

Symulacja chaosu ferorezonansowego za pomocą programu MicroTran

Streszczenie. W artykule omówiono wyniki badań dotyczących powstawania zjawiska chaosu ferorezonansowego w układzie elektroenergetycznym, przeprowadzonych za pomocą programu symulacyjnego MicroTran. Celem badań było rozeznanie możliwości modelowania układu dla celów chaosu ferorezonansowego oraz rozpatrzenie warunków wystąpienia tego zjawiska w systemie elektroenergetycznym. Wnioski uzyskane z rezultatów takich badań stanowią jednak mogą podstawę do stworzenia procedur postępowania podczas planowania rozwoju systemu elektroenergetycznego, również w zakresie przyłączania nowych odbiorów do istniejących struktur zmieniających w istotny sposób warunki pracy badanego układu.

Abstract. This paper presents the results of investigations of the nonlinear dynamic ferroresonance phenomena in a power system, when taking into consideration the chaotic behavior. The basic tool for numerical investigations was the MicroTran program. The aim of the study was to explore the possibility of modeling system for the chaos ferroresonance and consideration of the occurrence of this phenomenon in the power system. Conclusions received from the results of investigation, can create the basis for the procedures for the planning of development the power system, even for the connection of new customers to existing structures. (**Chaos behavior simulation of the nonlinear dynamic ferroresonance phenomena**).

Słowa kluczowe: chaos ferorezonansowy, identyfikacja zakłócenia, transformator, przebiegi przejściowe.

Keywords: ferroresonance chaos, identification of interference, transformer, transients.

doi:10.12915/pe.2014.08.28

Wprowadzenie

Badanie zjawisk związanych z występowaniem ferorezonansu w systemie elektroenergetycznym jest mocno zakorzenione oraz prezentowane w licznych publikacjach od wielu lat. Pojęcie ferorezonansu zostało wprowadzone po raz pierwszy w publikacjach [1, 2] na początku XX wieku, do opisu zjawisk zachodzących w transformatorze oraz prostych układach R, L, C. Aktualnie termin ten jest wykorzystywany do opisu prądów i napięć zarówno wyższych jak i subharmonicznych, ale także przebiegów quasi-okresowych, a nawet chaotycznych oscylacji w dowolnym układzie zawierającym cewkę nieliniową.

Pierwsze badania analityczne podjęto w połowie ubiegłego wieku [3, 4]. Następne badania były prowadzone głównie w celu poprawy stale niedoskonałego modelu transformatora. Były przeprowadzane również pomiary w systemie rzeczywistym.

Ferorezonans jest zjawiskiem obrazującym nagłą zmianę parametrów występującą w stanie ustalonym, podczas której może dojść do przepięć o różnych czasach trwania powodujących istotne negatywne konsekwencje dla pracy sieci przesyłowej i/lub rozdzielczej.

Ferorezonans może być zatem postrzegany jako forma nieliniowego, rezonansu chaotycznego, którego charakterystyczną cechą jest możliwość ustalenia szeregu równoznacznych rozwiązań wektora stanu dla rzeczywistego, stałego stanu sieci.

Dla danej konfiguracji systemu oraz narzuconych parametrów istnieje wiele różnych rozwiązań zależnych od zmiany warunków początkowych w układzie. W takich przypadkach, przy pracy w obszarach nieliniowości, możliwe jest wystąpienie chaosu ferorezonansowego, którego opis matematyczny jest bardzo trudny i złożony.

Jako narzędzia do analizy nieliniowych układów dynamicznych, wykorzystywane są m.in.:

- diagramy bifurkacyjne,
- odwzorowania fazowe i pola wektorowe,
- reprezentacje Poincaré.

Dzięki diagramom bifurkacyjnym możliwy jest opis skokowej zmiany własności modelu matematycznego przy drobnej zmianie jego parametrów. Podczas analizy zjawiska ferorezonansu odwzorowanie badanego układu

ma naturę deterministyczną, jednak niewielka zmiana parametrów poszczególnych jego elementów może spowodować, że w dłuższej skali czasowej model będzie miał charakter losowy. Model linii ma parametry rozłożone przestrzennie zaś model transformatora musi uwzględniać nieliniowość. W czasie normalnej pracy systemu można zaobserwować zmiany punktów równowagi – mogą pojawić się warunki krytyczne znane jako wartości graniczne lub bifurkacji. Diagram bifurkacji stanowi w tej sytuacji postać graficzną pojedynczego lub wielokrotnego rozwiązania pokazującego obszar zmian parametrów.

Odwzorowania fazowe stanowią analizę graficzną, w której zachowanie systemu jest opisane przez ruch punktu reprezentującego zmienne stanu systemu w czasie. W stanie ustalonym punkt porusza się periodycznie natomiast w warunkach chaosu trajektoria jest otwarta.

Odwzorowanie fazowe może być prezentowane w postaci ciągu dyskretnych punktów stanowiących próbki w stałych odstępach czasu. Taki zbiór punktów stanowi reprezentację Poincaré, która informuje o wzajemnych relacjach między częstotliwościami - funkcji wymuszającej oraz aktualnej dla systemu.

