

Problemy i dokładności modelowania nieliniowości rdzenia transformatora energetycznego w środowisku Simulink: badania symulacyjno-eksperymentalne

Streszczenie. W artykule zaproponowano metodykę wypracowania modelu nieliniowości rdzenia transformatora w środowisku Simulink/SimPowerSystems w oparciu o eksperymentalnie wyznaczone pętle histerezy i pierwotne krzywe magnesowania realnego transformatora. Zweryfikowano jakość takiego modelu poprzez odniesienie wyników symulacji zachowania się transformatora w różnych scenariuszach obwodowych do wyników obserwacji realnego obiektu.

Abstract. In the paper the method for Simulink/SimPowerSystems nonlinear core transformer model parameterization based on real transformer core data observations is proposed. The quality of such a model was verified through comparison of simulated and real transformer behavior observations in different circuit scenarios. **The method for Simulink/SimPowerSystems nonlinear core transformer model parameterization based on real transformer core data observations**

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, nieliniowy rdzeń, histereza, symulacje

Keywords: power transformer, nonlinear core, hysteresis, simulations

doi:10.12915/pe.2014.08.52

Wstęp

Transformatory eksploatowane w typowych warunkach obciążenia tylko nieznacznie manifestują obecność rdzenia i związaną z nim indukcyjność główną. W przypadku transformatorów energetycznych względy praktyczne wymuszają pracę transformatorów w warunkach znamionowych z lekkim nasyceniem rdzenia, co powoduje pojawienie się odkształconych prądów po jego stronie pierwotnej (dystrybutora). Podstawowa harmoniczna prądu magnesującego (50 Hz w warunkach europejskich) jest zazwyczaj mało zauważalna na tle znacząco wyższych wartości prądów przenoszących energię od dystrybutora do odbiorcy. Obecność komponentów harmonicznych prądu magnesującego są wyraźniej obserwowalna, zwłaszcza w konfiguracjach sieci sprzyjających występowaniu rezonansów napięciowych. Należy jednak zaznaczyć, że głównym źródłem występowania harmonicznych w sieci są prądy odkształcone wywołane nieliniowością odbiorników a nie prądy magnesujące transformatorów. Tak więc w warunkach normalnej pracy sieci elektroenergetycznej obecność rdzenia jest mało zauważalna.

Gwałtowne rozłączenia obwodów zmieniają ten spokojny stan pracy transformatora, doprowadzając do niebezpiecznych przepięć związanych z przerwaniem przepływu relatywnie małego prądu magnesującego. W standardowych warunkach pracy systemu energetycznego istnieją w nim elementy pojemnościowe, związane z kompensacją mocy biernej, co w takich warunkach doprowadza do powstania rezonansów. W szczególnych warunkach słabego dociążenia systemu w rezonansach takich obserwowana jest nieliniowość rdzenia, manifestowana jako zjawisko ferorezonansu od lat 30-tych szeroko omawiane w literaturze [1][2][3] i niebezpieczne dla współużytkowników sieci. Badanie zjawiska ferorezonansu wymaga znajomości nieliniowości rdzenia transformatora i, z uwagi na trudność eksperymentowania na żywej sieci, jest realizowane zazwyczaj przy silnym wsparciu symulacjami. Dobra jakość modelowania nieliniowości transformatora jest warunkiem niezbędnym prowadzenia realistycznych i wiarygodnych symulacji. W artykule omawiane są problemy wypracowania dobrego modelu transformatora w popularnym środowisku Simulink/SimPowerSystems i przeprowadzona ocena jego jakości poprzez odniesienie zachowania się obiektu realnego i symulowanego w różnych konfiguracjach układowych.

1. Wprowadzenie

Przedmiotem badań są dwa trójfazowe transformatory energetyczne niskiego napięcia o mocy 5 kVA (230>130V). Relatywnie małe wartości mocy i niskie napięcia pracy tych transformatorów nie stwarzają problemów przy realizacji eksperymentu z ich użyciem, bezpiecznego zarówno dla transformatora jak i obsługi. Eksperyment dotyczy jednak transformatora energetycznego (nie laboratoryjnego), co nadaje mu aspekt praktyczny i pozwala uogólniać obserwacje i traktować wyniki jako miarodajne dla opisu najbardziej popularnych transformatorów SN/nN o mocach kilkudziesięciu/kilkust kVA.

Badane są konfiguracje wyłącznie jednofazowe. Podejście takie jest zasadne z uwagi na powszechną tendencję do traktowania transformatora trójfazowego jako trzech niezależnie zasilanych jednostek jednofazowych [4][5][6]. Ułatwia to analizę i modelowanie zjawisk bez znaczącej rozbieżności wyników w stosunku obserwacji (realny transformator ma zazwyczaj sprzężenia międzyfazowe wynikające z konstrukcji rdzenia), dla większości praktycznych zastosowań.

Prezentowane badania eksperymentalne mają charakter identyfikacyjny i weryfikacyjny. Obydwie grupy badań obiektowych są dodatkowo weryfikowane eksperymentem symulacyjnym. Badania identyfikacyjne służą do wyznaczenia parametrów rdzenia - koncentrują się na określeniu pętli histerezy i bazują na testach biegu jałowego transformatora. Badania weryfikacyjne dotyczą wymuszanego ferorezonansu, w którym weryfikowana jest prawidłowość identyfikacji parametrów rdzenia. Badania symulacyjne mają na celu wypracowanie modelu transformatora zachowującego się prawidłowo w symulowanych testach identyfikacyjnych i weryfikacyjnych. Modelowanie realizowane jest w środowisku SimPowerSystems Matlab/Simulink.

