

Zjawiska ferorezonansowe w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Streszczenie. Opisano zagadnienia związane z występowaniem zjawisk ferorezonansowych w stacjach wysokiego napięcia, uwarunkowanych konfiguracjami układowymi stacji oraz jej wyposażeniem w wieloprzerwowe wyłączniki i indukcyjne przekładniki napięciowe. Podano metodę oceny układu stacyjnego na możliwość występowania ferorezonansu. Zamieszczono przykładowe wyniki symulacji komputerowych i analiz podatności ferorezonansowej układu stacyjnego 110 kV. Podano wskazówki dotyczące sposobów eliminacji i tłumienia drgań ferorezonansowych w układach rozdzielni wysokich napięć.

Abstract. The ferroresonance phenomena occurring in high voltage substation equipped with inductive voltage transformers and multi-gap circuit breakers have been described. The method of estimate of substation configurations on possibility of ferroresonance occurrence are presented. Exemplary results of simulating calculations and analyses of ferroresonance susceptibility are presented for 110 kV substation configuration. Methods for elimination and suppression of ferroresonance phenomena in high voltage substations are presented. (**Ferroresonance phenomena in high voltage substations**).

Słowa kluczowe: zjawiska ferorezonansowe, stacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia, tłumienie i eliminacja ferorezonansu.

Keywords: ferroresonance phenomena, high voltage substations, suppression and elimination of ferroresonance.

Wstęp

Ferorezonans stanowi przedmiot zainteresowania energetyków wielu krajów, ze względu na zagrożenia jakie niesie to zjawisko dla prawidłowej pracy sieci. Występujące podczas ferorezonansu przebiegi mogą zagrażać izolacji stacji i linii oraz zainstalowanych urządzeń i aparatów elektroenergetycznych, a przetężenia są niezwykle groźne dla indukcyjnych przekładników napięciowych, szczególnie wtedy gdy zjawisko to jest długotrwałe. W praktyce eksploatacyjnej odnotowano wiele przypadków występowania ferorezonansu trwałego (nie tłumionego) powodującego przegrzewanie się uzwojeń pierwotnych przekładników [1,2,3,6]. Pomimo, że zjawisko to jest znane od dawna to nadal jest aktualne i stanowi przedmiot wielu badań. Powoduje ono zakłócenia w pracy sieci i zmniejszenie niezawodności zasilania oraz jakości dostarczanej energii wskutek przerw związanych z wyłączeniem linii oraz odształceniami przebiegów napięcia i prądu.

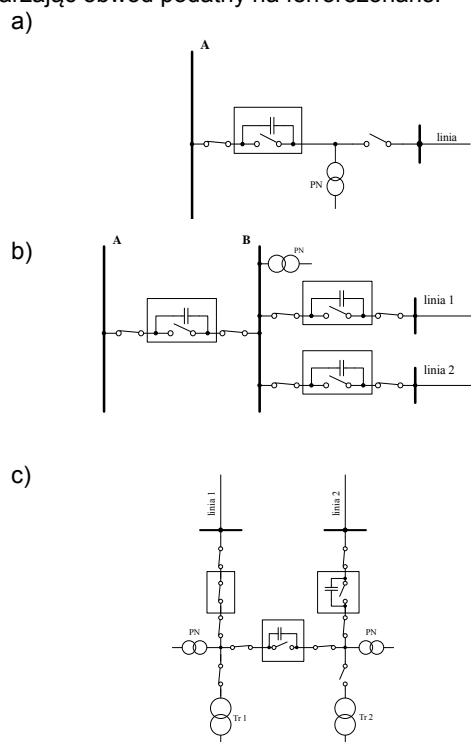
Ferorezonans w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Zjawisko ferorezonansu w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest ściśle związane z konfiguracją układu sieciowego oraz obecnością indukcyjnych przekładników napięciowych i wyłączników wieloprzerwowych wyposażonych w kondensatory sterujące przyłączone równolegle do ich komór gaszeniowych [4,5,6,7,8].

