

Porównanie modeli obwodowych uzwojeń transformatorów energetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono modele obwodowe używane do modelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia transformatora. Porównano wyniki uzyskane za pomocą różnych modeli, a również z pomiarem przeprowadzonym na rzeczywistym fragmencie uzwojenia, uzyskując zbliżony kształt przebiegu odpowiedzi częstotliwościowej. Przeprowadzone porównanie wskazuje na znaczne podobieństwo wyników uzyskanych za pomocą różnych modeli.

Abstract. The article presents circuit models used to model the frequency response of the transformer winding. The results obtained with the use of various models were compared with the measurement carried out on the actual winding fragment, obtaining a similar shape of the frequency response waveform. The conducted comparison shows a significant similarity of the results obtained with the use of different models (*Comparison of circuit models used for modeling of frequency analysis response of transformer*).

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, analiza odpowiedzi częstotliwościowej, modelowanie

Keywords: power transformer, Frequency Response Analysis, modeling

Wprowadzenie

Awarie transformatorów mają bezpośredni wpływ na sprawność operacyjną i niezawodność dostaw energii do odbiorców, co w przypadku zakłócenia prowadzi do wzrostu kosztów dystrybucji. Na znaczenie transformatorów w systemie energetycznym wpływają również wysokie koszty ich naprawy, zwłaszcza gdy zachodzi konieczność ich wycofania z eksploatacji i zabranie z miejsca instalacji. Najskuteczniejszym sposobem uniknięcia awarii transformatorów jest ich odpowiednia konserwacja, w szczególności okresowa ocena stanu technicznego. Na przestrzeni lat opracowano szereg powszechnie stosowanych metod oceny stanu technicznego transformatorów mocy.

Analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA) jest jedną ze standardowych metod oceny stanu technicznego transformatorów mocy. FRA służy do określenia stanu mechanicznego części czynnej transformatora, zwłaszcza odkształceń i przemieszczeń w uzwojeniach transformatora, które pojawiają się głównie na skutek zwarć i przepięć. Metoda FRA stała się standardem w 2012 roku zgodnie z normą IEC 60076-18.

FRA jest metodą porównawczą, a więc wymaga pomiaru referencyjnego (tzw. „odcisku palca”) wykonanego w fabryce lub od razu po zainstalowaniu na stanowisku pracy w stanie zdrowym. Ocena stanu mechanicznego mierzonego uzwojenia polega na interpretacji różnic pomiędzy porównywanymi krzywymi. Największym wyzwaniem w interpretacji wyników FRA jest znalezienie właściwej korelacji między odchyleniami krzywych, a uszkodzeniami mierzonego uzwojenia. W celu poprawnej analizy wyników charakterystyki częstotliwościowej (FR) należy wziąć pod uwagę kilka czynników, takich jak geometria uzwojeń, historia awarii czy układ połączeń. Temperatura i wilgotność mają również wpływ na odpowiedź częstotliwościową, przesuwając poziomo widmo FRA. Często widoczne różnice w dwóch porównywanych krzywych nie są konsekwencją odkształceń w badanym uzwojeniu, ale mogą pochodzić od innych elementów transformatora. W związku z tym obecne badania związane z FRA skupiają się głównie na prawidłowej interpretacji wyników FRA. Badacze opracowują narzędzia, które mogą pomóc w ocenie wyników badań, w tym metody statystyczne oraz metody oparte na sztucznej inteligencji.

Jedną z możliwości poprawy oceny wyników FRA jest symulacja odpowiedzi częstotliwościowej. Powodem wykorzystania modeli komputerowych do oceny wyników FRA jest wyjaśnienie wpływu, w jaki sposób uszkodzenia mechaniczne, takie jak przemieszczenie osiowe, zwarcie, utrata docisku itp., zmieniają charakterystykę częstotliwościową. W praktyce, ze względu na wysokie koszty eksperymentów na rzeczywistych jednostkach, rozszerzenie bazy danych FRA jest możliwe tylko na drodze symulacji numerycznych.