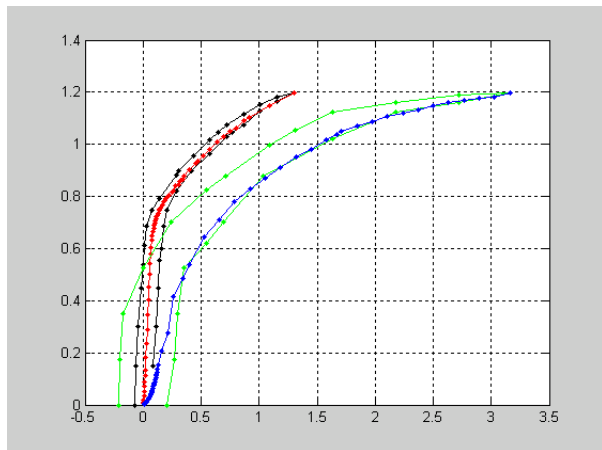
2. Obiekty i metoda badań

Badane transformatory były przedmiotem publikacji [7]. Prezentowane tam wyniki uzupełniają obraz obiektu (transformator), dotyczą jednak innej grupy jego parametrów (zastępczy model częstotliwościowy) niż omawiane w niniejszym artykule. Publikacje te stanowią więc bezpośrednie uzupełnienie niniejszej publikacji, które może być wartościowe dla pewnej grupy Czytelników.

Jeśli chodzi o parametry rdzenia to dwa omawiane transformatory są ciekawe z uwagi na tę samą moc znamionową, ale inne technologie ich wytwarzania: jeden z lat 50-tych ma relatywnie starą blachę, nowszy z lat 90-tych bardziej współczesną. Bezpośrednim skutkiem rozwoju technologii jest rozmiar i masa transformatora: 1m3/100kg i 0.3m3/20kg odpowiednio dla starszej i nowszej konstrukcji.

Przyjęta metoda badań identyfikacyjnych bazuje na testach stanu jałowego. Wykonywane są one przy częstotliwości znamionowej (50Hz) dla szerokiego zakresu amplitudowego pobudzeń, doprowadzających do znacznego nasycenia rdzenia. Z uwagi na fizykę zjawisk magnesowania i zalecenia normalizacyjne prowadzenia badań [8] testy stanu jałowego są realizowane w wydaniu podstawowym, gdzie parametry rdzenia są opisywane jako relacje pomiędzy amplitudą prądu uzwojenia pobudzającego a wartością skuteczną napięcia wtórnego o przebiegu sinusoidalnym. Prezentacja wyników w takiej postaci ma również miejsce przy podawaniu fabrycznych parametrów blach elektrotechnicznych [9], co pozwala odnieść prezentowane wyniki do pochodzących z innych źródeł.

Przy testach wykorzystywane były relatywnie sztywne (niskoimpedancyjne) źródła napięcia ustawianego (nie regulowanego) poprzez różne warianty połączeń uzwojeń pierwotnych i wtórnych transformatora trójfazowego 230/130/130 (two windings transformer w nomenklaturze SimPowersystems). Alternatywne pomiary realizowano korzystając z autotransformatora (U_{wyj} do 280V, I_{max} 10A), uzyskując te same wyniki. Znaczne wartości szczytowe prądów podczas testów (przekraczające prąd znamionowy) oraz zasilanie z żywej sieci elektroenergetycznej powodują, że przebiegi napięcia w testach są lekko odkształcone. Z uwagi na całkowanie napięcia przy przetwarzaniu na strumień takie niewielkie odkształcenia przebiegu napięcia zostały uznane za nieistotne¹.



Rys . 1. Pętla histerezy przy $E_1= 280V_{rms}/50Hz$ i odpowiednie amplitudowe krzywe magnesowania rdzeni dwóch transformatorów zmierzone w stanie jałowym ($\times 0,5A/dz$)

W badaniach pełniejszych, dla każdego z ustawień poziomu napięcia zasilającego był wyznaczany pełny obieg pętli histerezy rdzenia, poprzez stosowne przetwarzanie numeryczne zarejestrowanych przebiegów czasowych prądu i napięcia. Obserwacje prądu i napięcia realizowane były przy wykorzystaniu szerokopasmowych przetworników

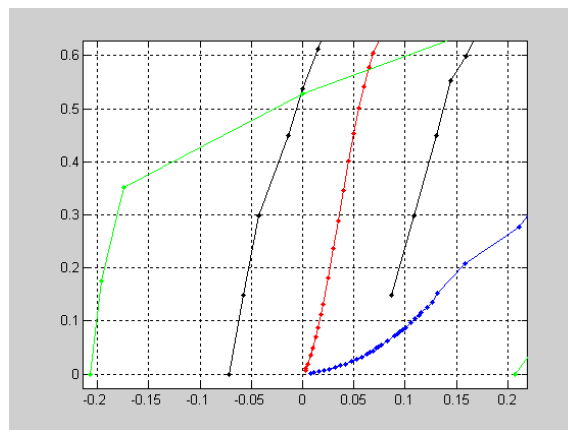
¹ łatwo wykazać, (z uwagi na w/w całkowanie), że dla stanu ustalonego wartością normalizującą przy występowaniu odkształceń jest wartość średnia napięcia liczona za pół okresu (10ms) - dla omawianych warunków realizacji eksperymentu odbiega ona nieznacznie (z dokładnością na poziomie %) od wartości teoretycznej $2 \cdot \pi \cdot A / \sqrt{2}$

pierwotnych (100 kHz prąd / 1 MHz napięcie) i oscyloskopu cyfrowego.

