

Dr hab. Paweł Żukowski, prof. uczelni
Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć,
Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej

Recenzja rozprawy doktorskiej pod tytułem:
„Algorytm wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora energetycznego”
autorstwa Pani mgr inż. Katarzyny Treli,
promotor Prof. dr hab. inż. Konstanty Marek Gawrylczyk

Podstawa opracowania recenzji – pismo We/4120/541/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie dr hab. inż. Pawła Dworaka, prof. ZUT z dnia 23.06.2023 r.

I. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych skrótów i symboli, ośmiu rozdziałów, wykazu literatury, zawierającego 144 pozycji, spisu rysunków i spisu tabeli, streszczenia, a jej objętość wynosi 130 stron.

W rozdziale pierwszym, zatytułowanym „Wstęp” Doktorantka uzasadnia aktualność podjęcia danej tematyki, powołując się na dane ze źródeł zagranicznych i krajowych. Teza pracy została sformułowana w sposób następujący: **„Możliwe jest stworzenie efektywnego algorytmu wyznaczającego odpowiedź częstotliwościową uzwojeń transformatora energetycznego na podstawie jego danych konstrukcyjnych, który pozwoli na usprawnienie procesu oceny stanu technicznego części aktywnej transformatora”**. Rozdział zawiera również cel pracy: **„Celem pracy jest stworzenie i przetestowanie nowych algorytmów numerycznych, opartych na analizie pola elektromagnetycznego w transformatorze oraz na analizie modelu obwodowego uzwojenia”**.

W rozdziale przedstawiono również strukturę dysertacji oraz 7 publikacji Doktorantki, w tym jednej samodzielnej, dotyczących zagadnień ujętych w rozprawie.

W rozdziale drugim, zatytułowanym „Podstawy metody FRA”, Doktorantka przedstawiła analizę odpowiedzi częstotliwościowej (Frequency Response Analysis – FRA),

która jest jedną z podstawowych metod określenia stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych i służy do oceny stanu mechanicznego części aktywnej transformatora. W wyniku zwarć i przepięć jak również podczas transportu mogą powstawać uszkodzenia mechaniczne uzwojeń transformatora. Metoda FRA pozwala na wykrycie takich uszkodzeń bez otwierania kadzi transformatora. W rozdziale omówiono również zasady wykonywania pomiarów na transformatorach. Przedstawiono schematy połączeń oraz przykładowe przebiegi FRA oraz kąta przesunięcia fazowego. Omówiono związek zakresów częstotliwości pomiarowych z występowaniem defektów w uzwojeniach. Na podstawie wykonanej analizy wyznaczono kierunki rozwoju oraz udoskonalenia analizy wyników uzyskanych za pomocą metody FRA.

Rozdział trzeci zatytułowano „Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora”

Rozdział ten zawiera krytyczną analizę znanych z literatury przedmiotu sposobów modelowania odpowiedzi FRA. Doktorantka w tym rozdziale opisała rozwój modelowania transformatorów od początku XX stulecia aż do naszych dni. Autorka opisała i przeanalizowała modele opisywane za pomocą indukcyjności własnych i wzajemnych, indukcyjności rozproszonych, na zasadzie dualności oraz modele, uwzględniające zjawiska falowe. Następnie zostały omówione i przeanalizowane modele pojemnościowe, modele, uwzględniające straty oraz wpływ rdzenia. Autorka rozprawy osobno opisała modele, które powstały na potrzeby analizy diagnostyki metodą FRA. Są to modele obwodowe RLC. Przytacza związek parametrów modeli, takich jak indukcyjność, pojemność elementów, rezystancja oraz pojemność między poszczególnymi elementami z rodzajami uszkodzeń, występujących w uzwojeniach. Następnymi analizowanymi grupami modeli są modele obwodowo-polowe o parametrach skupionych oraz modele polowe zawierające elementy linii długich. Brakuje mi podsumowania tego rozdziału, w którym była by zawarta zwięzła ocena dotychczasowych modeli i ich ewentualnych zalet oraz słabości.

W rozdziale czwartym „Model polowy części aktywnej transformatora” Doktorantka przedstawiła podstawy modelowania polowego w oparciu o oprogramowanie ANSYS Maxwell v.19.2, które do analizy numerycznej pola elektromagnetycznego wykorzystuje metodę elementów skończonych. W podrozdziałach 4.1.1, 4.1.2 przedstawiono równania, opisujące pole elektrostatyczne oraz pole elektromagnetyczne. W podrozdziale 4.1.3 przeanalizowano zastosowanie metody elementów skończonych do obliczeń pola

elektromagnetycznego, polegającej na dyskretyzacji pewnego obszaru ciągłego pola elektromagnetycznego określoną liczbą elementów. Niewątpliwie powoduje to powstawanie niepewności w uzyskanych wynikach. Punkt 4.2 Doktorantka poświęciła analizie parametrów magnetycznych i elektrycznych rdzenia transformatora z uwzględnieniem zjawiska naskórkowości. Wykonano obliczenia przenikalności zastępczej, składającej się z części rzeczywistej, odpowiadającej za przewodzenie strumienia magnetycznego, oraz urojonej, związanej ze stratami na prądy wirowe. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci zależności częstotliwościowej obydwu parametrów.

