

doi:10.15199/48.2018.10.45

Analiza rozkładu pola elektrycznego w wybranych fragmentach układu izolacyjnego transformatora energetycznego

Streszczenie. Przedstawiony poniżej tekst opisuje sposób, w jaki modeluje się rozkład pola elektrycznego przy pomocy specjalistycznego oprogramowania jakim jest COMSOL: Multiphysics. Artykuł przedstawia zarówno główne problemy podczas przeprowadzania tych symulacji, jak i rozwiązania, które mogą je w pewien sposób ułatwić.

Abstract. The text below describes the way in which the distribution of the electric field is modelled using the specialized software COMSOL: Multiphysics. The article presents both the main problems of these simulations and the solutions that can make it easier in some way. (The analysis of electric field in chosen parts of power transformer insulating system).

Słowa kluczowe: pole elektryczne, symulacje, Comsol,
Keywords: electric field, modeling, simulations, Comsol,

Wstęp

Jedną z przyczyn awarii urządzeń elektroenergetycznych, a w szczególności transformatorów, są wyładowania elektryczne występujące w ich układach izolacyjnych. Występowanie wyładowań może być spowodowane błędami w procesie produkcji, wadami materiałowymi lub przy projektowaniu. Istnieje wiele pozycji literaturowych omawiających materiały elektrotechniczne, wykorzystywane do produkcji transformatorów, oraz budowę układów izolacyjnych papier-olej. Opisują one głównie uzwojenia, pomijając często złożone układy odpływów i wyprowadzeń. Znane są również wzorce, opracowane przez producentów transformatorów lub przedstawione w literaturze przedmiotu [1, 2, 3], stawiające wymagania odstępów izolacyjnych pomiędzy elementami o różnym potencjale elektrycznym w układzie izolacyjnym transformatora. W wymaganiach tych ujęto również kwestie związane z kształtem tych elementów.

W trakcie procesu projektowania ważne jest, aby konstruktor znał miejsca w układzie izolacyjnym transformatora o wysokiej wartości natężenia pola elektrycznego. Pozwala to na zabezpieczenie układu izolacyjnego przed wyładowaniami elektrycznymi i przyspieszoną degradacją izolacji. W celu lepszego poznania rozkładu pola elektrycznego wewnątrz transformatora, można się posłużyć różnorodnymi narzędziami inżynierskimi wykorzystującymi metody numeryczne [4]. Duża część tego typu oprogramowania wykorzystuje jednak symetrię osiową uzwojeń transformatora, co uniemożliwia symulowanie wspomnianych wcześniej odpływów i wyprowadzeń.

W ramach badań przeprowadzono obliczenia rozkładu pola elektrycznego wybranego niesymetrycznego fragmentu układu izolacyjnego przy zastosowaniu środowiska obliczeniowego COMSOL: Multiphysics. W niniejszym artykule zawarto początkową fazę prac, skupiając się na złożoności obiektu badań oraz procesie przygotowywania trójwymiarowego modelu dyskretnego.

Cel wykonanych prac

Podstawowym celem wykonanych prac było stworzenie modelu dyskretnego umożliwiającego wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego w niesymetrycznym układzie izolacyjnym, odzwierciedlającym rzeczywisty (istotny) fragment transformatora energetycznego przy zastosowaniu trójwymiarowej geometrii. Omawiany model dyskretny zostanie wykorzystany w przyszłości do wyznaczania rozkładu natężenia pola elektrycznego, omawianego fragmentu układu izolacyjnego, przy

zastosowaniu wielu wariantów jego geometrii. Powstałe narzędzie będzie podstawą do przeprowadzenia szeregu symulacji dających odpowiedź na pytanie, jaka konfiguracja układu izolacyjnego daje najlepsze rezultaty przy zastosowaniu relatywnie małych odległości izolacyjnych oraz ograniczeniu liczby przegród izolacyjnych.