Na rys. 1 i 2 przedstawiono zmierzone pętle histerezy przy relatywnie dużej wartości napięcia zasilania $280V_{rms}$ (dla uzwojenia 220V) dla obydwu transformatorów wraz z naniesionymi przebiegami amplitudowej krzywej magnesowania uzyskanymi przy zmianach tego napięcia w zakresie 0- $280V_{rms}$.

Punktami zaznaczono dane pomiarowe - gładkie krzywe wynikowe uwiarygodniają pomiar, choć nie dowodzą jego pełnej poprawności. Nowy rdzeń ma węższą i bardziej stromą pętlę histerezy (czarna linia).

Na rys. 2 wyraźniej widać szczegóły krzywych w obszarze niskich napięć zasilających, związane ze zmianą kształtu pętli histerezy i orientacji (elipsa, mniejsza stromość), skutkujące zmianą zastępczej przenikalności rdzenia (indukcyjności zastępczej) dla małych wartości natężenia pola magnesującego.



Rys. 2. Szczegóły zobrazowania z rys.1 w obszarze małych wartości natężenia pola magnesującego ($\times 0,05A/dz$).

Problemem przy porównywaniu właściwości rdzeni dwóch różnych rozwiązań transformatorów jest skalowanie wyników obserwacji. Brak danych konstrukcyjnych transformatora oraz wątpliwa potrzeba porównywania danych materiałowych rdzeni powodują, że wygodne jest skalowanie osi wartościami obwodowymi (prąd i napięcie). O ile nie opisano, w kolejnych rysunkach oś x skalowana jest w wartościach szczytowych prądu, oś y w wartościach skutecznego napięcia odniesionego do warunków znamionowych ($230V_{rms}$).

Przedstawione powyżej pomiary pokazują, że obydwa transformatory (projektowane na "stare" napięcie sieci 220V) pracują w obecnie definiowanych warunkach znamionowych (230V) z lekkim nasyceniem rdzenia przy prądach szczytowych stanu jałowego rzędu 0.5 i 1.5A. Dane cyfrowe opisujące rdzeń zgodnie z rys 1 i 2 stanowią punkt wyjścia do modelowania nieliniowości transformatora (w środowisku Matlab/Simulink) i badań dokładności modelu opisanych w rozdz. 4.

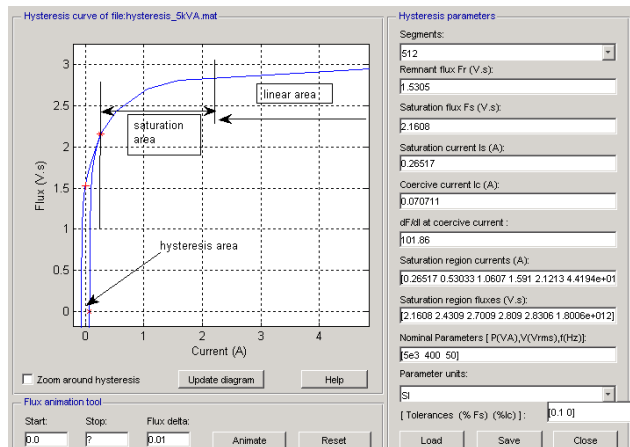
W modelu nieliniowym transformatora środowiska SimPowerSystems, w wersji minimalnej, konieczne jest wprowadzenie krzywej magnesowania w postaci dwuwymiarowego wektora (strumień magnetyczny w funkcji prądu - saturation characteristics).

W wersji rozbudowanej wymagane jest podanie informacji o pętli histerezy w postaci złożonej struktury zarządzanej przez specjalizowane narzędzie programowe Hysteresis Design Tool (rys. 3).

Uaktywnienie opisu "pętlowego" wyłącza dostęp do krzywej - oznacza to, że w opisie pętli HDT oprócz obszaru bezpośrednio z nią związanego definiowany jest obszar bezstratnej nieliniowości rozszerzany automatycznie przez

obszar liniowy przy przekroczeniu formalnie podanych punktów granicznych pętli² (rys. 3).

Wybór modelu nieliniowości (krzywa/pętla) realizowany jest w nastawach głównych parametrów transformatora poprzez stosowne pola wyboru (tu nie pokazywane). Dobrą praktyką jest równoległe korzystanie z kompatybilnych opisów obydwo nieliniowości, pozwala to bezpośrednio testować przydatność obydwu sposobów modelowania nieliniowości - modelowanie pełnej nieliniowości (pętla) znacznie obciąża procesor i nie zawsze jest potrzebne, a przełączenia modelu pętla/krzywa natychmiastowe.



Rys. 3. Kompletny kształt krzywej magnesowania z fragmentem realizowanym jako pętla histerezy wykorzystywany w rozbudowanym, histerezowym modelu nieliniowości rdzenia.

Wykorzystanie HDT do wytworzenia opisu rdzenia odpowiadającego danym pomiarowym (rys. 1 i 2) omówiono w kolejnym rozdziale. Formalnie sama pętla jest sparametryzowana, a jej generacja oparta o dane trzech punktów charakterystycznych wprowadzanych do HDT (pola 2-6, czerwone gwiazdki na rys. 3) - mimo tak prostej parametryzacji uzyskanie poprawnego kształtu pętli wprowadzanej do modelu nie jest trywialne (patrz następny rozdział).