Ferorezonans w układach stacyjnych wzbudza się po otwarciu wyłączników wieloprzerwowych zasilających system szyn zbiorczych lub jego część, do którego są przyłączone indukcyjne przekładniki napięciowe, przy jednocześnie zamkniętych odłącznikach znajdujących się po obu stronach otwartych wyłączników. Najczęściej taki stan stacji rozdzielczych wysokiego napięcia występuje po zadziałaniu zabezpieczeń spowodowanych zakłóceniami lub przy przełączaniu zasilania z jednego na drugi system szyn zbiorczych. Przykłady układów sieciowych, w których przy sprzyjających warunkach (parametry obwodu oraz przekładnika napięciowego i wyłączników) może pojawić się ferorezonans pokazano na rysunku 1.

W układzie pola liniowego (rys. 1a) po otwarciu wyłącznika i odłącznika linii przekładnik napięciowy jest

zasilany poprzez kondensatory sterujące wyłącznika stwarzając obwód podatny na ferorezonans.

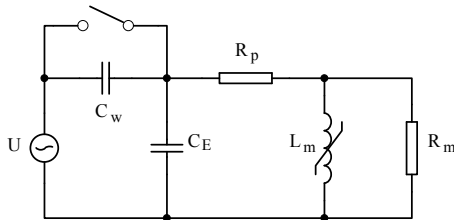


Rys. 1. Przykładowe układy sieciowe podatne na ferorezonans (a – pole liniowe, b – szyny zbiorcze, c – stacja typu H)

W przypadku zakłócenia w systemie szyn zbiorczych stacji – system B (rys. 1b) następuje otwarcie wyłączników liniowych oraz wyłącznika sprzęgłowego i przekładnik jest zasilany poprzez pojemności sterujące trzech wyłączników. Podobnie, otwarcie wyłącznika linii 2 oraz wyłącznika sprzęgłowego w stacji typu H (rys. 1c), przy odłączonym transformatorze Tr2 i zamkniętych odłącznikach po obu stronach wyłączników, stworzy konfigurację układową sprzyjającą powstawaniu drgań ferorezonansowych.

Wymienione wyżej układy sieciowe mogą być sprowadzone do jednofazowego schematu zastępczego pokazanego na rysunku 2. W takim obwodzie występują

warunki sprzyjające powstawaniu ferorezonansu szeregowego pomiędzy pojemnością wzdłużną wyłączników (C_w) oraz nieliniową indukcyjnością przekładnika napięciowego (L_m). Ponadto może pojawić się ferorezonans równoległy w obwodzie składającym się z pojemności doziemnej (C_E) i indukcyjności przekładnika, który skutkuje powstawaniem dużych prądów w uzwojeniu pierwotnym przekładnika.



Rys. 2. Jednofazowy schemat zastępczy układu odzworowujący warunki sprzyjające powstawaniu drgań ferorezonansowych (U – napięcie fazowe sieci, C_w – wynikowa pojemność kondensatorów sterujących wyłącznikami i/lub pojemność sprzęgająca linii dwutorowej, C_E – wynikowa pojemność doziemna odcinków szyn pomiędzy wyłącznikami i przekładnikiem napięciowym, R_p – rezystancja uzwojenia pierwotnego przekładnika, L_m – nieliniowa indukcyjność przekładnika, R_m – rezystancja odzworowująca obciążenie uzwojenia wtórnego oraz straty czynne w rdzeniu magnetycznym przekładnika)

Omawiane w literaturze technicznej [3,6,8,9] przypadki uszkodzenia się przekładników wskutek zjawisk ferorezonansowych wskazują, że występują one zarówno w jednej, dwóch lub trzech fazach, w zależności od aktualnego stanu magnetycznego rdzeni przekładników. Napięcia występujące na przekładniku osiągają wartości przekraczające w niektórych przypadkach dwukrotnie poziom napięcia znamionowego, a prądy płynące przez jego uzwojenie pierwotne w czasie trwania ferorezonansu są wielokrotnie większe niż prądy przy napięciu znamionowym. Uszkodzenie się przekładników napięciowych podczas ferorezonansu jest więc wynikiem przepływu przez uzwojenie pierwotne przekładnika dużych prądów o wartościach, do których uzwojenie to nie jest przystosowane.

Tak znaczne prądy w warunkach ferorezonansu trwałego mogą powodować przegrzewanie się uzwojenia pierwotnego przekładnika, a w konsekwencji do zwarcień międzyzwojowych i eksplozji przekładnika (rys. 3).