W odwzorowaniu Poincaré podczas badania ferorezonansu występują cztery tryby:

- fundamentalny – mapa Poincarégo jest reprezentowana przez jeden punkt,
- podharmoniczny – dla n podharmonicznych występuje n punktów,
- quasi-okresowy – mapa Poincarégo stanowi zamkniętą figurę,
- chaotyczny – występują oddzielne punkty w obszarze nazywanym czasami atraktorem mapy Poincarégo.

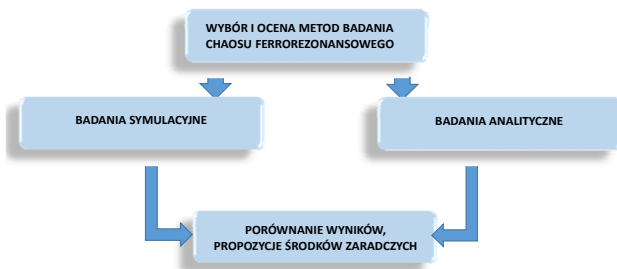
W praktyce nie ma uniwersalnej metody w tworzeniu mapy Poincarégo. Generalnie reprezentacja Poincaré może być interpretowana, jako dyskretny układ dynamiczny w przestrzeni stanu, zachowujący wiele właściwości okresowych i quasi-okresowych oryginalnego systemu.

W zasadzie nie istnieje poprawna definicja przebiegów chaotycznych, które najczęściej określa się przez przeciwieństwo zachowań typowych takich jak okresowe i/lub quasi-okresowe. Jeżeli w badanych modelach systemów występują nieliniowości związane wyłącznie z nieliniowościami rdzeni ferromagnetycznych to wymienione

drżania chaotyczne nazywane są przez praktyków chaosem ferorezonansowym [5, 6, 7].

W artykule opisano założenia, modele oraz przykładowe rezultaty badań symulacyjnych, jakie przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie MicroTran [8]. Badania stanowią kontynuację analiz prowadzonych zgodnie ze scenariuszem podanym na rysunku 1.

W artykule [9] zaprezentowano pierwszą część analizy. Opisano modele analityczne badanych układów oraz opracowano efektywne algorytmy numeryczne wyznaczania wymiarów atraktorów chaotycznych. Algorytmy te implementowane w postaci sieci neuronowych realizowanych z wykorzystaniem procesorów sygnałowych mogą być wykorzystywane do identyfikacji chaosu w układach, dla krótkich horyzontów obserwacji prądów oraz napięć w systemach.



Rys.1 Scenariusz badań chaosu ferorezonansowego.

Poniżej opisano wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych dla wybranego przykładowego układu, w którym może wystąpić zjawisko chaosu ferorezonansowego. Badano zjawisko ferorezonansu, które może powstawać w obwodach z pojemnościowymi oraz indukcyjnymi przekładnikami napięciowymi. Omówiono wybór struktury modelu oraz układu ze szczególnym uwzględnieniem prawidłowości modeli przekładników.

Wybór modelu do badania zjawiska chaosu

W sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia zjawisko ferorezonansu może wystąpić zarówno w zależności od konfiguracji układu jak i od parametrów elementów nieliniowych. Obecność przekładników napięciowych oraz wyłączników wyposażonych w kondensatory sterujące jest czynnikiem sprzyjającym powstawaniu ferorezonansu.

Istotne są tutaj parametry przekładnika napięciowego, takie jak charakterystyka magnesowania oraz zakres zmienności wartości pojemności doziemnej, pojemności wyłączników, warunki początkowe (napięcie zasilania w momencie zmiany topologii, wskutek zakłócenia lub przełączania).

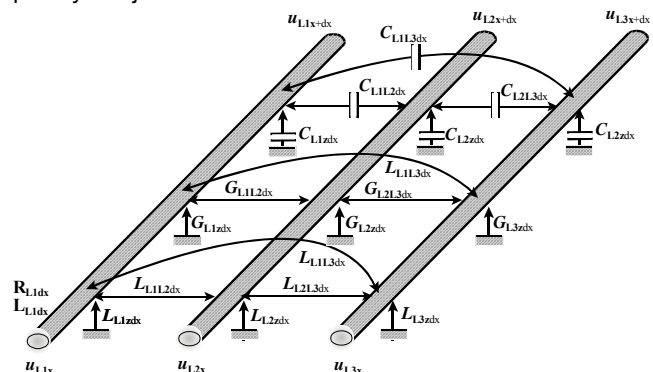
W praktyce eksploatacyjnej w celu zapobiegania wystąpienia drgań ferorezonansowych instalowane są pojemnościowe przekładniki napięciowe zamiast przekładników indukcyjnych, w których problem ferorezonansu jest eliminowany poprzez zastosowanie odpowiednich układów tłumiących podczas ich produkcji.