Zasadnicza część referatu dotyczy badań dokładności modelu w odtwarzaniu realiów obwodowych (i pomiarowych), w których manifestowana jest nieliniowość transformatora. Prawidłowe sparametryzowanie modelu transformatora jest warunkiem koniecznym, ale nie wystarczającym, dobrej symulacji. Wiarygodność symulacji związana jest zazwyczaj z wieloma nastawami procedur numerycznych używanych przez oprogramowanie symulacyjne, a przekonanie o jej poprawności w konkretnym zastosowaniu warunkiem niezbędnym prowadzenia prac badawczych nawiązujących i objaśniających eksperyment pomiarowy³.

Jako materiał referencyjny do symulacji wykorzystano obserwację realnego transformatora w warunkach ustalonych przy znacznym przekraczaniu poziomu wartości

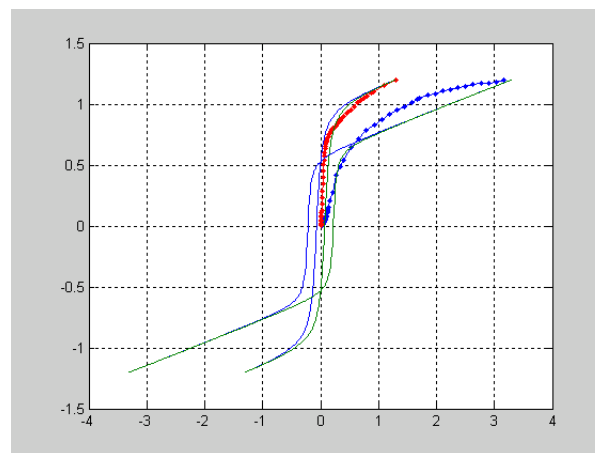
² współrzędne punktów pętli nie są wystarczająca do zamodelowania transformatora - struktura opisująca pętlę wykorzystywaną przez model wzbogacana jest o szereg parametrów dotyczących jej wykorzystania, jednym z bardziej istotnych funkcjonalnie jest tolerancja błędów odtwarzania pętli przez oprogramowanie symulacyjne.

³ Czytelnicy praktycznie wykorzystujący symulacje w zaawansowanym wydaniu zazwyczaj borykają się z problemami zbieżności i wiarygodności symulacji realizowanych w racjonalnie krótkim czasie, nawet przy korzystaniu z wydajnych maszyn cyfrowych

nominalnych prądu i napięcia, oraz w warunkach dynamicznych przy wymuszonym ferorezonansie rozładującym energię zgromadzoną w rdzeniu (pobudzenie dc) w obwodzie rezonansowym: jedno z uzwojeń rdzenia-kondensator. Swobodne, samoistnie zanikające oscylacje takiego nieliniowego obwodu lepiej testują model niż obserwacje stanu ustalonego (rozdz. 4).

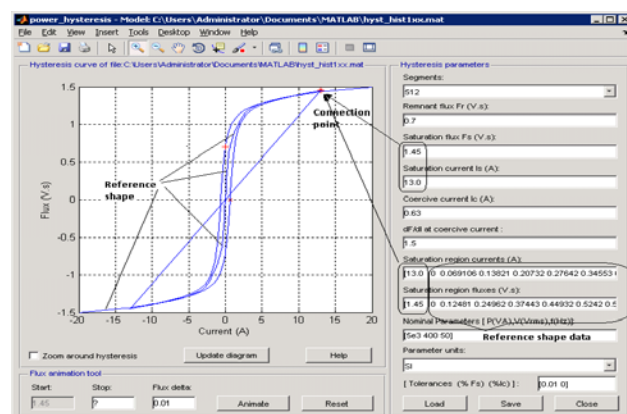
3. Edycja modelu pętli histerezy transformatora

Jak wspomniano do edycji struktury opisującej pętlę histerezy konieczne jest wykorzystanie HDT. We wstępnej fazie jako parametry pętli (na rys. 3) należy wprowadzić cztery parametry odczytane z obserwacji rdzenia (rys. 1). Dla przypadku rdzeni z rys 1 i 2 wprowadzenie parametrów (pola 2-6 rys. 3) o wartościach: stary - 10, 0.2, 0.53, 3.3/1.2, nowy - 10, 0.07, 0.54, 1.3/1.2 daje w miarę poprawny obraz pętli nowego transformatora i niewłaściwy starego (rys. 4). Potwierdza to oczekiwanie, że nowoczesny software lepiej pasuje do nowszego hardware.



Rys. 4. Bezpośrednio sparametryzowane pętli histerezy starego i nowego rdzenia transformatora.

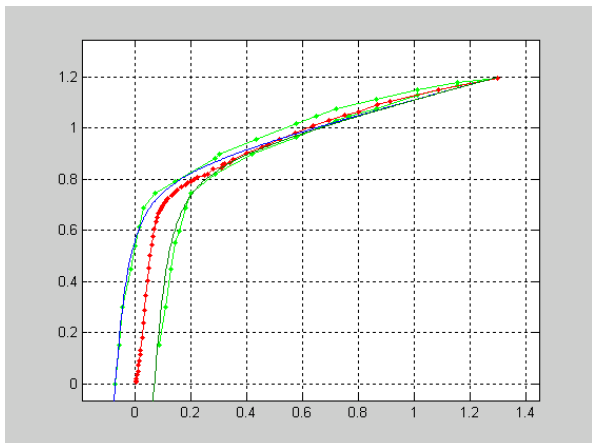
Dalsze korekty modelowej krzywej są utrudnione ze względu na brak danych referencyjnych w grafice HDT.



Rys. 5. Metodyka wzbogacania HDT o krzywą referencyjną.

