13$ wielomianu aproksymującego charakterystykę $i(\psi)$. Natomiast na rysunku 5 przedstawiono analogiczne przebiegi napięć punktów neutralnych.

Z przedstawionych wykresów widać, że w zależności od wartości pojemności C odpowiedź układu po załączeniu źródeł zasilania może mieć dwojaki charakter.



Rys. 4. Przebiegi czasowe prądów uzwojeń pierwotnych przekładników dla różnych wartości pojemności C i dla stopnia $n = 13$ wielomianu aproksymującego charakterystykę $i(\psi)$



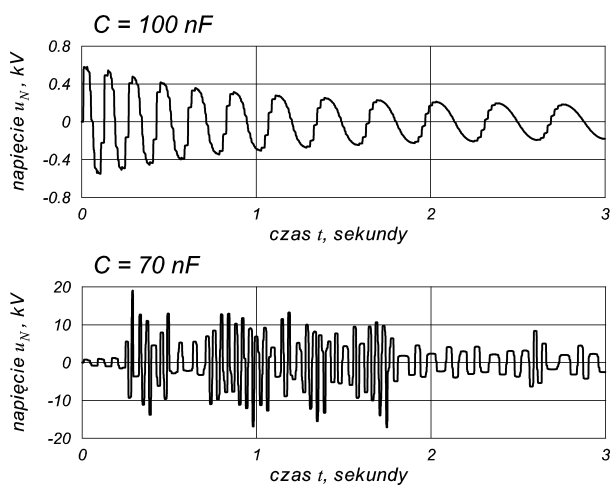
Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć punktu neutralnego dla różnych wartości pojemności C i dla stopnia $n = 13$ wielomianu aproksymującego charakterystykę $i(\psi)$

Dla pojemności większej od pewnej pojemności granicznej C_g napięcie punktu neutralnego ma charakter drgań gasnących o częstotliwości zmiennej w czasie (malejącej) i znacznie niższej od częstotliwości źródeł zasilających. Wartości chwilowe napięcia punktu neutralnego nie przekraczają wartości 0,6 kV. W takim przypadku identyczny charakter ma obwódka przebiegów czasowych prądów pierwotnych przekładników. Ze względu na stosunkowo krótki czas trwania oscylacji oraz niewielkie wartości prądów pierwotnych (kilkadziesiąt mA) stan taki nie powoduje zagrożenia dla przekładników.

Zmniejszaniu pojemności C towarzyszy wzrost częstotliwości oscylacji napięcia punktu neutralnego U_N . Zasadniczy jego charakter nie ulega jednak zmianie. Po obniżeniu wartości pojemności C poniżej wartości granicznej C_g następuje jakościowa zmiana charakteru zachowania układu. Wzbudzone zostają oscylacje o charakterze chaotycznym lub podharmonicznym. Napięcie punktu neutralnego może osiągać wartości chwilowe dochodzące do 40 kV, a wartości chwilowe prądów pierwotnych przekładników mogą mieć wartości nawet kilku

amperów. Dalsze obniżanie pojemności C powoduje zmianę przebiegów czasowych obserwowanych napięć i prądów, jednak maksymalne ich wartości pozostają na poziomie wielokrotnie przewyższającym ich wartości znamionowe. Dokładniejsza analiza przebiegów czasowych dla różnych wartości pojemności C pokazała, iż oscylacje ferorezonansowe mogą mieć dla pewnych wartości C charakter gasnący (bez stosowania dodatkowego rezystora tłumiącego), a dla pewnych wartości C charakter niegasnący.

Analogiczna analiza przebiegów czasowych w układzie, w którym stopień n funkcji aproksymującej jest wyższy, pokazała, iż w każdym z przypadków istniała graniczna wartość pojemności C , poniżej której charakter zachowania układu zmienia się jakościowo. Okazuje się jednak, że wartość pojemności C_g bardzo silnie (i monotonicznie) zależy od parametru n . Podwyższenie wartości n powoduje znaczne podwyższenie wartości pojemności granicznej C_g . Dla porównania, na rysunku 6 pokazano przebiegi napięcia punktu neutralnego dla pojemności $C = 100$ nF oraz 70 nF i stopnia wielomianu $n = 23$.