Niestety takie rozwiązanie może w niektórych konfiguracjach układu powodować inne niebezpieczne zjawiska. Moc bierna generowana przez pojemności linii przesyłowych jest znacznie mniejsza niż tracona na indukcyjnościach wzdłużnych. Linie przesyłowe w takich warunkach stanowią w systemie elektroenergetycznym impedancję o wypadkowym charakterze pojemnościowym. W tej sytuacji jednostronne wyłączenie linii napowietrznej o znacznej długości może powodować duży wzrost amplitudy napięcia znacznie przekraczający dopuszczalne napięcie robocze. Przepięcia łączeniowe, wywołane

nagłymi zmianami konfiguracji sieci, mają charakter silnie tłumionych szybkozmiennych przebiegów wyrównawczych o czasach trwania mieszczących się na ogół w przedziale od 10 ms do 100 ms. W niektórych ekstremalnych przypadkach maksymalne współczynniki przebiegów przy wyłączeniu linii nieobciążonej mogą osiągać wartość od 1.5 do nawet 2.5, co może stanowić istotne zagrożenie dla izolacji urządzeń zainstalowanych w sieciach wysokich napięć.

Zwolennicy instalowania przekładników pojemnościowych w liniach przesyłowych argumentują, że składowe swobodne wyższej częstotliwości zanikające szybko mogą występować dłużej w przypadku wystąpienia ferorezonansu, co w przypadku stosowania przekładników indukcyjnych może być istotnym czynnikiem. Dlatego konieczne jest każdorazowe, dla każdej konfiguracji oraz zmiennych wartości parametrów, przeprowadzenie dokładnej analizy dającej odpowiedź na pytanie czy zastąpienie przekładników pojemnościowych przekładnikami indukcyjnymi nie spowoduje niebezpieczeństwa pojawienia się zjawiska ferorezonansu w badanej linii przesyłowej.

Linia przesyłowa w rzeczywistości stanowi (jako jedyny) element układu elektroenergetycznego o parametrach równomiernie rozłożonych, w którym muszą być zastosowane odpowiednie modele i metody numeryczne. Na rysunku 2 pokazano elementarny odcinek dx linii przesyłowej.



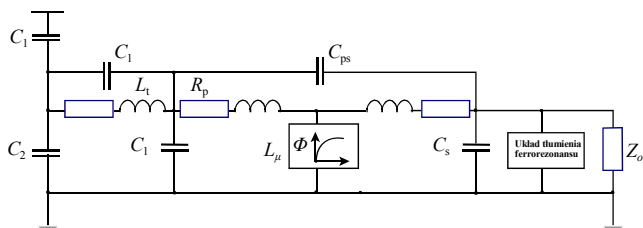
Rys.2 Model odcinka linii przesyłowej o długości dx

Struktura odwzorowania przekładnika napięciowego, zarówno pojemnościowego jak i indukcyjnego oparta jest na modelu transformatora. Istotną rolę odgrywa tutaj właściwe odwzorowanie charakterystyki nasycenia rdzenia transformatora.

Oprócz charakterystyki magnesowania, jako odwzorowania elementu nieliniowego, użytkownik programu MicroTran ma do wyboru szereg gotowych modeli transformatorów, przy czym ich wybór zależy przede wszystkim od zakresu problemów, do których modele te mają być wykorzystane. Do najczęściej wykorzystywanych należy model transformatora idealnego, reprezentującego bezstratny idealny transformator określany tylko przez jego przekładnię. Takie odwzorowanie może stanowić podstawową bazę dla bardziej złożonych modeli transformatorów, również z nieliniowościami. Model jest elastyczny i najczęściej stosowany podczas symulacji. Innym popularnym odwzorowaniem transformatora w elektroenergetyce jest tzw. STC (Saturable Transformer Component) – model jedno- lub trójfazowy, którego podstawę stanowią parametry określone dla częstotliwości podstawowej podczas zwarcia i biegu jałowego transformatora. Część rezystancyjna i indukcyjna są w tym modelu oddzielone wewnętrznie, zaś pojemności są pomijane. Wadą tego rozwiązania jest ograniczenie do obliczeń w układach z przebiegami częstotliwości do 2 kHz.

Ponadto model ten nie jest odpowiedni dla transformatorów trójfazowych. Najbardziej znanym i powszechnie wykorzystywanym modelem transformatora jest procedura BCTRAN, wykorzystująca reprezentację transformatora jedno- lub wielofazowego przy stosowaniu danych z testów zwarcowych oraz biegu jałowego transformatora.

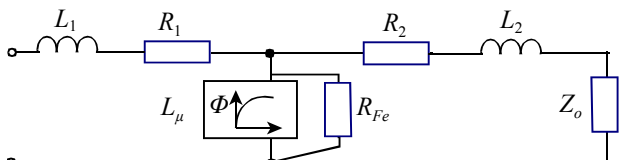
Na rysunku 3 pokazano model przekładnika napięciowego pojemnościowego. Jak widać transformator pomiarowy jest zasilany z pojemnościowego dzielnika napięciowego, dzięki czemu izolacja samego transformatora może być zbudowana na niższe napięcie niż w przekładnikach indukcyjnych. W strukturze przekładnika wyróżnić można zespół pojemnościowy, dławik kompensujący, przekładnik napięciowy pośredni oraz układ tłumienia ferorezonansu.



Rys. 3 Podstawowy model przekładnika napięciowego pojemnościowego

Konieczność tłumienia oscylacji ferorezonansowych wynika wprost z faktu, że pojemności przekładnika połączone są z nieliniową reaktancją magnesowania L_{μ} , co może powodować wytwarzanie podharmonicznych drgań ferorezonansowych.