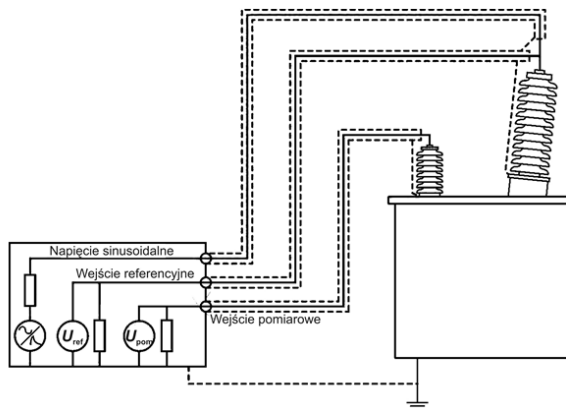
Ostatnie badania skupiają się na modelach, które jak najlepiej odwzorowują sygnaturę FRA i umożliwiają swobodny dostęp do parametrów uzwojenia. Proponowane podejście do osiągnięcia tego celu to model matematyczny pozwalający na wyznaczenie parametrów RLC pojedynczych zwojów oparty na analizie metodą elementów skończonych (MES), które następnie są wykorzystane w modelu obwodowym o parametrach skupionych lub rozłożonych.

Chociaż modele te w połączeniu z analizą pola elektromagnetycznego MES dają zadowalające wyniki, istnieje wiele zagadnień, które wymagają dopracowania w symulacjach FR. Jednym z problemów jest złożoność uzwojeń wielowarstwowych o setkach lub tysiącach zwojów przy konieczności analizy gęstości prądu wewnątrz przewodów. Nawet niewielkie zmiany parametrów RLC badanego uzwojenia są widoczne w sygnaturze FRA, dlatego istotne jest, aby analiza połowa była jak najdokładniejsza. Z drugiej strony analiza pola 3D uwzględniająca rozptył prądów wirowych w przewodach i efekty zbliżenia wymaga bardzo gęstej dyskretyzacji modelu. Analiza numeryczna takiego modelu jest skomplikowana i bardzo czasochłonna. Wymaga ona również wielkiej pamięci operacyjnej komputera. Posiadany w Katedrze serwer z pamięcią 90GB nie był do tego celu wystarczający. Analizę można uprościć, stosując pewne przybliżenia, które pozwolą uwzględnić efekty zależne od częstotliwości w materiale rdzenia. Innym sposobem na zwiększenie wydajności analizy MES jest opracowanie modelu 2D, który będzie równoważny modelowi 3D z dużą dokładnością.

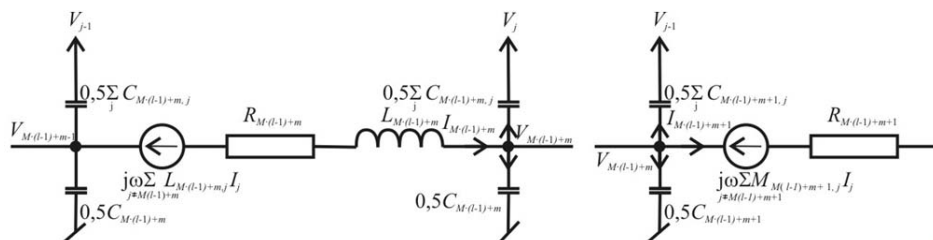
Dane wykorzystane do modelowania obwodowego pochodzą z obliczeń pakietem ANSYS Maxwell, w oparciu o metodę elementów skończonych. Szczegóły modelu użytego w obliczeniach FEM przedstawiono w [1, 4].

Obliczenia parametrów RLC modelu dla kilku częstotliwości i wykorzystując symetrię 2D trwały około tygodnia.