Obiekt badań

Transformator, na podstawie którego opracowano matematyczny model do obliczeń, został wyprodukowany przez firmę Power Engineering Transformatory Sp. z o.o. Wspomniany transformator, w trakcie transportu, przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Obiekt badań – transformator sieciowy o mocy 16 MVA

Jest to transformator sieciowy o mocy 16 MVA oraz górnym napięciu $115000\text{ V} \pm 16\%$. W układzie izolacyjnym tego transformatora, który przedstawiono na rysunku 2, znajdują się fragmenty takie, jak odpływy uzwojenia regulacyjnego przebiegające w bliskiej odległości od uzwojenia regulacyjnego sąsiedniej fazy, miejsce przyłączenia odpływów uzwojeń regulacyjnych do podobciążeniowego przełącznika zaczepów, będące w bliskiej odległości od kadzi, czy też wyprowadzenia uzwojeń górnego napięcia do przepustów górnego napięcia.



Rys.2. Układ izolacyjny badanego obiektu

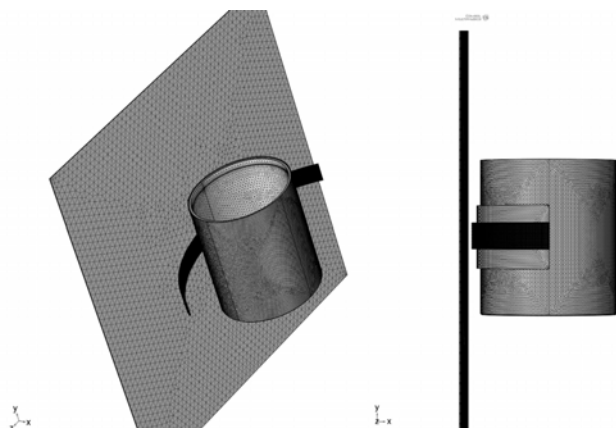
Do przeprowadzenia symulacji zdecydowano się wybrać miejsce, w którym odpływy uzwojenia regulacyjnego przebiegają w pobliżu sąsiedniej fazy. Uzwojenia strony górnego napięcia połączone są szeregowo z uzwojeniami regulacyjnymi poprzez przełącznik zaczepów. Przełącznik zaczepów łączy ze sobą uzwojenia górnego napięcia tworząc punkt gwiazdowy. W normalnej eksploatacji (bez zakłóceń pracy sieci) potencjał punktu zerowego wynosi zero, jednak w pozostałych odczepach indukuje się napięcie. Na rysunku 3 pokazano fragment układu izolacyjnego wybranego do analizy.



Rys.3. Fragment układu izolacyjnego wybranego do analizy

Oprogramowanie i model dyskretny

Symulację przeprowadzono w specjalistycznym oprogramowaniu COMSOL: Multiphysics, który umożliwia dokonywanie obliczeń za pomocą metody elementów skończonych (MES). W tym celu należy stworzyć model badanego obiektu we wspomnianym programie lub też poprzez import z oprogramowania służącego do modelowania 3D/2D. Następnym krokiem jest przygotowanie modelu dyskretnego. Etap ten stanowi główną przeszkodę, która praktycznie uniemożliwia badanie układu izolacyjnego w całości, ponieważ jest on zbyt skomplikowany. Stworzenie poprawnej siatki dla całego obiektu wymaga bardzo dobrej znajomości oprogramowania oraz dużej mocy obliczeniowej komputera. Z tego względu zdecydowano się na badanie rozkładu pola jedynie we fragmencie układu izolacyjnego, który przedstawiono na rysunku 3, a jego model dyskretny został przygotowany w sposób przedstawiony na rysunku 4.



Rys.4 Model dyskretny wybranego fragmentu układu izolacyjnego

Aby zmniejszyć zapotrzebowanie na moc obliczeniową oraz ułatwić przygotowanie siatki dyskretnej, model

uproszczono ograniczając się do odwzorowania niezbędnych elementów:

- ściany kadzi,
- odpływów uzwojenia regulacyjnego,
- tulei preszpanowej,
- uzwojenia górnego regulacyjnego uproszczonego do postaci tulei,
- izolacji znajdującej się na niej oraz oleju transformatorowego, w którym umieszczono wymienione elementy.