Pokazany na rysunku 4 schemat zastępczy przekładnika napięciowego indukcyjnego jest znacznie prostszy. Błędy w przenoszeniu na stronę wtórną przekładnika sygnałów napięciowych powodowane mogą być przede wszystkim wartościami impedancji obciążenia oraz indukcyjności magnesowania L_{μ} i rezystancji strat w rdzeniu R_{Fe} .



Rys. 4 Schemat zastępczy przekładnika napięciowego indukcyjnego

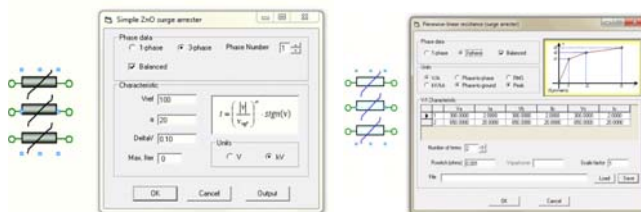
Oprócz przekładników napięciowych istotną rolę przy analizie odgrywają modele takich elementów aparatury pierwotnej jak ograniczniki przepięć oraz wyłączniki.

Szeroko stosowane w polskiej energetyce wyłączniki typu DLF, wyposażone w kondensatory sterujące potencjałem komór tych wyłączników, zamontowane są przy pomocy sztywnego połączenia równoległe do komór łączeniowych wyłączników. Na każdej z faz wyłącznika zabudowane są dwa lub cztery kondensatory, dzięki którym następuje równomierny rozkład napięcia na poszczególnych komorach, gdy wyłącznik jest wyłączony oraz łagodzenie przebiegów przejściowych w czasie operacji łączeniowych. Wyłączniki są odwzorowane za pomocą wypadkowej pojemności tych kondensatorów [9].

Modele ograniczników przepięć (odgromników), ograniczających czas trwania i częstotliwość prądów następczych, są dostępne w większości oprogramowań komputerowych, jako finalne struktury, co nie wyklucza możliwości wprowadzania własnych modeli przez użytkownika. W programie MicroTran są do dyspozycji dwa sposoby odwzorowania ogranicznika:

- za pomocą nieliniowej rezystancji,
- zbudowany z elementu nieliniowego (najczęściej ZnO).

Na rysunku 5 pokazano przykładowe formaty wprowadzania danych dla obu sposobów modelowania.



Rys. 5 Modele ogranicznika przepięć w programie MicroTran

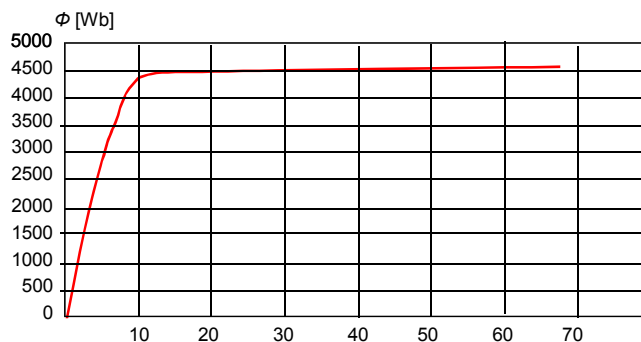
Symulacja chaosu ferorezonansowego za pomocą programu MicroTran

Modelowanie nieliniowej charakterystyki magnesowania przekładnika (transformatora) nie stanowi większego problemu dla użytkownika. Oprócz oczywistej możliwości kreowania własnej struktury modelu, w programie MicroTran są do dyspozycji dwa rodzaje modeli elementów nieliniowych:

- wykorzystanie aproksymacji odcinkowej,
- zastosowanie metody kompensacyjnej.

Przy korzystaniu z pierwszej metody występuje możliwość pojawienia się oscylacji numerycznych podczas przełączania poszczególnych odcinków charakterystyki, co powoduje konieczność wprowadzenia CDA (critical damping adjustment).

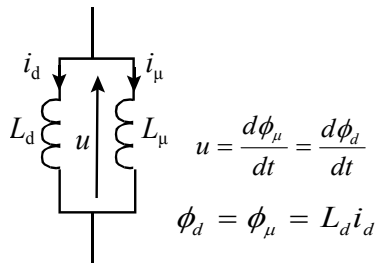
W metodzie kompensacyjnej nieliniowa indukcyjność $L(i)$ określona jest punkt po punkcie za pomocą liniowej interpolacji. Jedynym wymaganym w tej metodzie – nietrudnym do realizacji w przypadku charakterystyki magnesowania jest zapewnienie monotoniczności odwzorowywanej nieliniowości. Na rysunku 6 podano charakterystykę magnesowania badanego przekładnika $\phi_{max} = f(i_{max})$. W badaniach zastosowano aproksymację odcinkową do modelowania tej charakterystyki.



Rys. 6 Charakterystyka magnesowania przekładnika

Wymaganie prawidłowego odwzorowania zjawiska chaosu ferorezonansowego powodują jednak konieczność wykonania pewnych modyfikacji (wręcz „trików”), z uwagi na niedostępność niektórych parametrów w standardowej wersji MicroTran (generalnie w EMTP). Problem ten nie dotyczy wielkości wejściowych – można wprowadzać dane w dowolnym formacie oraz jednostkach. Analiza przebiegów wyjściowych dotyczy jednak głównie prądów, napięć, mocy, energii itd.