Rys. 3. Destrukcja przekładnika napięciowego 230 kV wskutek ferorezonansu trwającego 12 minut (wg [6])

W zależności od parametrów układu drgającego takich jak C_w i C_E oraz parametrów przekładnika napięciowego występują rozmaite rodzaje ferorezonansu. W praktyce zaobserwowano drgania ferorezonansowe zarówno częstotliwości sieciowej jak i o częstotliwościach podharmonicznych równych $1/3$ lub $1/2$ częstotliwości podstawowej. Czasami występuje również ferorezonans o charakterze chaotycznym, przy którym amplitudy napięcia i prądu oraz ich częstotliwości ulegają przypadkowym zmianom. Stan taki jest chwiejny i albo zanika albo przechodzi w ferorezonans podharmoniczny.

Badania podatności układów sieciowych do wzbudzenia drgań ferorezonansowych oraz metod jego tłumienia prowadzone są zarówno metodami bezpośrednimi tzn. podczas pomiarów sieciowych lub w laboratoriach zwojowych i wysokonapięciowych oraz metodami modelowania matematycznego z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Liczne badania bezpośrednie i modelowe [4,8,9,10,11] potwierdziły, że warunkiem koniecznym do wystąpienia ferorezonansu w sieci WN jest odpowiednia korelacja pomiędzy pojemnością wyłącznika i pojemnością doziemną przy określonych własnościach magnetycznych przekładnika napięciowego.

Metoda analizy podatności ferorezonansowej układów stacyjnych

Zjawiska ferorezonansowe w sieciach wysokiego napięcia, w których punkt neutralny jest uziemiony bezpośrednio, występują wtedy gdy nieliniowa indukcyjność przekładnika napięciowego jest zasilana poprzez pojemność kondensatorów sterujących wyłączników wieloprzerwowych.

Zgodnie ze schematem podanym na rysunku 2, warunkami koniecznymi aby wystąpiło prawdopodobieństwo drgań ferorezonansowych w układzie stacyjnym są:

Warunek I: Obecność w układzie rozdzielni indukcyjnych przekładników napięciowych (reprezentowany na rys. 2 przez L_m , R_m , R_p i częściowo przez C_E w zakresie własnych pojemności doziemnych przekładników napięciowych).

Warunek II: Obecność w układzie rozdzielni wyłączników wieloprzerwowych z kondensatorami sterującymi (C_w - na rys. 2).

Warunek III: Zaistnienie w układzie rozdzielni obwodu: otwarty wyłącznik z kondensatorami sterującymi - indukcyjny przekładnik napięciowy, zasilany napięciem sieciowym od strony przeciwnej w stosunku do miejsca połączenia z przekładnikiem (U - na rys. 2).

Spełnienie tych trzech warunków koniecznych wskazuje na podatność układu rozdzielni do wzbudzenia się drgań ferorezonansowych.

W niektórych przypadkach obecność w układzie rozdzielni indukcyjnych przekładników napięciowych, przy jednoczesnej obecności wyłączników z kondensatorami sterującymi, nie jest wystarczająca do zakwalifikowania przekładnika jako biorącego udział w procesie ferorezonansowym. Zależy to od jego lokalizacji w rozdzielni np. przekładniki przyłączone bezpośrednio do linii napowietrznych lub kablowych oraz do zacisków transformatorów sieciowych nie powinny być rozpatrywane w aspekcie możliwości udziału w ferorezonansie, ze względu na duże pojemności doziemne linii i transformatorów, które przeciwdziałają powstawaniu takich drgań.

Z powyższych powodów przy ocenie podatności ferorezonansowej układów stacyjnych wprowadza się warunki korygujące wynikające z lokalizacji przekładników

wskazującej na brak możliwości ich udziału w procesie ferorezonansowym.

Niezależnie od wyżej wymienionych warunków koniecznych i korygujących, przy prowadzeniu obliczeń symulacyjnych podatności ferorezonansowej konkretnych układów stacyjnych lub typów przekładników uwzględnia się również parametry przekładnika napięciowego (charakterystyka magnesowania, straty w rdzeniu itp.), zakres zmienności wartości pojemności doziemnej rozdzielni, zakres zmienności pojemności wyłączników, wartość napięcia zasilającego, stan magnetyczny przekładnika oraz wartość początkową napięcia pojawiającą się w układzie ferorezonansowym w chwili zaniku zakłócenia lub procesu przełączania.