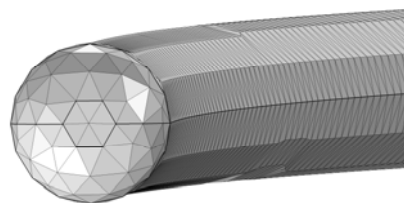
Przygotowano dwie wersje modelu różniące się występowaniem między odpływami, a tuleją izolacyjną dodatkowej bariery preszpanowej.

Po wykonaniu modelu dyskretnego możliwe jest sprawdzenie jego statystyk, takich jak liczba elementów, średnią i minimalną jakość elementu. Statystyki zastosowanej siatki dyskretnej przedstawiono na rysunku 5.

Model wykorzystywany w symulacji składał się z prawie 3,5 miliona elementów czworobocznych, jego średnia jakość wynosiła 0,64. Takie parametry pozwoliły na wykonanie obliczeń. Poza powyższymi parametrami, na poprawność uzyskiwanych wyników obliczeń ma również wpływ odpowiednie zagęszczenie siatki w kluczowych miejscach, szczególnie w przypadku symulowania natężenia pola elektrycznego. Przykład takiego fragmentu przedstawiono na rysunku 6. Rysunek ten przedstawia zakończenie oraz powierzchnie boczne odpływu, w którym małe zagęszczenie elementów czworobocznych przyczyniło się do powstawania ostrych krawędzi, co wpływa negatywnie na wiarygodność wyników. Dlatego postanowiono zagęścić siatkę dyskretną w tym fragmencie modelu.

| Statistics | |
|-----------------------------|----------------------|
| Complete mesh | |
| Element type: | All elements |
| Tetrahedral elements: | 3456799 |
| Triangular elements: | 676831 |
| Edge elements: | 43347 |
| Vertex elements: | 244 |
| — Domain element statistics | |
| Number of elements: | 3456799 |
| Minimum element quality: | 8.213E-7 |
| Average element quality: | 0.6409 |
| Element volume ratio: | 1.583E-9 |
| Mesh volume: | 30.62 m ³ |
| Maximum growth rate: | 16.56 |
| Average growth rate: | 1.837 |

Rys.5 Statystyki stworzonego modelu dyskretnego



Rys.6 Fragment modelu dyskretnego przedstawiający jeden z odpływów

Wyniki obliczeń

W ramach przeprowadzonych prac zasyulowano rozkład natężenia pola elektrycznego w dwóch modelach: z dodatkową przegradą izolacyjną oraz bez przegrody. Ponadto dla każdego z modeli przeprowadzono cztery symulacje z wykorzystaniem różnych warunków brzegowych. Warunki brzegowe zależały od wartości napięcia przyłożonego do zacisków liniowych

transformatora oraz założonej pozycji podobciążeniowego przełącznika zaczepów:

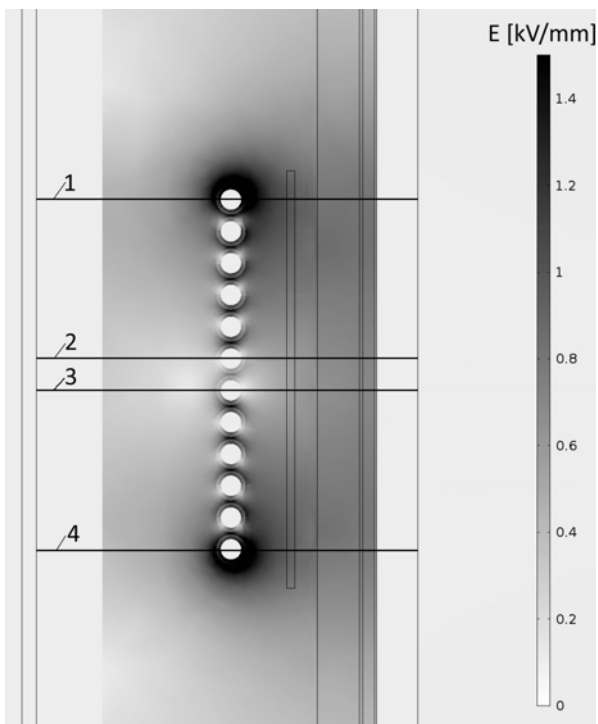
- nominalnej z uzwojeniem regulacyjnym połączonym zgodnie z uzwojeniem głównym (0+),
- nominalnej z uzwojeniem regulacyjnym połączonym przeciwnie do uzwojenia głównego (0-).