Dla bezpośredniej analizy strumienia magnetycznego należy, zgodnie z zasadą pokazaną na rysunku 7, „dołączyć” równoległe do indukcyjności L_{μ} element dodatkowy L_d o bardzo dużej wartości.



Rys. 7 Określenie strumienia w programie MicroTran

Podczas symulacji zjawiska chaosu problemem jest próbkowanie napięcia oraz jego pochodnej w programach „typu EMTP”. Środkiem zaradczym jest skorelowanie kroku obliczeń numerycznych oraz częstotliwości wyników w zbiorze wyjściowym tak, aby dopasować produkt wyjściowy równy jednemu okresowi 50 Hz. W tej sytuacji wybrano wartość $\Delta t = 22.22\mu s$, jako obliczeniowy krok czasowy dla symulacji układu. Dla konstrukcji mapy Poincaré’ego, wyniki symulacji były drukowane w porządku: 1 punkt na 1 okres. W ten sposób dla wybranych 5000 punktów maksymalny czas symulacji wynosi: $T_{max} = 5000 (900 \cdot 22.22 \mu s) = 99.99 s$. Procedura postępowania dla określenia diagramów bifurkacyjnych jest podobna – punkty na diagramie określane są przy częstotliwości próbkowania 50 Hz.

Zakres badań symulacyjnych ferorezonansu jest uwarunkowany uwzględnieniem wszystkich przyczyn, które powodują jego wystąpienie. W praktyce ferorezonans może zostać zainicjowany nawet przez chwilowe wprowadzenie rdzenia w nasycenie. Najczęściej powstaje wskutek:

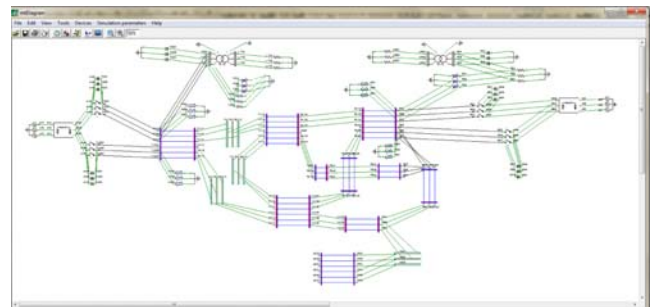
- wyłączenia linii przesyłowej o znacznej długości zasilającej nieuziemiiony transformator pracujący w stanie jałowym lub słabo obciążony,
- włączenia transformatora w stanie jałowym do linii przesyłowej wyposażonej w kompensację wzdluzną pojemnościową,
- obecności w układach przekładników napięciowych,
- realizacji automatyki SPZ szczególnie jednofazowego wywołującego w układzie zmianę rozkładu wartości indukcyjności i pojemności fazowych oraz międzyprzewodowych,
- obecności w sieci sterowników lub systemów energoelektronicznych FACTS,
- wyłączenia niepełnofazowego np. wskutek uszkodzenia wyłącznika,
- zaniku (utruty) napięcia fazowego jednej lub dwóch faz wskutek uszkodzenia bezpieczników - w układach zasilających wyposażonych w zabezpieczenia bezpiecznikowe.

Dla przeprowadzenia badań opracowano model matematyczny układu elektroenergetycznego, w którym szczególną uwagę zwrócono na dokładne odwzorowanie linii przesyłowej oraz aparatury pierwotnej.

Schemat zastępczy, reprezentujący część systemu zasilającego, może być otrzymany za pomocą różnych metod polegających na redukcji statycznej i/lub dynamicznej, poszukiwaniu struktury za pomocą odpowiednich procedur optymalizacyjnych lub po prostu założeniu określonej struktury bez żadnych warunków wstępnych. Takie uproszczone struktury są oczywiście słabo przydatne, chociaż w niektórych przypadkach (np. przy układach zewnętrznych separowanych), po dokładnej identyfikacji ich parametrów, mogą być wystarczające do prowadzenia symulacji. Niezależnie jednak od zakresu badań oraz przyjętej metody redukcji układu bądź

określenia ekwiwalentów, wyznaczone końcowe struktury zastępcze muszą mieć możliwość zmian zarówno struktury, jak i parametrów. Wynika to z faktu konieczności dostosowania się do zmieniających warunków funkcjonowania systemu zewnętrznego. Ponadto zakłócenia zewnętrzne (w układzie, który podlega zastąpieniu lub redukcji) nie mogą mieć wpływu na schemat zastępczy układu.

Na rysunku 8 pokazano kopię wejściowego graficznego zbioru danych wejściowych zapisanych w wymaganym przez program MicroTran formacie. Badania symulacyjne przeprowadzono dla różnych zaburzeń w układzie. Zaburzenia te obejmowały zarówno przerwy jak i zwarcia różnych punktach systemu. Wyniki badań symulacyjnych pomogły zidentyfikować konkretne struktury oraz różne wartości parametrów, w razie pojawienie się chaotycznych oscylacji.