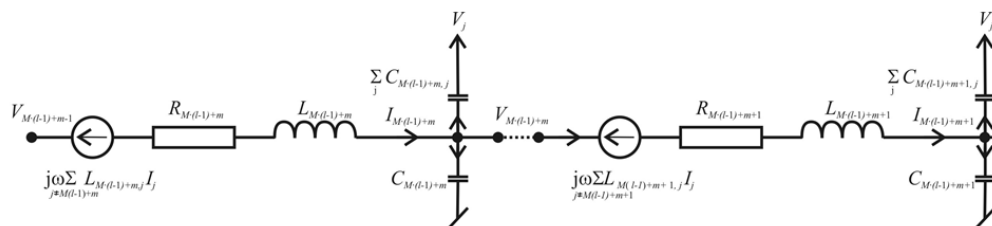
Modele opisane w pracy dotyczą pomiaru odpowiedzi częstotliwościowej w konfiguracji *end-to-end* przewidzianej w IEC 60076-18. Układ pomiarowy przedstawiono na rys. 1.



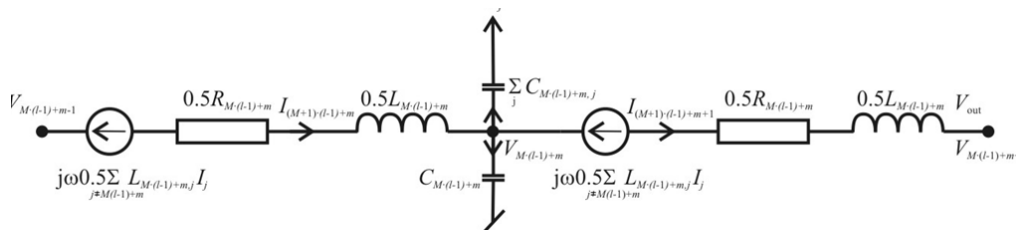
Rys.1. Układ pomiaru odpowiedzi częstotliwościowej



Rys.2. Model obwodowy w konfiguracji II



Rys.3. Model obwodowy w konfiguracji Gamma



Rys.4. Model obwodowy w konfiguracji T

Podobnie postępuje się w celu wyznaczenia macierzy indukcyjności i rezystancji rozwiązując najpierw zadanie pola elektromagnetycznego z wektorowym potencjałem A:

$$(3) \quad \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) + j\omega\gamma \mathbf{A} = \mathbf{J}_s,$$

potem na podstawie energii W związanej z poszczególnymi zwojami otrzymuje się macierz indukcyjności wzajemnych i własnych:

$$(4) \quad W_{AV} = \frac{1}{4} \int \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{H}_j^* dV, \quad L_{ij} = \frac{4W_{AV}}{I_{Peak}^2} = \int \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{H}_j^* d\Omega.$$

To samo rozwiązanie dostarcza wartości rezystancji, obliczonych na podstawie strat mocy czynnej P:

Rozwiązanie zadania polowego

Rozwiązanie odbywa się z użyciem pakietu Maxwell. W celu otrzymania macierzy pojemności międzyzwojowych trzeba rozwiązać zadanie elektrostatyczne:

$$(1) \quad \nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \Phi(r, z)) = -\rho,$$

następnie na podstawie wartości energii pola elektrostatycznego wyznacza się pojemności:

$$(2) \quad W_{ij} = \frac{1}{2} \int \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{E}_j d\Omega, \quad C_{ij} = \frac{2W_{ij}}{V^2} = \int \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{E}_j^* d\Omega.$$

Równania (1)-(5) są wbudowane w pakiecie Maxwell. Ze względu na uzależnienie indukcyjności i rezystancji od częstotliwości konieczne jest wykonanie obliczeń dla wybranych częstotliwości, pomiędzy którymi wartość parametrów jest interpolowana. Szczegółowy opis stosowanych modeli polowych znaleźć można w [1].

$$(5) \quad P = \frac{1}{2\gamma} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* d\Omega, \quad R = \frac{2P}{I_{Peak}^2} = \frac{\int \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* d\Omega}{\gamma I_{Peak}^2} = \frac{\int \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* d\Omega}{\gamma}.$$

Model obwodowy w konfiguracji II

Model pokazany na rys. 2 odpowiada pojedynczemu zwojowi, zawiera jego parametry własne R, L i C oraz sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe ze wszystkimi pozostałymi zwojami. Pojemności w tym modelu zostały rozdzielone po połowie na wejście i wyjście modelu. Rozwiązanie tak złożonej sieci z użyciem symulatora obwodowego nie wchodzi w rachubę, więc zostało ono wykonane poprzez rozwiązanie zestawu równań wynikających z praw Kirchhoffa.