Dane takie łatwo wprowadzić definiując krzywą nasycenia - formalnie musi mieć on startowy punkt wspólny z pętlą (rys. 5), co łatwo uzyskać wprowadzając stosowne współrzędne punktu startowego. Pozostałe punkty obszaru nasycenia mogą lokować go w obszarze objętym pętlą (zgodnie z przebiegiem krzywej magnesowania), co tworzy wirtualną niepoprawną pętlę przedłużoną referencyjnym obrazem docelowej charakterystyki (rys. 5). Taka metoda tworzenia wirtualnej charakterystyki ułatwia znacznie korzystanie z HDT przy dostrajaniu modelu do obiektu. Przed jego wykorzystaniem należy usunąć elementy wirtualizujące z pól 7 i 8 definiujących region nasycenia.

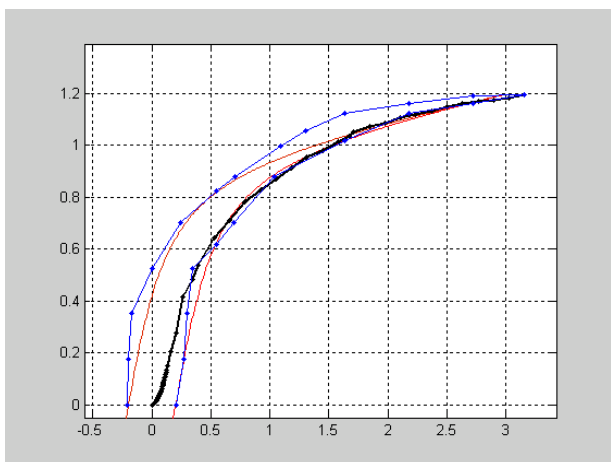
W skrajnie trudnych przypadkach korzystne jest sztuczne zawężenie, bądź rezygnacja z obszaru objętego pętlą - pozwala to swobodnie kształtować nieliniowość rdzenia jako bezstratny fragment charakterystyki. Z uwagi na obecność rezystancji strat R_m w każdym z modeli można zazwyczaj doprowadzić do satysfakcjonującego odwzorowania właściwości rdzenia w każdym z praktycznych przypadków. Opisana powyżej procedura, nie ciekawa z poznawczego punktu widzenia, ma bardzo duże znaczenie użytkowe i jest przydatna dla praktyków, stąd tak dokładnie została przedstawiona.



Rys.

6. Dane pomiarowe i zamodelowana pętla w HDT dla nowego transformatora.

Poprawione w opisany sposób modele charakterystyk rdzeni dwóch transformatorów przedstawia rys. 6 i 7. Ewidencja rozbieżność charakterystyk pojawia się w stanie nasycenia - realne pętla są w tym obszarze szersze.



Ry

s. 7. Dane pomiarowe i zamodelowana pętla w HDT dla starego transformatora.

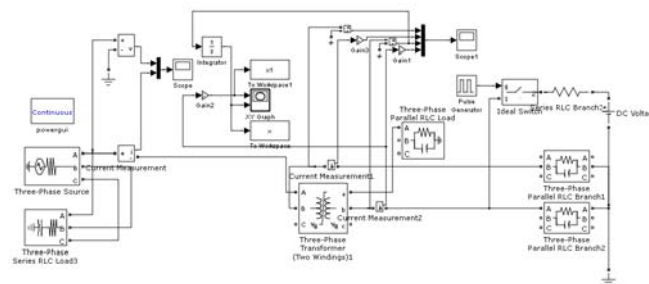
Przedstawione wyniki pokazują na ile elastyczne jest narzędzie HDT w edytowaniu realnej pętli histerezy i na ile dokładnie pozwala ono taką pętlę określić. Finalne projekty z rys. 6 i 7 nie są optymalne i zapewne mogą być nieznacznie ulepszone po zmuszeniu i mało interesującym dalszym dostrajaniu charakterystyk.

4. Badania obwodowe

Transformator opisany powyżej testowany był symulacyjnie i eksperymentalnie w obwodach o strukturze przedstawionej na rysunku 8.

Realizowano testy statyczne w warunkach pracy jałowej transformatora, zasilając go napięciem $280 V_{rms}$ przekraczającym napięcie nominalne. Testy takie realizuje lewa część obwodu z rys 8, zarejestrowane sygnały prądu i

scalałowanego napięcia pozwalają wyznaczyć robocze pętle histerezy dla lekkiego stanu nasycenia rdzenia prezentowane na rys. 1, 6 i 7.

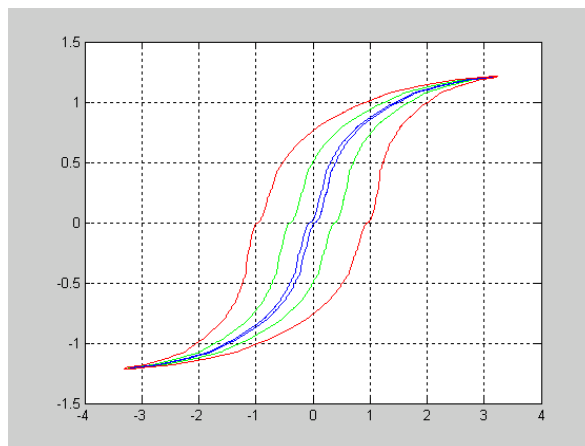


Rys. 8. Struktura obwodu używanego w testach rzeczywistego transformatora i jego modelu.