Obliczenia przeprowadzono dla napięcia znamionowego 115 kV (przyłożonego do zacisku liniowego uzwojenia górnego napięcia) oraz napięcia indukowanego w trakcie prób odbiorczych 230 kV. Potencjały panujące na poszczególnych odczepach uzwojenia regulacyjnego obliczono zgodnie z procentową wartością regulacji transformatora. Natomiast potencjał panujący na uzwojeniu regulacyjnym sąsiedniej wyznaczono za pomocą rachunku wektorowego. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki symulacji dla obu modeli dla przypadku, w którym przełącznik zaczepów znajduje się w pozycji 0+, natomiast na zaciskach liniowych panuje napięcie 230 kV. Jest to przypadek, w którym w analizowanym fragmencie izolacji występują najwyższe napięcia elektryczne.

Rysunek 7 przedstawia obraz natężenia pola elektrycznego dla modelu, w którym zastosowano dodatkową barierę izolacyjną. Największe natężenie pola elektrycznego osiągnięto przy skrajnych odpływach, które odpowiadały najwyższym stopniom regulacji, czyli 12 oraz 11 zaczepowi podobciążeniowego przełącznika zaczepów. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego wyniosła 2,56 kV/mm i wystąpiła przy górnym odpływie.

W papierowej izolacji odpływów widać wyraźny spadek natężenia pola elektrycznego, natomiast w barierze izolacyjnej jest on niewidoczny.

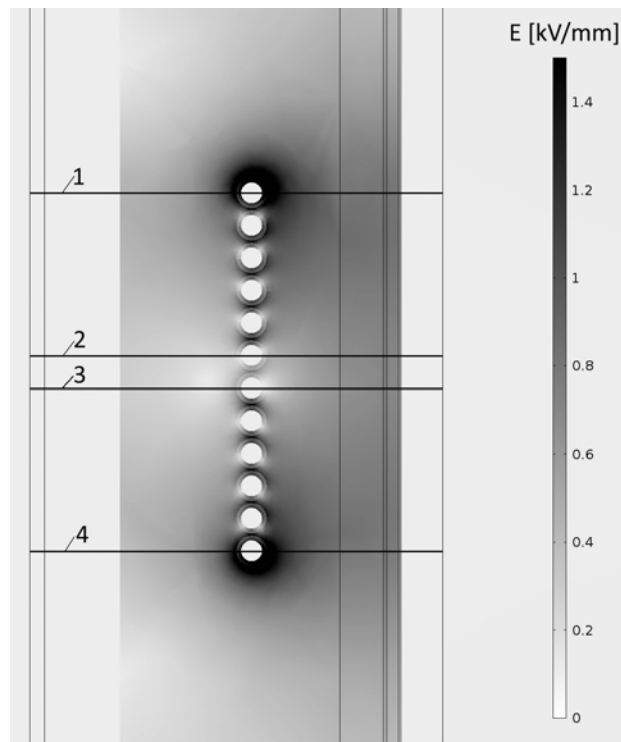
Na rys. 8. przedstawiono obraz natężenia pola elektrycznego dla modelu bez przegrody izolacyjnej. Obraz ten wygląda niemalże identycznie jak w przypadku z przegrodą.