W pkt.4.3 wykonano symulację numeryczną transformatora rozdzielczego 800 kVA, 15/04 kV. W tym celu przygotowano model fizyczny, na którym wykonano pomiary odpowiedzi częstotliwościowej FRA za pomocą miernika Omicron FRAnalyzer. Zakres częstotliwości pomiarowych wynosił od 20 Hz do 2 MHz. Wykonano pomiar indukcyjności na podstawie którego określono przenikalność zastępczą materiału rdzenia. Wyniki pomiaru indukcyjności porównano z wynikami analizy numerycznej 2D oraz 3D. Należy zaznaczyć, że z przedstawionego na rysunku 4.3.7 porównania widać, że wyniki 2D oraz 3D praktycznie nie różnią się. Natomiast występują niewielkie różnice pomiędzy przebiegiem zmierzonym a symulowanymi. Uwzględnienie oddziaływania sąsiednich uzwojeń w modelach 2D oraz 3D poprawiła przebiegi symulowane indukcyjności. W obszarze niskich częstotliwości przebieg 2D jest bardziej zbliżony do doświadczalnego, niż przebieg 3D.

W rozdziale 5 wykonano wyznaczenie parametrów RLC pojedynczych uzwojeń. W tym celu opracowano algorytmy wyznaczenia indukcyjności i rezystancji własnej zwojów, opracowano macierz impedancji zwojów oraz wyznaczono pojemności własne i wzajemne zwojów.

Rozdział 6 zawiera opracowane w pracy algorytmy obwodowe wyznaczenia odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia. W rozdziale tym przedstawiono schematy trzech konfiguracji modeli LRC - II, Γ oraz T. Przedstawiono równania odpowiadające tym trzem konfiguracjom. Następnie przetestowano te modele na przykładach cewek powietrznych oraz na rdzeniu. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów metodą FRA. W dalszej części rozdziału wykonano trzy różne rodzaje deformacji rzeczywistych uzwojeń oraz wykonano pomiary metodą FRA przed deformacją oraz po każdym rodzaju deformacji. Wykonano również modelowanie numeryczne cewek z uszkodzeniami z zastosowaniem trzech konfiguracji obwodów. Na końcu rozdziału 6 wykonano porównanie przebiegów, uzyskanych na podstawie pomiarów oraz symulacji. Wynika z niego, że zastosowanie modelu typu T powoduje nieco większe rozbieżności z wynikami pomiarów. Poza tym model ten posiada większą złożoność oraz większy rozmiar macierzy.

W rozdziale 7 zastosowano opracowane w pracy algorytmy do modelowania transformatora 25 MVA o napięciu znamionowym 120/6,3 kV. Na początku rozdziału szczegółowo opisano dane znamionowe, schemat połączeń oraz parametry poszczególnych uzwojeń transformatora. Wyznaczono również doświadczalną charakterystykę FRA uzwojenia górnego napięcia wraz z uzwojeniem regulacyjnym. W dalszej części rozdziału przedstawiono opracowany model symulacyjny uzwojenia GN. Przedstawiono strukturę modelu oraz obliczenia metodą elementów skończonych. Na podstawie porównania wyników pomiarowych oraz symulacyjnych stwierdzono, że wyniki modelowania transformatora, uzyskane za pomocą modeli II, Γ oraz T są zbliżone.

W rozdziale 8 przedstawiono podsumowanie i wnioski wynikające z rozprawy doktorskiej oraz problemy, które wymagają dalszych badań.

Bibliografia pracy zawiera 144 pozycji literatury światowej i krajowej tematycznie związanych z rozprawą i zacytowanych w niej.

II. Uwagi merytoryczne do dyskusji podczas obrony

1. Proszę o podjęcie próby interpretacji zaobserwowanych doświadczalnie i przedstawionych na rysunkach 2.2.5, 4.3.2b kątów przesunięcia fazowego o wartościach powyżej $\pm 90^\circ$.
2. W pracy pomiary FRA wykonano dla przypadków suchych cewek i uzwojeń transformatorów. Proszę o wyjaśnienie możliwych zmian w przebiegach w przypadku zanurzenia cewek i uzwojeń w oleju izolacyjnym.
3. Symulacje numeryczne wykonano dla suchych cewek i uzwojeń transformatorów. Jakie parametry oleju należy uwzględnić przy symulacji odpowiedzi FRA?
4. Czy kadź transformatora może mieć wpływ na wyniki pomiarów oraz symulacji?
5. Wszystkie trzy zastosowane do symulacji konfiguracje modeli LRC - II, Γ oraz T wykazują głębsze, niż doświadczalne, pierwsze minimum FRA oraz pomijają niektóre minima w obszarze wysokich częstotliwości. Jakie możliwości lepszego dopasowania przebiegów doświadczalnych i symulowanych planuje Pani zastosować w dalszych badaniach?

III. Uwagi szczegółowe i edytorskie

1. Brak dokładnych danych bibliograficznych publikacji Doktorantki na str. 15-16.
2. Na stronie 43 równania (4.1) opisano jako równania całkowite. Oczywiście, że jest to postać różniczkowa, a nie całkowita.
3. Str.54 przedostatni wiersz. Napisano: "Przykłada" powinno być "Przykładowa".

IV. Wnioski końcowe

Moje uwagi merytoryczne nie obniżają wysokiej oceny recenzowanej rozprawy, a służą jedynie podpowiedzią co do kierunku dalszych badań oraz sposobów przedstawienia ich

wyników społeczności naukowej. Pragnę podkreślić, że praca ma wyraźny aspekt aplikacyjny. Moim zdaniem jest to duże osiągnięcie Doktorantki. Na uwagę zasługuje również fakt, że Pani mgr inż. Katarzyna Trela jest autorką samodzielnego artykułu naukowego oraz współautorką sześciu artykułów.

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska autorstwa Pani mgr inż. Katarzyny Treli pod tytułem: „**Algorytm wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora energetycznego**” spełnia wszystkie wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz.1668, z późn. zm.). Wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