Rys. 6. Przebiegi czasowe napięcia punktu neutralnego dla pojemności $C = 100$ nF oraz 70 nF i dla stopnia $n = 23$ wielomianu aproksymującego charakterystykę $i(\psi)$

Dokładniejsza analiza zachowania układu dla pojemności bliskich wartości C_g pozwoliła na określenie wartości pojemności C_g dla każdego z trzech analizowanych przypadków aproksymacji charakterystyki $i(\psi)$. Wartości C_g dla analizowanych przypadków aproksymacji zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości pojemności granicznej C_g dla analizowanego układu przy różnych parametrach funkcji aproksymującej $i(\psi)$

Lp.	n	C_g [nF]
1	13	22
2	23	72
3	43	168

Podsumowanie

Przedstawiona analiza powstawania zjawisk ferorezonansowych w układzie trzech jednofazowych przekładników napięciowych SN w sytuacji braku uziemienia punktu neutralnego pokazała, iż procesy łączeniowe mogą spowodować powstanie niebezpiecznych oscylacji. Jak pokazano, zjawisko może wystąpić dla pewnego zakresu pojemności połączonej równolegle z uzwojeniami pierwotnymi przekładników.

W przypadku wystąpienia oscylacji ferorezonansowych, 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 ferorezonansowego przez zastosowanie, na przykład rezystora tłumiącego R , połączonego z uzwojeniami dodatkowymi przekładników w układzie otwartego trójkąta.

Dokładne określenie wartości granicznej pojemności równoległej C , przy której możliwe jest powstanie niebezpiecznego stanu ferorezonansowego jest zadaniem trudnym, gdyż wymaga poprawnej aproksymacji funkcji $i(\psi)$, szczególnie dla dużych prądów. Pociąga to za sobą konieczność pomiaru charakterystyki przekładnika w warunkach bardzo głębokiego nasycenia.

Jak wykazano, niedokładność aproksymacji charakterystyki w zakresie głębokiego nasycenia decyduje o dokładności określenia pojemności granicznej.

LITERATURA

- [1] Mork B.A., Stuehm D.L., Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems, *IEEE Trans. on PD.*, 1994, Vol.9, No 2, 1009-1017
- [2] de León F., Semlyen A., A simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformer, *IEEE Trans. on PD.*, 1995, Vol.10, No 1, 315-321
- [3] Barr R.A., Platt D., Modelling and mapping ferroresonant states in series compensated distribution and subtransmission lines, *IEEE Trans. on PD.*, 1996, Vol.11, No 2, 931-939
- [4] Naidu S.R., Souza B.A., Analysis of ferroresonant circuits using Newton-Raphson scheme, *IEEE Trans. on PD.*, 1997, Vol.12, No 4, 1793-1798
- [5] 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
- [6] Van Craenenbroeck T., et al., Bifurcation analysis of three-phase ferroresonant oscillations in underground power systems, *IEEE Trans. on PD.*, 1999, Vol.14, No 2, 531-536
- [7] 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
- [8] Irvani M.R., et al., Modeling and analysis guidelines for slow transients — Part III: The study of ferroresonance, *IEEE Trans. on PD.*, 2000, Vol.15, No 1, 255-265
- [9] Ben-Tal A., Kirk V., Wake G., Banded chaos in power systems, *IEEE Trans. on PD.*, 2001, Vol.16, No 1, 105-110
- [10] Jacobson D.A.N., et al., Stability domain calculations of period-1 ferroresonance in a nonlinear resonant circuit, *IEEE Trans. on PD.*, 2002, Vol.17, No 3, 865-871
- [11] Short T.A., Burke J.J., Mancao R.T., Application of MOVs in the distribution environment, *IEEE Trans. on PD.*, 1994, Vol.9, No 1, 293-305
- [12] Walling R.A., et al., Performance of metal-oxide arresters exposed to ferroresonance in padmount transformers, *IEEE Trans. on PD.*, 1994, Vol.9, No 2, 788-795
- [13] Graovac M., et al., Fast ferroresonance suppression of coupling capacitor voltage transformers, *IEEE Trans. on PD.*, 2003, Vol.18, No 1, 158-163

Autorzy: dr inż. Marek Florkowski, ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, marek.florkowski@pl.abb.com; dr inż. Mariusz Luto, ABB Sp. z o.o., ul. Leszno 59, 06-300 Przasnysz, E-mail: marusz.luto@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. Wojciech Piasecki, ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, wojciech.piasecki@pl.abb.com;