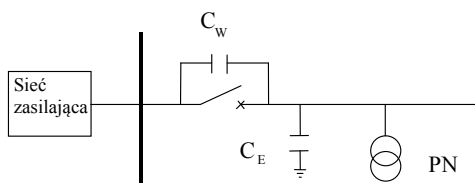
Zastosowana metoda analizy podatności ferorezonansowej polega na:

- selekcji układów stacyjnych spełniających warunki I, II i III z uwzględnieniem warunków korygujących,
- rozpatrzeniu układów stacyjnych podatnych na ferorezonans w rozmaitych warunkach zakłóceńowych i ruchowych, co w konsekwencji prowadzi do określenia granicznych parametrów układów rozdzielni podlegających ferorezonansowi.

W wyniku analizy można wytypować rozdzielnie, w których mogą wystąpić drgania ferorezonansowe. Przy obliczeniach granicznych parametrów pojemnościowych rozdzielni należy uwzględnić najmniejszy i największy pod względem rozległości oraz liczby wyłączników wieloprzerwowych i przekładników indukcyjnych układ biorący udział w ferorezonansie. Do obliczeń pojemności doziemnych rozdzielni można wykorzystać dane literaturowe lub wykonać bezpośrednie pomiary pojemności typowych układów stacyjnych. Pojemności doziemne przekładników napięciowych można uzyskać na podstawie kart katalogowych przekładników, informacji producentów lub bezpośrednich pomiarów. Pojemności kondensatorów sterujących wyłącznikami określa się głównie na podstawie katalogów fabrycznych lub w przypadku ich braku na podstawie protokołów przeglądów technicznych wyłączników wykonanych przez eksploatatora sieci.

Obliczenia podatności ferorezonansowej układów stacyjnych

Obliczenia podatności ferorezonansowej układów stacyjnych przeprowadzono metodą symulacji komputerowych przy użyciu programu EMTP-ATP. Podstawowy schemat modelowanego układu pokazano na rysunku 4.



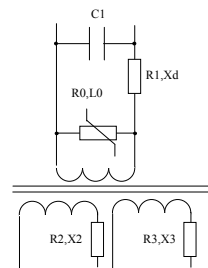
Rys. 4. Schemat obwodu przyjęty do obliczeń (C_w – pojemność kondensatorów wyłącznika, C_E – pojemność doziemna stacji)

Przykładowo zaprezentowano wyniki obliczeń wykonanych dla jednej z krajowych stacji elektroenergetycznych 110 kV wyposażonej w indukcyjne przekładniki napięciowe typu U110b i wyłączniki typu WMSII-110. W obliczeniach zastosowano model przekładnika, którego schemat zastępczy pokazano na rysunku 5a, a jego charakterystykę magnesowania zamieszczono na rysunku 5b.

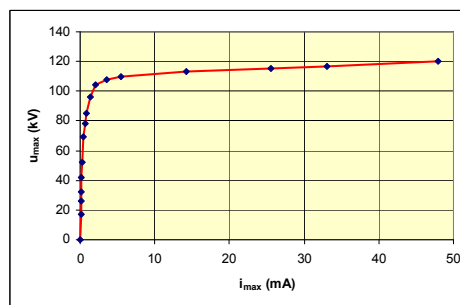
Do obliczeń symulacyjnych przyjęto następujące dane przekładnika: L_0 - nieliniowa indukcyjność gałęzi

magnesującej (wg charakterystyki podanej na rys. 5b), R_0 - rezystancja gałęzi magnesującej (84,8 M Ω), C_1 - pojemność wejściowa (100 pF), R_1 - rezystancja uzwojenia pierwotnego (14,0 k Ω), X_d - reaktancja uzwojenia pierwotnego (128,2 k Ω), R_2 - rezystancja uzwojenia wtórnego pomiarowego (0,054 Ω), R_3 - rezystancja uzwojenia wtórnego zabezpieczeniowego (0,033 Ω). Obliczenia prowadzono w zakresie zmienności pojemności doziemnej stacji C_E od 250 pF do 3000 pF oraz pojemności kondensatorów wyłączników C_w od 300 pF do 6000 pF. Przykładowe wyniki symulacji podano na rysunku 6.