Równania napięciowe dla zwojów wewnątrz uzwojenia przyjmują postać:

$$(6) \quad V_{M(l-1)+m} - V_{M(l-1)+m-1} + I_{M(l-1)+m} \cdot R_{M(l-1)+m} + j\omega \sum_{j=1 \dots ML} \left(L_{M(l-1)+m,j} I_j \right) + L_{M(l-1)+m,d} I_d = 0.$$

↑
dodatkowy zwoj

Indeksy w równaniu (6) oznaczają: l -numer cewki równoległej, m -numer zwoju w cewce, M -liczba zwojów w cewce. Indeks d oznaczono dodatkowy zwoj, odpowiadający pozostałym uzwojeniom transformatora znajdującym się na tym samym rdzeniu opisany w [1]. Równania prądowe mają postać:

$$(7) \quad I_{M(l-1)+m+1} + \frac{j\omega}{2} (C_{M(l-1)+m} + C_{M(l-1)+m+1}) V_{M(l-1)+m} + \frac{j\omega}{2} \sum_{j \neq M(l-1)+m} C_{M(l-1)+m,j} (V_{M(l-1)+m} - V_j) - I_{M(l-1)+m} + \frac{j\omega}{2} \sum_{j \neq M(l-1)+m+1} C_{M(l-1)+m+1,j} (V_{M(l-1)+m} - V_{j-1}) = 0.$$

Układ równań powstały z (6) oraz (7) ma rozmiar około podwójnej liczby zwojów analizowanego uzwojenia.

Model obwodowy w konfiguracji Γ

Model ten przedstawiono na rys. 3. Pojemności modelu Γ zostały zgromadzone po prawej stronie, co zmniejsza możliwości powstawania dróg pojemnościowych dla sygnału przy wysokich częstotliwościach.

Podobnie jak poprzednio, równania zostały rozbite na napięciowe:

$$(8) \quad V_{M(l-1)+m} - V_{M(l-1)+m-1} + I_{M(l-1)+m} \cdot R_{M(l-1)+m} + j\omega \sum_{j=1 \dots ML} \left(L_{M(l-1)+m,j} I_j \right) + L_{M(l-1)+m,d} I_d = 0$$

↑
dodatkowy zwoj

oraz prądowe:

$$(9) \quad I_{M(l-1)+m+1} - I_{M(l-1)+m} + j\omega C_{M(l-1)+m} \cdot V_{M(l-1)+m} + j\omega \sum_{j \neq M(l-1)+m} C_{M(l-1)+m,j} (V_{M(l-1)+m} - V_j).$$

Model obwodowy w konfiguracji T

Model ten przedstawiono na rys. 4. W tym modelu indukcyjności zostały rozdzielone na dwie części. Działanie tego modelu opisują, podobnie jak poprzednich, równania napięciowe:

$$(10) \quad V_{M(l-1)+m} - V_{M(l-1)+m-1} + I_{M(l-1)+m} \cdot R_{M(l-1)+m} + j\omega \sum_{j=1 \dots ML} \left(L_{M(l-1)+m,j} I_j \right) + L_{M(l-1)+m,d} I_d = 0,$$

↑
dodatkowy zwoj

jak też równania prądowe:

$$(11) \quad I_{M(l-1)+m+1} + \frac{j\omega}{2} (C_{M(l-1)+m} + C_{M(l-1)+m+1}) V_{M(l-1)+m} + \frac{j\omega}{2} \sum_{j \neq M(l-1)+m} C_{M(l-1)+m,j} (V_{M(l-1)+m} - V_j) - I_{M(l-1)+m} + \frac{j\omega}{2} \sum_{j \neq M(l-1)+m+1} C_{M(l-1)+m+1,j} (V_{M(l-1)+m} - V_{j-1}) = 0.$$