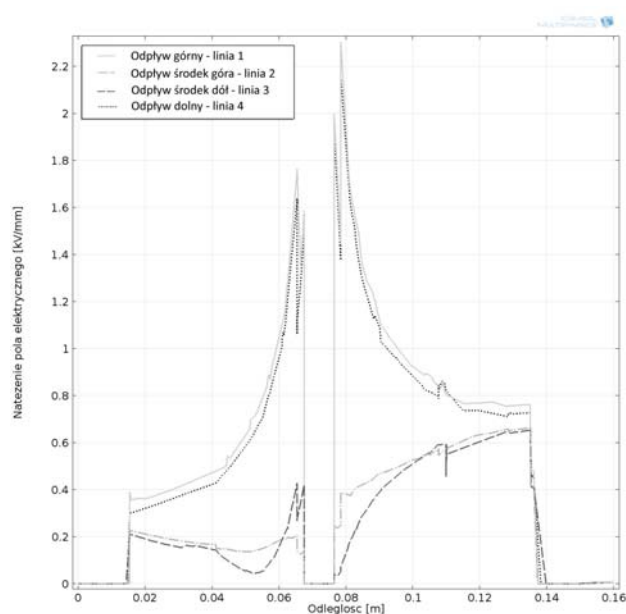
Rys.7. Obraz natężenia pola elektrycznego dla przypadku z przegrodą izolacyjną, cyframi od 1 do 4 oznaczono linie pomocnicze, wzdłuż których obliczono rozkłady przedstawione na rysunku 9

Kolejne rysunki pokazują rozkłady natężenia pola elektrycznego wyznaczone wzdłuż linii pomocniczych widocznych na rysunkach 7 i 8. Na rysunku 9 znajdują się

wykresy dla modelu z przegrodą izolacyjną, natomiast na rysunku 10 znajdują się wykresy dla modelu bez przegrody izolacyjnej.

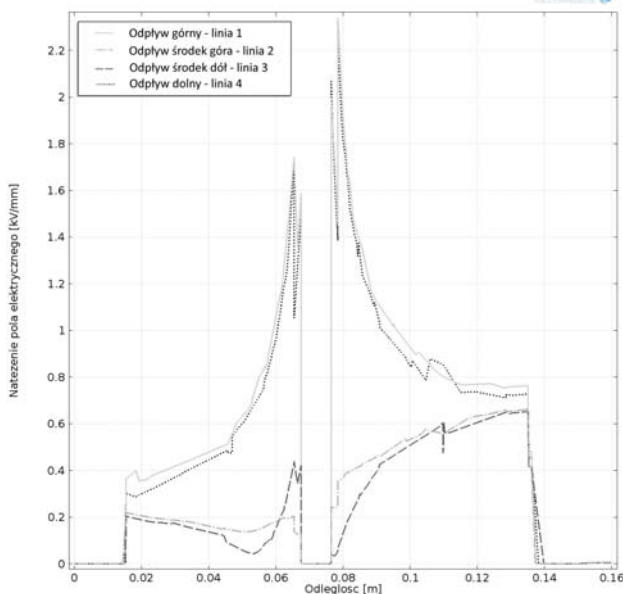


Rys.8. Obraz natężenia pola elektrycznego dla przypadku bez przegrody izolacyjnej; cyframi od 1 do 4 oznaczono linie pomocnicze, wzdłuż których obliczono rozkłady przedstawione na rysunku 10



Rys.9. Rozkład natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii pomocniczych przecinających odpływy skrajne oraz środkowe dla przypadku bez przegrody izolacyjnej dla napięcia 230 kV

Rozkłady przedstawione na rysunkach 9 i 10 również wskazują na to, że natężenie pola elektrycznego w analizowanym obszarze nie zmienia się w znaczący sposób na skutek zastosowania przegrody izolacyjnej. Poszczególne ekstrema przebiegów różnią się dla obu przypadków, są to jednak niewielkie różnice mieszczące się w granicach błędów obliczeniowych.