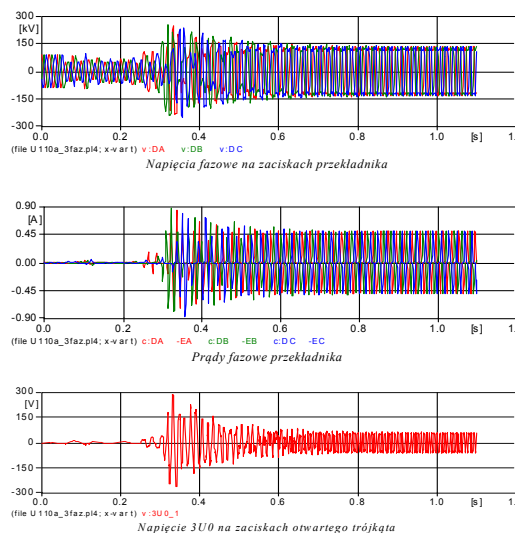
a)



b)



Rys. 5. Przekładnik UO-110b, a) - schemat zastępczy, b) - charakterystyka magnesowania

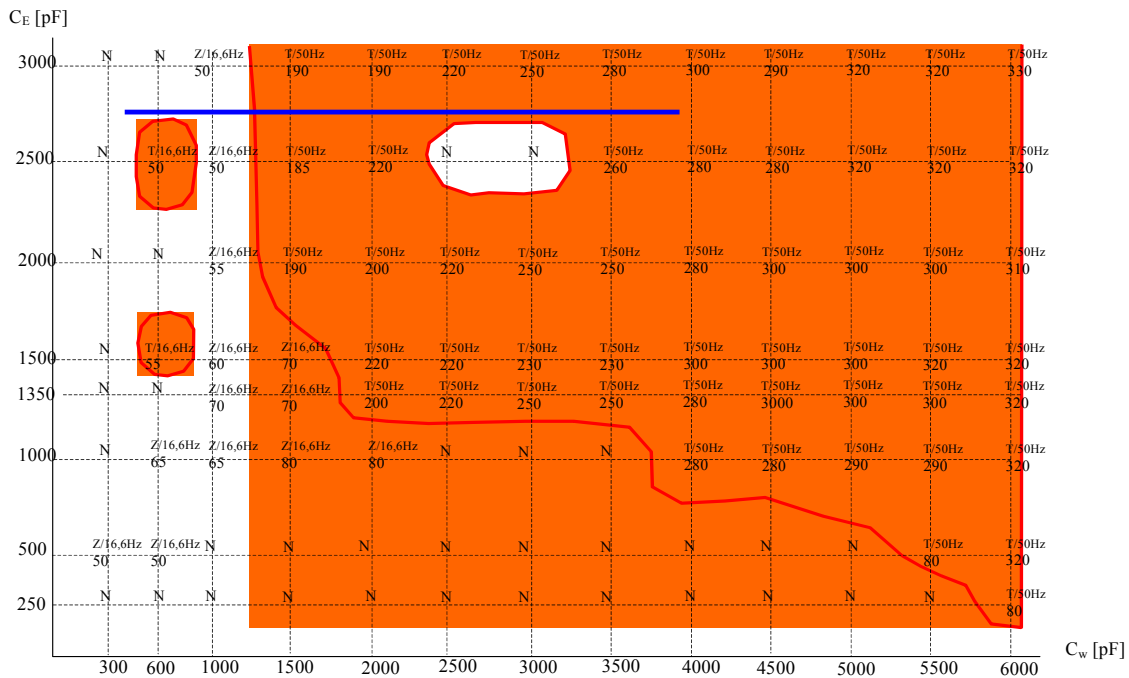


Rys. 6. Napięcia i prądy fazowe na zaciskach przekładnika UO-110b podczas trwałego ferorezonansu 50 Hz ($C_w=2500$ pF, $C_E=1350$ pF)