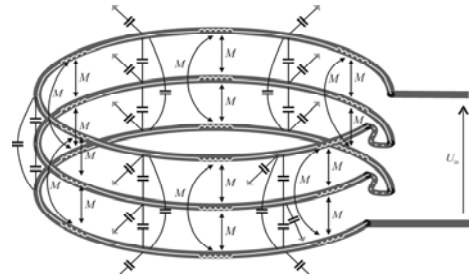
Wszystkie trzy modele opisane powyżej pozwalają na modelowanie uzwojeń z połączeniami równoległymi

(zmiennie L, I). Pojemności międzyzwojowe występujące w tych modelach pozwalają na występowanie drogi pojemnościowej dla sygnału, która funkcjonuje przy wysokich częstotliwościach pomiarowych powyżej 100kHz. Ponieważ pojemności te występują pomiędzy dowolnymi parami zwojów uzwojenia, przyjęty sposób modelowania ma duże znaczenie dla odwzorowania charakterystyki FRA przy wysokich częstotliwościach, szczególnie w obecności połączeń równoległych. Z powyższego względu model II , w którym pojemności podzielono po połowie, jest mniej korzystny od modelu Γ lub T . Z kolei model Γ posiada wejście indukcyjne po jednej stronie, a model T nawet po obydwu stronach, wymuszając przejście sygnału wysokiej częstotliwości przez indukcyjność. Widać stąd, że każdy z tych modeli jest pewnym przybliżeniem stanu faktycznego.

Model o parametrach rozłożonych

Pierwsze trzy opisane modele zawierały elementy o parametrach skupionych reprezentowanych przez elementy RLC . Poza opisanymi powyżej, niedoskonałość tych modeli wynika z porównania długości fali elektromagnetycznej w uzwojeniu z długością przewodu. Przy częstotliwości 1MHz długość fali w próżni wynosi 300m, a więc jest ona porównywalna z długością uzwojenia. Skutek tego można zaobserwować na charakterystykach FRA ze zmierzoną amplitudą i fazą sygnału. Na charakterystyce amplitudowej widać rezonanse, przy których zbocze zmienia swój charakter np. z indukcyjnego na pojemnościowy. Fakt ten powinien znaleźć odbicie na charakterystyce fazowej poprzez zmianę fazy z indukcyjnej na pojemnościową, co rzeczywiście występuje przy niskich i średnich częstotliwościach, a zanika przy wysokich. Faza sygnału przy wysokiej częstotliwości staje się indukcyjna i rośnie coraz bardziej. Jest to dowodem na występowanie efektów falowych w uzwojeniu.

Opracowano model z parametrami rozłożonymi, który powinien eliminować niedoskonałości poprzednich modeli. Ideę tego modelu przedstawiono na rys. 5 oraz w [2].



Rys.5. Model z parametrami rozłożonymi

Każdemu zwojowi uzwojenia odpowiada odcinek linii długiej. Zachowanie takiego układu linii długich opisują macierzowe równania telegrafistów:

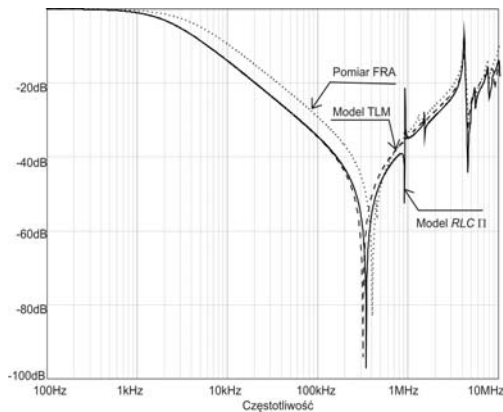
$$(12) \quad \frac{dU}{dx} = -Z \cdot I, \quad Z = R + j\omega L \left[\frac{\Omega}{m} \right], \quad \frac{dI}{dx} = -Y \cdot U, \quad Y = j\omega C \left[\frac{S}{m} \right].$$

Bezpośrednie rozwiązanie tych równań jest trudne, zastosowano więc metodę rozkładu na wartości własne, opisaną w pracy [2]. Praktyczne wykorzystanie tego modelu dla uzwojeń wielozwojowych napotkało jednak trudność polegającą na tym, że wiele wartości własnych było takich samych i algorytm rozkładu stawał się niestabilny.