Rys. 8 Topologia badanego układu przedstawiona w programie MicroTran

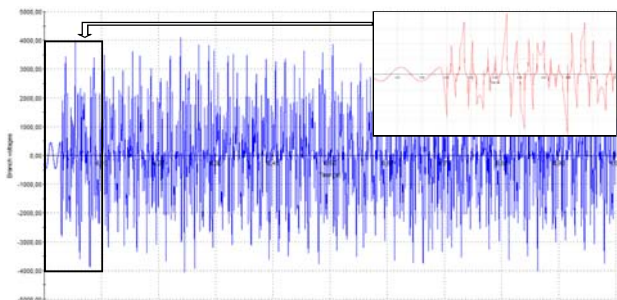
Wyniki symulacji

Wstępne badania dotyczące możliwości wystąpienia zjawiska ferorezonansu w układzie elektroenergetycznym przeprowadzono zgodnie ze scenariuszem pokazanym na rysunku 1, zarówno analitycznie jak i za pomocą symulacji komputerowej. Wyniki tych badań opublikowano w [8] oraz [10]. W badaniach tych wykorzystano zarówno program MicroTran jak i specjalizowany pakiet INSITE [11] służący do analizy nieliniowych układów dynamicznych, który umożliwił obserwację struktur oraz właściwości dynamicznych układów elektroenergetycznych. Umożliwił on również identyfikację chaosu w układzie drogą wielokrotnych, wariantowych symulacji dla różnych wartości parametrów.

Wyniki tych analiz pozwoliły na określenie wstępnych warunków do badań w złożonym systemie elektroenergetycznym. Stwierdzono m.in., że istotny wpływ mają amplitudy napięcia źródła zasilania, straty w rdzeniu transformatora, zjawiska przejściowe chaotyczne, zmiany długości linii przesyłowej oraz sposób odwzorowania charakterystyk magnesowania.

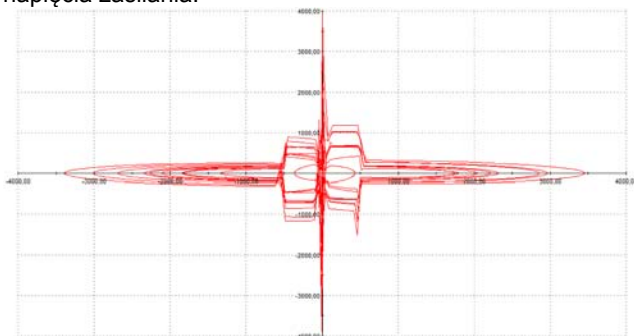
Szczególnie istotny jest moment powstania zakłócenia wywołującego ferorezonans. Na rysunku 9 pokazano przykład sytuacji, gdy zwarcie jednofazowe z ziemią występuje w chwili przejścia napięcia w fazie dotkniętej zakłóceniem przez wartość maksymalną. Napięcie na nieliniowej indukcyjności jest mocno zniekształcone, przebieg przejściowy zawiera oprócz składowej podstawowej także cały szereg komponentów harmonicznych oraz interharmonicznych, co widać wyraźnie po powiększeniu pierwszych 100 ms.

Na rysunku 10 pokazano wykres planarny strumienia magnesowania w zależności od napięcia na cewce nieliniowej, który może bardzo łatwo przyczynić się do znalezienia możliwych punktów początku chaosu w systemie.



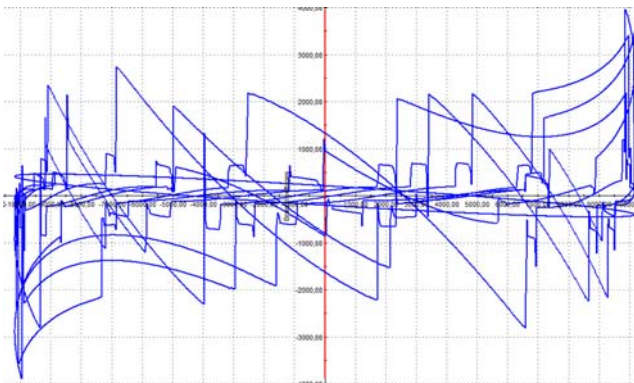
Rys. 9 Przebieg przejściowy napięcia podczas zwarcia w obwodzie z ferorezonansem

Z kolei na rysunku 11 przedstawiono wykres planarny napięcia na cewce mielinowej w zależności od zmian napięcia zasilania.



Rys. 10 Wykres planarny strumienia podczas zwarcia

Doświadczenia uzyskane podczas analizy zjawiska ferorezonansu pozwoliły na sformułowanie ekstremalnych warunków, podczas których mogą powstać sytuacje sprzyjające występowaniu chaosu ferorezonansowego.