W wyniku serii obliczeń symulacyjnych, wykonanych przy użyciu programu EMTP-ATP dla różnych pojemności C_E i C_w , uzyskano mapę obszarów podatności ferorezonansowej analizowanej stacji elektroenergetycznej pokazaną na rysunku 7. Na tę mapę naniesiono zakres zmienności wypadkowej pojemności kondensatorów

wyłączników biorących udział w układach podatnych na ferorezonans. Na tej podstawie można oszacować jakie jest zagrożenie ferorezonansowe analizowanej stacji. Z porównania wykresów zmienności pojemności wyłączników (kolor niebieski) i zakresu występowania ferorezonansu trwałego (kolor czerwony) przedstawionych na rysunku 7 można stwierdzić, że jeżeli pojemność wynikowa wyłączników nie przekracza 1300 pF to w układach stacji nie wystąpi ferorezonans trwały.

Warunek ten odpowiada układowi stacji, w którym pracuje nie więcej niż 4. wyłączniki przy założeniu, że pojemność wynikowa jednego wyłącznika wynosi 325 pF. W zakresie powyżej 1300 pF wykres zmienności pojemności wyłączników leży w obszarze występowania najbardziej niebezpiecznego ferorezonansu trwałego, co oznacza konieczność zastosowania środków wymuszających jego wyłączenie lub eliminację.



Rys. 7. Mapa obszarów podatności układu stacji elektroenergetycznej 110 kV na ferorezonans z zestawem trójfazowym przekładników typu UO-110b (Kolorem czerwonym zaznaczono obszary parametrów C_w i C_E w których występuje ferorezonans trwały. Kolorem niebieskim zaznaczono zakres zmienności pojemności kondensatorów wyłączników. Przykładowe oznaczenia: N - ferorezonans nie występuje, T/16,6Hz/50 - trwały ferorezonans o częstotliwości 16,6 Hz i maksymalnej wartości napięcia fazowego 50 kV, Z/16,6Hz/80 - krótkotrwały, zanikający ferorezonans o częstotliwości 16,6 Hz i maksymalnej wartości napięcia fazowego 80 kV, T/50Hz/250 - trwały ferorezonans o częstotliwości 50 Hz i maksymalnej wartości napięcia fazowego 250 kV)

Eliminacja i tłumienie drgań ferorezonansowych

Istnieje szereg sposobów zapobiegających wystąpieniu drgań ferorezonansowych podczas wyłączenia nie obciążonych szyn zbiorczych z przyłączonymi do nich indukcyjnymi przekładnikami napięciowymi lub ograniczających negatywne skutki tego zjawiska. Należą do nich:

- Instalowanie w rozdzielniach wyłączników jednoprzerwowych. Rozwiązanie takie jest obecnie najczęściej stosowane przy modernizacji stacji zważywszy, że współczesne wyłączniki na napięcia znamionowe do 400 kV są budowane jako jednoprzerwowe i nie są wyposażane w kondensatory sterujące.
- Instalowanie zamiast przekładników indukcyjnych pojemnościowych przekładników napięciowych, w których problem ferorezonansu jest eliminowany poprzez wyposażenie tych przekładników w odpowiednie układy tłumiące podczas ich produkcji.
- Zastosowanie odpowiednich zmian konstrukcyjnych przekładników napięciowych poprzez odpowiednie ukształtowanie charakterystyki magnesowania i/lub zmianę materiału magnetycznego rdzenia. Metoda ta może być stosowana w bardzo ograniczonym zakresie tym bardziej, że współczesne

materiały magnetyczne charakteryzują się coraz lepszymi własnościami magnetycznymi - między innymi mała stratność materiału rdzenia sprzyja podatności ferorezonansowej.

- Dodatkowe obciążanie przekładnika mocą czynną poprzez przyłączenie na stałe obciążenia rezystancyjnego liniowego lub nieliniowego do zacisków uzwojeń wtórnych lub obwodu otwartego trójkąta. Stosowanie tej metody jest ograniczone ze względu na parametry cieplne przekładnika (przeciętna moc grzejna przekładnika wynosi kilkaset watów i nie powinna być przekroczona ze względu na ryzyko przegrzania przekładnika) oraz wzrost uchybów pomiarowych.
- Zastosowanie odpowiednio dobranego obciążenia rezystancyjnego załączanego dorywczo np. przez automatycznie programowane układy sterujące włączające na krótki czas po otwarciu wyłączników obciążenie przekładnika. Innym rozwiązaniem są inteligentne układy tłumiące zbudowane na podzespołach elektronicznych wykrywające ferorezonans, włączające obciążenie i automatycznie wyłączające się po jego zaniku.