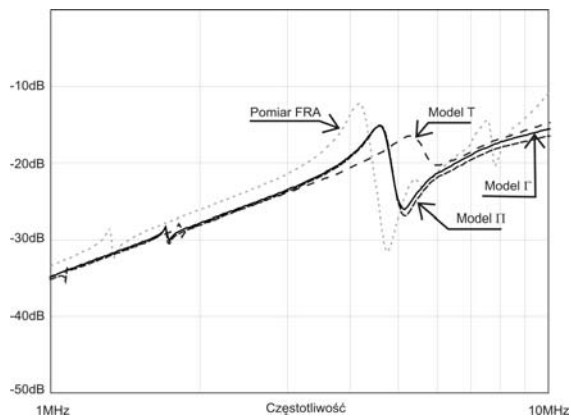
Przykłady rozwiązań

Pierwszy przykład (rys. 6) dotyczy modelowania odpowiedzi cewki powietrznej pozyskanej z transformatora powietrzego 800kVA, 6,3kV. Zawiera ona fragment

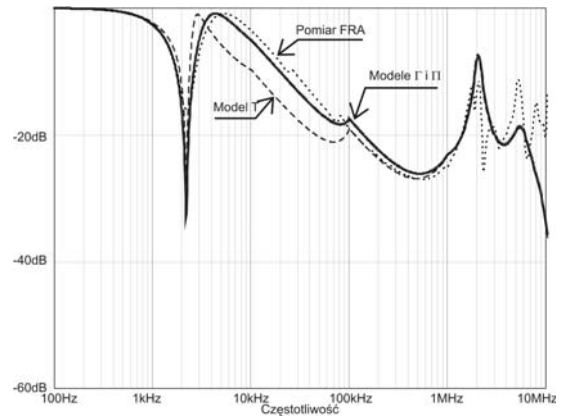
uzwojenia posiadający 60 zwojów. Na rys. 7 pokazano powiększenie odpowiedzi w zakresie wysokich częstotliwości. Rys. 8 przedstawia odpowiedź modelu uzwojenia wtórnego transformatora z rdzeniem 15/0,4kV zawierającego 24 zwoje x12 cewek równoległych [4].



Rys. 6. Porównanie odpowiedzi modeli TLM oraz II z pomiarem



Rys. 7. Porównanie odpowiedzi modeli II, I i T z pomiarem FRA



Rys. 8. Odpowiedź modelu uzwojenia z połączeniami równoległymi

Autor: prof. dr hab. inż. Konstanty M. Gawrylczyk, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, E-mail: kmg@zut.edu.pl

LITERATURA

- [1] Trela K., Gawrylczyk K.M., FEM Modeling of the Influence of the Remaining Windings on the Frequency Response of the Power Transformer, *Applied Sciences* 10 (2020), 21, 1-13
- [2] Banaszak Sz., Gawrylczyk K.M, Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów z wykorzystaniem metody linii długiej, *Przegląd Elektrotechniczny* (2012) 11b, 106-109
- [3] Gawrylczyk, K.M.; Banaszak, S. Modeling of frequency response of transformer winding with axial deformations, *Archives of Electrical Engineering* (2014), 63(1), 5-17.
- [4] Trela, K.; Gawrylczyk, K.M. Frequency Response Modeling of Transformer Windings Utilizing the Equivalent Parameters of a Laminated Core, *Energies* (2019), 12(12), 2371.