Rys.10. Natężenie pola elektrycznego wzdłuż linii pomocniczych przecinających odpływy skrajne oraz środkowe dla przypadku z przegrodą izolacyjną dla napięcia 230 kV

Przedstawione przebiegi, a w szczególności odcinki przedstawiające wartość pola elektrycznego w oleju transformatorowym wykazują niewielkie skokowe zmiany wartości odbiegające od spodziewanego rozkładu, który powinien mieć charakter hiperboliczny. Wynika to z niskiej szczegółowości modelu dyskretnego w obszarze oleju.

Wnioski

Zamodelowanie złożonej budowy układu izolacyjnego transformatora, w sensie późniejszego wykorzystania takiego modelu do analiz rozkładu natężenia pola elektrycznego, jest poważnym wyzwaniem. Inżynierowie pracujący w biurach konstrukcyjnych nie mają dostępu do maszyn o mocach obliczeniowych umożliwiających analizę tak skomplikowanego problemu. Istnieje jednak możliwość podziału całej geometrii analizowanego transformatora na fragmenty, o niższym stopniu złożoności i przy odpowiednim zaimplementowaniu warunków brzegowych oraz zastosowaniu siatki dyskretyzacyjnej o różnej gęstości dokonania analizy rozkładu pola w interesujących nas obszarach. Przykładem takiego podejścia do problemu jest przedstawiona w artykule analiza rozkładu pola elektrycznego w obszarze odpływów uzwojenia regulacyjnego.

W niniejszym artykule przedstawiono jedynie jeden z analizowanych przez autorów przypadków, który wykazał nieznaczny wpływ dodatkowej bariery na wartość natężenia pola elektrycznego w obszarze izolacji papierowej odpływów. Zatem można wysnuć wniosek, że stosowanie dodatkowych przegród izolacyjnych nie wpływa zasadniczo

na rozkład pola w obszarze odpływów, natomiast zwiększa wytrzymałość elektryczną układu. Wytrzymałość elektryczna układu z barierą jest znacznie wyższa od wytrzymałości układu bez bariery. Ma to związek z „efektem objętościowym”, który opisywany jest w literaturze [1, 5]. Polega on na podziale obszarów, w których występują duże naprężenia elektryczne, na mniejsze. Zapobiega to gromadzeniu się zanieczyszczeń, które tworzą mostki ułatwiające przebicia dielektryku ciekłego.

Prezentowany tutaj model umożliwia analizę innych interesujących z punktu widzenia wytrzymałości układu izolacyjnego odpływów zagadnień takich, jak wpływ średnicy przewodów stosowanych na odpływy, czy wpływ grubości izolacji papierowej na natężenie pola w izolacji odpływów. Przeprowadzenie takich analiz umożliwi zredukowanie natężenia pola elektrycznego w odpływach bez konieczności zwiększania ilości materiałów potrzebnych na wykonanie układu izolacyjnego w tym miejscu. Docelowo można spodziewać się nawet redukcji kosztu produkcji wspomnianego fragmentu układu izolacyjnego.

Artykuł jest finansowany z Dotacji na utrzymanie potencjału badawczego oraz na badania naukowe nr 04/41/DSPB/4345 pt.: „Rozwój zaawansowanych metod diagnostycznych i oceny stanu układu izolacyjnego transformatorów energetycznych”.

Autorzy: inż. Kamil Starosta, Power Engineering Transformatory sp. z o.o. ul. Gdyńska 83, 62-004 Czerwonak, E-mail: k.starosta@petransformatory.pl; dr inż. Bolesław Bródka, Power Engineering Transformatory sp. z o.o. ul. Gdyńska 83, 62-004 Czerwonak, E-mail: b.brodka@petransformatory.pl; dr hab. inż. Jarosław Gielniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa 1983
- [2] Szczepański Z., Lechowski Z., Rosicki A., Wodziński J., Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 1978
- [3] Harlow J.H., Electric power transformer engineering, CRC Press, 2012
- [4] Del Vecchio R.M., Poulin B., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R., Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers, CRC Press, 2010
- [5] Wilson W.R., A Fundamental Factor Controlling the Unit Dielectric Strength of Oil, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III: Power Apparatus and Systems, (1953), nr 72, 68-74