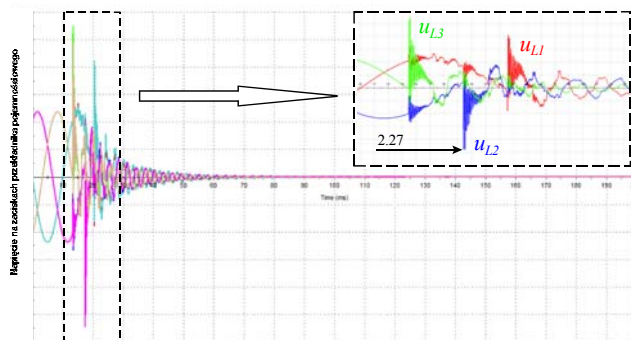
Rys. 11 Wykres planarny napięcia na nieliniowej cewce

Jak już to stwierdzono powyżej taką sytuację mogą stworzyć odłączane linie przesyłowe (400 kV) o bardzo małych obciążeniach lub nieobciążone. Moc bierna generowana przez pojemności linii przesyłowych jest znacznie mniejsza niż tracona na indukcyjnościach wzdłużnych, co powoduje, że linie przesyłowe w takich warunkach stanowią w systemie elektroenergetycznym impedancję o wypadkowym charakterze pojemnościowym. W tej sytuacji jednostronne wyłączenie linii napowietrznej o znacznej długości może powodować duży wzrost amplitudy napięcia znacznie przekraczający dopuszczalne napięcie robocze.

Z analiz modelowych wynika, że najgroźniejsze przebiegi na linii mają miejsce przy wyłączeniach niejednoczesnych linii nieobciążonej. Niejednoczesność zakłóceń łączeniowych powoduje znaczny wzrost

współczynników przebiegów w stosunku do maksymalnych, obliczonych podczas tych zakłóceń traktowanych, jako jednoczesne. Podczas analizy układów z przekładnikami pojemnościowymi stwierdzono, że składowe swobodne wyższej częstotliwości zanikające stosunkowo szybko mają istotny wpływ na wartości szczytowe napięć chwilowych po obu stronach przekładników napięciowych pojemnościowych. Ekstremalne wartości szczytowe napięcia chwilowego zanotowano na obu krańcach wyłączanej linii o znacznych krotnościach w stosunku do maksymalnego napięcia fazowego linii. Widać to wyraźnie na rysunku 12, gdzie pokazano przykładowe przebiegi przejściowe po stronie wtórnej przekładnika napięciowego pojemnościowego na początku linii o długości powyżej 250 km podczas niejednoczesnego odłączania na jej końcu.

Przebiegi przejściowe pojawiające się po stronie wtórnej przekładników napięciowych pojemnościowych są szybciej tłumione niż napięcie po stronie pierwotnej, pojawiają się jednak oscylacje będące konsekwencją składowych swobodnych wyższych częstotliwości. Nakładanie się tych składowych powoduje występowanie dużych krotności napięć po stronie wtórnej przekładników napięciowych pojemnościowych, co jednak z uwagi na wartość napięcia nie stanowi zagrożenia.



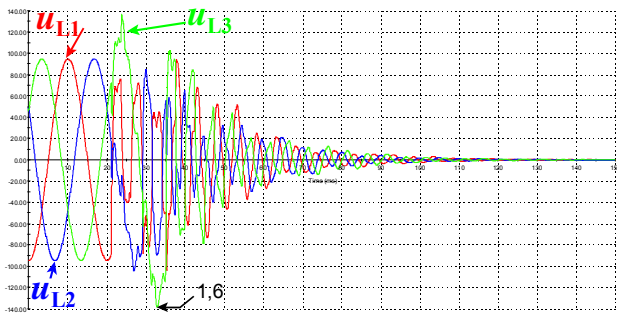
Rys. 12 Przebiegi napięć po stronie wtórnej przekładnika pojemnościowego zainstalowanego na początku linii odłączanej niejednocześnie na jej końcu

Nakładanie się składowych swobodnych powstałych po stronie pierwotnej przekładnika oraz oscylacji własnych mogą spowodować zafalszowanie sygnałów odwzorowywanych po stronie wtórnej. Dotyczy to przede wszystkim składowych swobodnych wyższej częstotliwości decydujących o amplitudzie wywołanych przebiegów. Występują również składowe swobodne niższej częstotliwości tłumiące się bardzo wolno.

Niebezpieczeństwo występowania przebiegów w układach z przekładnikami pojemnościowymi powoduje często rekomendacje ich zastąpienia za pomocą przekładników indukcyjnych. W takiej sytuacji jednak istnieje obawa czy nie spowoduje to niebezpieczeństwa pojawienia się zjawiska ferorezonansu w badanej linii przesyłowej.

Podczas badań wykazano, podobnie jak dla układów z przekładnikami pojemnościowymi, duże podskoki (chwilowe) napięcia podczas odłączania niejednoczesnego linii, jednak współczynniki przebiegów są niższe. Obecność przekładników napięciowych indukcyjnych, przez które rozładują się pojemności systemu przesyłowego jest korzystniejsza niż w przypadku zainstalowania przekładników pojemnościowych.

Przebiegi przejściowe pojawiające się po stronie pierwotnej oraz wtórnej przekładników napięciowych nie zawierają tak jak w przypadku przekładników pojemnościowych, dużych krotności napięć, co widać na przykładowych przebiegach pokazanych na rysunku 13.