Testy dynamiczne dotyczyły obserwacji ferorezonansu wymuszanego poprzez zrywanie prądu wprowadzanego do jednego z uzwojeń (źródło DC, rezystor i klucz w górnej prawej części rys. 8). Prąd przejmowany jest przez pojemności włączone równolegle do uzwojenia pierwotnego i wtórnego (obciążenia trójfazowe w prawej dolnej części rysunku) i wyłumiany poprzez ferorezonans w oczku z dominującą pojemnością. We wszystkich eksperymentach z rezonansem (symulowanych i realnych) tylko jedno z uzwojeń (pierwotne lub wtórne) tworzyło dominujący rezonans. Pojemność wtrącana w nierzonującą gałąź była ok. 100 krotnie mniejsza i miała znaczenie "kosmetyczne" - jej zadaniem było zabezpieczenie przed przepięciami (w realnym obiekcie) i niestabilnością symulacji (w obiekcie symulowanym).

4.1. Testy w stanie ustalonym

Testy transformatora w stanie ustalonym w zasadzie powielały testy identyfikacyjne. Dotyczyły one weryfikacji kształtu pętli histerezy obserwowanej w obwodzie (pętli „sygnalowej” - uzyskanej z obserwacji obwodowych). Z uwagi na to, że taka obserwowana pętla histerezy zawiera skumulowaną informację o prądzie i napięciu i ma czytelne znaczenie fizyczne zrezygnowano z prezentacji przebiegów czasowych sygnałów.

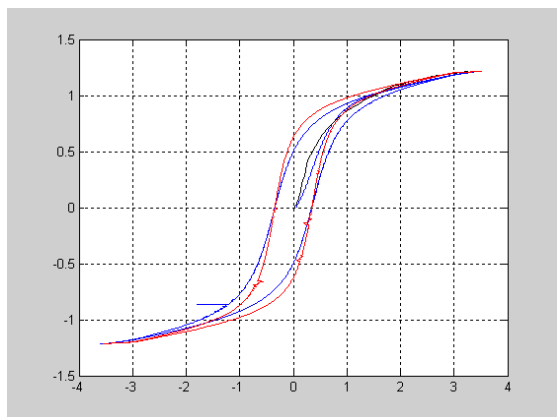


Rys. 9. Zestaw obserwowanych pętli histerezy w prostym (krzywa magnesowania) modelu nieliniowości transformatora dla trzech nastaw rezystancji strat R_m : 10k Ω , 1k Ω i 400 Ω .

Pętla realnego obiektu prezentowane są na rys. 1 i 2. Na rys. 9 przedstawiono pętla symulowanego transformatora bez wprowadzonej pętli histerezy z ustawieniem wyłącznie nieliniowości rdzenia opisanej przez krzywą magnesowania (z rys. 1) i zmienianą stratność. Jak wcześniej wspomniano każdy z modeli transformatora (krzywa/pętla) korzysta z

liniowej rezystancji strat rdzenia (R_m) zadawanej w jednym z pól konfiguracyjnych. W tym przypadku wyłącznie jej wartość wpływa na szerokość obserwowanej pętli zgodnie z rys. 8. Dla nastawy $R_m=10k$ rdzeń jest praktycznie bezstratny, nastawa rzędu $1k\Omega$ oddaje oczekiwany kształt pętli i może być uznana za prawidłową dla opisu realnego obiektu (rys. 1). W każdym z przypadków obserwowane jest nienaturalne, łatwe do skorygowania przegięcie pętli dla zerowej wartości strumienia, wynikające z kształtu pierwotnej krzywej magnesowania (rys. 2).

Na rys. 10 przedstawiono pętle realizowane przez histerzowe modelowanie nieliniowości rdzenia (z wykorzystaniem HDT) dla dwóch pętli nieznacznie różniących się kształtem. Obserwowane pętle idealnie odpowiadają danym projektowym (porównaj rys. 7 i 10). Nieznaczna różnica w kształcie pętli z obserwacji statycznych jest wyraźniej widoczna w badaniach dynamicznych (rozdz. 4.2).



Rys. 10 Pętle histerezy w złożonym (histereza) modelu nieliniowości transformatora, dwa warianty pętli.

4.2. Testy w stanie nieustalonym

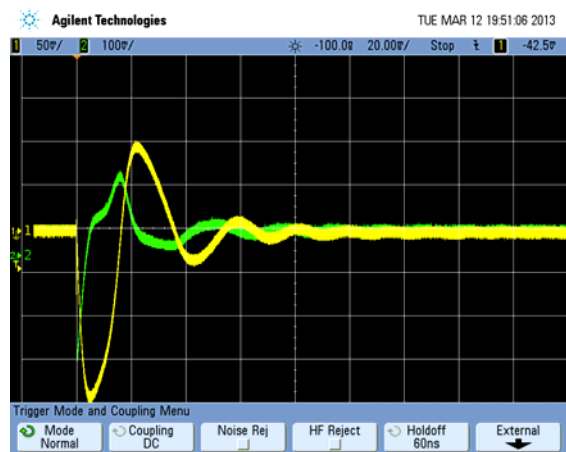
Opisy wyników obserwacji ferorezonansu z braku miejsca dotyczą wyłącznie jednego (z wielu realizowanych) scenariuszy obwodowych, w których rezonans realizowany jest na jednym z uzwojeń strony wtórnej starego transformatora z pojemnością $75\mu F$. Wybór ten dotyczy relatywnie trudnego przypadku materiału rdzenia o starej technologii, stwarzającego trudności zamodelowania pętli.