Podsumowanie

Problem występowania ferorezonansu w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia wyposażonych w indukcyjne przekładniki napięciowe i wyłączniki wieloprzerwowe z kondensatorami sterującymi jest nadal aktualny. Wynika to z faktu wprowadzania do eksploatacji nowych typów indukcyjnych przekładników napięciowych lub kombinowanych, oraz nowych układów stacyjnych o innych parametrach niż dotychczas stosowane. Ponadto zmniejszające się, wskutek stosowania elektronicznych zabezpieczeń i układów pomiarowych, obciążenia uzwojeń wtórnych przekładników powodują, że parametry układów stacyjnych wykazują większą podatność na ferorezonans.

Współczesne metody analizy zjawisk ferorezonansowych w sieciach wysokich napięć polegają głównie na modelowaniu matematycznym przy wspomaganie komputerowym lub na badaniach laboratoryjnych przy weryfikacji ich wyników poprzez pomiary bezpośrednie i/lub obserwacje eksploatacyjne.

Skuteczne tłumienie drgań ferorezonansowych jest możliwe przy zastosowaniu nowoczesnych metod dodatkowego dociążania przekładników napięciowych mocą czynną, polegających na użyciu inteligentnych układów tłumiących przyłączanych do uzwojeń wtórnych przekładników lub zacisków otwartego trójkąta, które rozpoznają wzbudzenie się ferorezonansu, powodują jego wytłumienie i automatycznie się wyłączają.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Przybysz, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: jerzy.przybysz@ien.com.pl, dr inż. Janusz Karolak, Instytut Energetyki, E-mail: janusz.karolak@ien.com.pl, dr inż. Józef Wiśniewski, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: jwisniew@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Aggarwal R. P. at al: Failure of electromagnetic voltage transformer due to sustained overvoltage on switch off – preventive measures. *IEEE Trans. on PAS* -101 1982, nr 12
- [2] Bieliakow N. N. i inni: Zjawisko ferorezonansu przy wyłączaniu szyn z indukcyjnymi przekładnikami napięciowymi. *Energetyka* nr 9, 1984 r.
- [3] Aleksiejew W. G., Jewdokimow S. A.: Ustłowija ferorezonansa s transformatorami napriazhenija w seti 220 kV. *Elektricheskie Stancji* 1994, nr 10
- [4] Mazuś J., Stachowski W., Wieczorek G.: Eksperymentalne badania ferorezonansu w układzie wyłącznik- przekładnik napięciowy 110 kV. *Energetyka* 1984, nr 11
- [5] Sanaye-Pasand M. at al: Ferroresonance occurrence during energization of capacitive voltage substation. *IEEE, Power Engineering Society General Meeting*, 2003
- [6] Jacobson D.A.N.: Examples of ferroresonance in high voltage power system. *IEEE, Power Engineering Society General Meeting*, 2003
- [7] Sanaye-Pasand M. at al: Effects of grading capacitors of CBs on inception ferroresonance in power transformers. *39th International Universities Power Engineering Conference*, 2004
- [8] Stawowy E.: Ferrorezonans w przekładnikach napięciowych 220 kV. *Przegląd Elektrotechniczny* - Konferencje, Nr 1, 2005
- [9] Wiśniewski J., Anderson E., Karolak J.: Search for Network Parameters Preventing Ferroresonance Occurrences. *9-th International Conference "Electrical Power Quality and Utilisation"*, Barcelona, October 2007
- [10] Janssens N. at al: Elimination of temporary overvoltages due to ferroresonance of voltage transformers: Designe and testing of damping system. *CIGRE 1990*, Rap. 33-204
- [11] Prucker U., Umlauf A., Niedung L.: On avoiding ferroresonance in networks with inductive voltage transformers. *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft, Netherlands, 2003