Rys. 13 Przebiegi napięć po stronie wtórnej przekładnika indukcyjnego zainstalowanego na początku linii podczas niejednoczesnego zwarcia na jej końcu

Analiza obliczeniowa dla układu przesyłowego wysokich napięć wykazała, że pomimo sprzyjających warunków zjawisko ferorezonansu nie wystąpiło, pomimo symulowania ekstremalnych sytuacji – niejednoczesnego odłączania linii oraz zwarć niejednoczesnych doziemnych. Sama obecność przekładnika nie jest wystarczająca do zakwalifikowania go, jako biorącego udział w procesie ferorezonansowym. Niewątpliwie przyczyniają się do tego parametry przekładnika napięciowego indukcyjnego, który posiada znacznie wyższy punkt osiągnięcia nasycenia na charakterystyce magnesowania.

UWAGI KOŃCOWE

Celem badań było rozeznanie możliwości modelowania układu dla celów chaosu ferorezonansowego oraz rozpatrzenie uwarunkowań jego wystąpienia w systemie elektroenergetycznym

Z uwagi na nieliniowy charakter analizowanych zjawisk wnioski dotyczące omawianych przypadków nie mogą mieć jednak postaci uogólnionej.

Wnioski z każdego tego typu badań mogą być odniesione tylko do konkretnych warunków pracy układu elektroenergetycznego. Wyniki badań symulacyjnych są potwierdzeniem wyników prac nad uwarunkowaniami powstawania chaotycznej wibracji podczas zakłóceń stanów funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych stanowią potwierdzenie rezultatów pracy dotyczących możliwości powstawania drgań chaotycznych w trakcie zakłóceń stanów pracy systemu elektroenergetycznego. Analiza opisanych modeli dla różnych wersji zakłóceń winna umożliwić bardziej szczegółowe określenie rodzaju zakłóceń i zakresu parametrów systemu warunkujących wystąpienie chaosu.

Program MicroTran stanowi nowoczesne narzędzie, które nie wymaga stosowania specjalnych zabiegów dla przystosowywania danych badanego układu do wymaganego przez oprogramowanie formatu. Wyniki symulacji potwierdzają jego przydatność do analiz przebiegów chaotycznych, po zastosowaniu odpowiednich zabiegów opisanych w artykule.

Rekomendacje wynikające z rezultatów badań stanowią mogą podstawę do stworzenia procedur postępowania podczas planowania rozwoju systemu elektroenergetycznego, również w zakresie przyłączania nowych odbiorów do istniejących struktur zmieniających w istotny sposób warunki pracy badanego układu.

Dzięki temu można zapobiec wielu konsekwencjom zjawisk przejściowych w systemie elektroenergetycznym, których powodem może być chaos ferorezonansowy.

LITERATURA

- [1] J. Bethenod, "Sur le transformateur à résonance," L'Éclairage Électrique, vol. 53, pp. 289–96, Nov. 1907.
- [2] P. Boucherot, "Éxistence de deux régimes en ferorezonance," Rev. Gen. de L'Élec., vol. 8, no. 24, pp. 827–828, Dec. 1920.
- [3] R. Rudenberg, Transient Performance of Electric Power Systems. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1950, ch. 48.
- [4] C. Hayashi, Nonlinear Oscillations in Physical Systems. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1964.
- [5] S. Mozaffari, S. Henschel, and A.C. Soudack, "Chaotic ferorezonance in power transformers," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 142, pp. 247–250, May 1995.
- [6] Z. Emin, B.A.T. Al Zahawi, D.W. Auckland and Y.K. Tong, "Ferorezonance in electromagnetic voltage transformers: a study based on nonlinear dynamics," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 144, pp. 383–387, July 1997.
- [7] S. Mozaffari, M. Sameti, and A.C. Soudack, "Effect of initial conditions of chaotic ferorezonance in power transformers," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 144, pp. 456–460, Sept. 1997.
- [8] MicroTran, Transients Analysis Program for Personal Computers, MicroTran Power System Analysis Corporation, Published, June 1991, Vancouver, B.C., Kanada
- [8] P. Sowa, K. Łuszcz: Chaotic behavior in a power system following ferorezonance, Proceedings of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013, s. 79–82
- [9] D. Povh et. all: Modelling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients, IEEE Trans. on PD., vol. 11, pp. 2028–2035, No. 4, 1996.
- [10] P. Sowa, J. Walczak, M. Pasko: Evaluation of the Influence of the Chaos Ferorezonance in Transformer on the Power System Work Conditions, Proceedings of the Melecon'98, 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, IEEE Tel Aviv, Israel, Vol. II, pp. 1126–1130.
- [11] Parker T.S.: *Practical Numerical Algorithms for Chaos Systems*. Springer. New York, 1989.
- [12] Nusse E.H., Yorke J. A.: *Dynamics: Numerical explorations*. New York, Spribger-Verlag, 1997.
- [13] Wiggins S.: *Introduction to applied nonlinear system and chaos*. Text in App. Math., No 2. New York, Springer, 1990

Autorzy: mgr inż. Katarzyna Łuszcz, Instytut elektroenergetyki i sterowania układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Katarzyna.Luszcz@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Paweł Sowa, Instytut elektroenergetyki i sterowania układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Pawel.Sowa@polsl.pl.