4.2.1. Badania eksperymentalne obiektu fizycznego

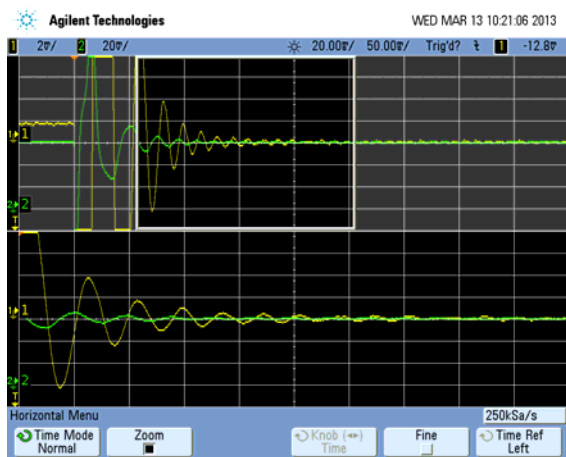
Wyniki obserwacji zjawiska ferorezonansu w obiekcie fizycznym przedstawiają rys. 11 i 12. Przebiegi są odpowiedzią obwodu na zerwanie prądu $3A$ - wtórne uzwojenie nieobciążonego transformatora rezonuje z kondensatorem $75\mu F$ (rys. 8). Napięcie w pierwszym szczycie osiąga wartość $100V$, odkształcony i tłumiony prąd świadczy o zanikającym nasyceniu rdzenia. Obserwowany jest wzrost częstotliwości i zmniejszanie odkształceń prądu i napięcia z upływem czasu, co potwierdza rysunek 12. Kolejne okresy mierzone w dolnych szczytach przebiegu napięciowego przyjmują wartości $38, 20, 17, 16$ i 15 ms dla stanów niskopoziomowych, co świadczy o dynamicznej zmianie indukcyjności zastępczej rdzenia.

Podczas ferorezonansu demonstrowane są w zasadzie wszystkie właściwości rdzenia (i opisującej go pętli histerezy), stąd stanowi on dobry obiekt referencyjny dla badań symulacyjnych.

W badaniach statycznych pętli histerezy testowane jest zachowanie rdzenia dla sinusoidalnego wymuszenia napięciowego o ustalonej częstotliwości. Ferorezonans, poprzez możliwość wymiany kondensatora i swobodne przebiegi oscylacyjne obejmuje stany dynamicznej pracy rdzenia, co stanowi o jego dużej sile testującej.



Rys. 11. Oscylogram prądu i napięcia podczas ferorezonansu: napięcie - kanał 1; $25V/dz$, prąd - kanał 2; $1A/dz$.



Rys. 12. Detale przebiegów z rys. 10: napięcie - kanał 1, prąd - kanał 2.

4.2.2. Badania symulacyjne

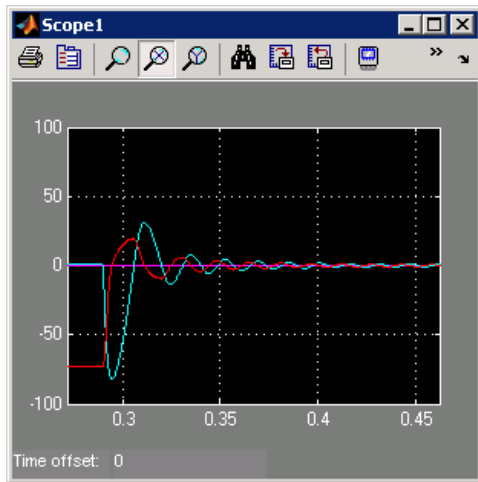
Na kolejnych rysunkach przedstawiono oscylogramy uzyskane z pakietu symulacyjnego (rys. 12 do 14) dla trzech wariantów modelowania nieliniowości rdzenia. Skala osi wszystkich zobrazowań jest identyczna i równa nastawom zobrazowania realnego obiektu z rys. 10. Pozwala to na bezpośrednie porównanie rys. 10, 12, 13 i 14.

Dwa pierwsze przebiegi (rys. 12 i 13) uzyskano dla modeli wykorzystujących pętle histerezy prezentowane na rys. 10. Przypadek z rys. 12 dotyczy pętli o większej stromości (czerwona pętla z rys. 10) która najlepiej oddaje wyniki obserwacji zjawiska w obiekcie rzeczywistym (rys. 10, 11). Mniej wyraźna deformacja prądu na początku pobudzenia wynika z bardziej gładkich pętli symulowanych w stosunku do realnych (porównaj rys. 7 i 10).

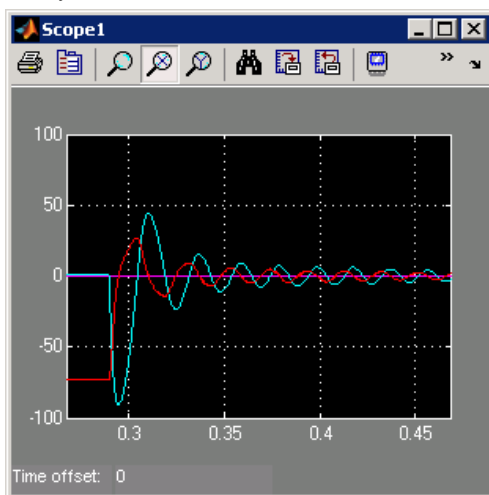
Mimo nieznacznych rozbieżności przebiegów obydwie symulacje dobrze opisują zachowanie się realnego obiektu, co potwierdza poprawność zaproponowanej metodyki wypracowywania modelu nieliniowego rdzenia transformatora.

Na kolejnym rysunku (rys. 14) pokazano przebiegi dla modelu nieliniowego rdzenia nie korzystającego z pętli histerezy. Nieliniowość wprowadzono korzystając z krzywej magnesowania z rys. 1, zapewniając stratność przez ustawienie równoległej rezystancji zastępczej rdzenia na wartość 1000Ω , co doprowadza do realizacji zastępczej pętli przedstawionej na rys. 9 (przebieg środkowy - zielony). Takie bezpośrednie wykorzystanie krzywej magnesowania nie ma umocowania fizycznego, stąd pętla wykazuje nieprawidłowe przegięcie dla małych wartości strumienia

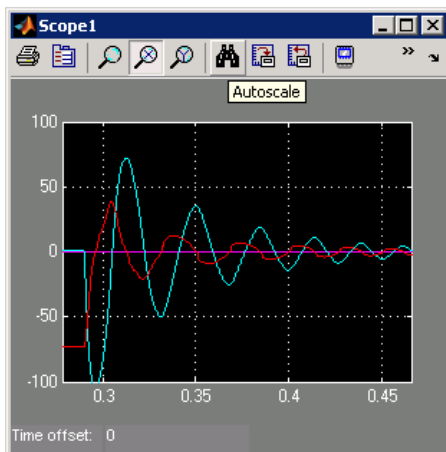
magnetycznego (rys. 9). Dodatkową wadą modelu pętli jest jej nieregularność wynikająca z błędów pomiarowych i wykorzystywanej liniowej aproksymacji międzywęzłowej. Wszystko to doprowadza do wytworzenia w symulowanym obiekcie mniej regularnych przebiegów niż prezentowane na dwóch poprzednich rysunkach. Zasadniczą różnicę w stosunku do obserwacji obiektowych widać w zaniżonej częstotliwości oscylacji obwodu symulowanego (porównaj rys. 11 i 14).



Rys. 13. Przebiegi w obiekcie symulowanym z bardziej stromą pętlą histerezy



Rys. 14. Przebiegi w obiekcie symulowanym z mniej stromą pętlą histerezy



Rys. 15. Przebiegi w symulowanym obiekcie z nieliniowością rdzenia

5. Podsumowanie

Artykuł ma charakter poglądowy, rozpoznawczy i ma na celu wskazanie metody i ograniczeń w dopasowywaniu nieliniowego modelu transformatora do jego danych pomiarowych, w taki sposób by model mógł być używany jako ekwiwalent realnego transformatora w badaniach symulacyjnych. Złożone i zamknięte pakiety symulacyjne (jak wykorzystywany tu SimPowerSystems) stanowią niezwykle przydatne narzędzie wspierania eksperymentu o ile wiarygodnie oddają realia pomiarowe. W artykule odniesiono do siebie obserwacje zjawiska ferorezonansu w realnym transformatorze i obwodzie symulującym jego zachowanie na przykładzie konkretnego obwodu testującego zestawionego w laboratorium i zasymulowanego o strukturze jak na rys. 8. Odniesienie takie (pomiar i symulacja) pozwala ocenić przydatność symulacji do badania podobnych zjawisk interesujących potencjalnego Czytelnika.

6. Wnioski

Zgodnie z oczekiwaniami wbudowany w Simulink model transformatora nieliniowego dobrze oddaje właściwości realnego obiektu. W referacie przedstawiono sposób w jaki należy postępować, oraz jakie obserwacje transformatora należy zrealizować, by wypracować jego prawidłowy model. Uzyskana dokładność modelowania zjawisk nieliniowości rdzenia w odczuciu Autorów jest w zupełności wystarczająca, choć jest oczywiste, że może ona nie zadowalać bardziej wymagających Użytkowników.

LITERATURA

- [1] Odessey, P.H., Weber, Ernst, Critical Conditions in Ferroresonance, American Institute of Electrical Engineers, *Transactions of the*, vol. 57, iss. 8, 1938, pp. 444 – 452
- [2] Irvani, M.R., Chaudhary, A.K.S., Giesbrecht, W.J., Hassan, I.E., Keri, A.J.F., Lee, K.C., Martinez, J.A., Morched, A.S., Mork, B.A., Parniani, M., Sharshar, A., Shirmohammadi, D., Walling, R.A., Woodford, D.A, Modeling and analysis guidelines for slow transients. III. The study of ferroresonance, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 15, iss. 1, 2000, pp. 255 – 265
- [3] Aghazadeh, R., Sanaye-Pasand, M., Damping of capacitive voltage substations ferroresonance using a suitable RLC filter, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol.151, iss.: 6, 2004, pp. 721 - 727
- [4] Martinez, J.A., Mork, B.A., Transformer modeling for low- and mid-frequency transients - a review, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, iss.: 2, part: 2, 2005, pp. 1625 – 1632
- [5] Dolinar, D. Pihler, J. Grcar, B., Dynamic model of a three-phase power transformer, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 8, iss. 4, 1993, pp. 1811 - 1819
- [6] Pedra, J., Sainz, L., Co'rcoles, F., Lopez, R., Salichs, M.A., PSPICE computer model of a nonlinear three-phase three-legged transformer, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, iss. 1, 2004, pp. 200 - 207
- [7] Staroszczyk, Z., Figoń, P., Experimental investigations of the quality of power system small-scale transformer modeling, *EPQU 10th International Conference on*, 2009, pp. 1 - 6
- [8] PN-EN 60404-2:2002 – Materiały magnetyczne – Część 2
- [9] <http://www.stalprodukt.com>

Autorzy: dr inż. Zbigniew Staroszczyk, dr inż. Eugeniusz Misuk
 Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: Zbigniew.Staroszczyk@ee.pw.edu.pl, Eugeniusz.Misiuk@ee.pw.edu.pl