

Analiza numeryczna procesów przepływu ciepła w wybranych transformatorach elektrycznych

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono model numeryczny sprzężonych procesów w trójfazowych suchych transformatorach elektrycznych uwzględniający zjawiska ciepłno-przepływowe, elektromagnetyczne i wytrzymałościowe. Główna analiza ciepłno-przepływowa została sprzężona z modelem elektromagnetycznym w celu określenia właściwych strat mocy w cewkach i rdzeniu urządzenia. Natomiast model wytrzymałościowy umożliwił wyznaczenie pola naprężeń cieplnych w żywicznym transformatorze w oparciu o pole temperatury otrzymane ze sprzężenia modelu ciepłno-przepływowego z elektromagnetycznym. Ciepłne warunki brzegowe, zdefiniowane jako lokalne i zależne od temperatury strumienie ciepła, obliczono na podstawie analizy dodatkowego modelu numerycznego powietrza otaczającego transformator i jego obudowę. Ponadto przeanalizowano modele numeryczne i analityczne, aby wyznaczyć zastępcze anizotropowe współczynniki przewodzenia ciepła dla różnego typu cewek oraz dla pakietowanych rdzeni. Opracowany model numeryczny został zwalidowany przez eksperymentalne próby nagrzewania, które przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi Normami Europejskimi dla transformatorów stosowanych w przemyśle. Podczas tych badań, temperatury wewnątrz obudowy były mierzone punktowo na wybranych charakterystycznych elementach urządzenia za pomocą termopar, natomiast na zewnętrznych powierzchniach obudowy przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej. Otrzymane wyniki wskazują, że obliczone pole temperatury w analizowanych obiektach jest bardzo dokładne w porównaniu do wyników pomiarów.

Przeanalizowane transformatory rozpraszają ciepło z zewnętrznych ścian za pomocą konwekcji naturalnej do otoczenia oraz za pomocą promieniowania do wewnętrznych ścian pomieszczenia, w którym się znajdowały. Dlatego też opracowano model ciepłno-przepływowy powietrza wewnętrznego otaczającego transformator oraz zewnętrznego wokół obudowy umożliwiający wyznaczenie lokalnych i zależnych od temperatury strumieni ciepła (zarówno konwekcyjnych, jak i radiacyjnych) na zewnętrznych powierzchniach transformatora i jego obudowy. Warto również podkreślić, że takie podejście może być skutecznie zastosowane w różnego typu transformatorach pracujących w dowolnym otoczeniu.

W analizie elektromagnetycznej wyznaczono straty mocy transformatora zarówno dla cewek, jak i rdzenia urządzenia. Lokalne straty mocy z rdzenia obliczono wykorzystując procedury bazujące na równaniu Steinmetza. Zatem straty te były wyznaczone jako funkcja maksymalnych wartości indukcji magnetycznej. Straty mocy w cewkach, znane jako ciepło Joule'a, zostały obliczone na podstawie lokalnych wartości strumienia płynącego prądu oraz rezystywności elektrycznej, zdefiniowanej jako wielkość zależna od temperatury. Aby otrzymać pole strat mocy w cewkach, które jest zależne od temperatury, analiza CFD została sprzężona z elektromagnetyczną za pomocą procedury iteracyjnej. W każdej pętli, po wyznaczeniu źródeł

ciepła generowanego w cewkach i rdzeniu, wartości te były przekazywane do modelu ciepłno-przepływowego. Następnie na podstawie otrzymanego pola temperatury, uaktualniano właściwości materiałowe w modelu elektromagnetycznym.

Ze względu na skomplikowaną budowę cewek, ich cieplne właściwości materiałowe zostały zdefiniowane jako anizotropowe, np. współczynnik przewodzenia ciepła wzdłuż drutów był znacznie wyższy niż w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku nawijania uzwojeń. Podobnie dla rdzenia składającego się z pakietu blach, współczynnik ten posiadał różne wartości w kierunku prostopadłym do pakietów i w płaszczyźnie blach. Z tego powodu w obu kierunkach w płaszczyźnie prostopadłej do drutów, wartości współczynników przewodzenia ciepła zostały wyznaczone na podstawie zbudowanego dodatkowego modelu numerycznego. Natomiast w pozostałym kierunku i we wszystkich kierunkach dla rdzenia wykorzystano modele analityczne.

Kolejnym etapem pracy było wykonanie obliczeń sprzężenia modelu ciepłno-przepływowego z mechanicznym. Analiza umożliwiła wyznaczenie naprężeń cieplnych w urządzeniu, zwłaszcza na granicy między materiałami o różnych właściwościach. W analizowanym przypadku miejscem najbardziej narażonym na powstanie spiętrzenia naprężeń były wszystkie powierzchnie sąsiadujące z blokiem żywicy. Dodatkowo wykonano obliczenia, w których przeanalizowano oddziaływanie powstałych pęknięć na maksymalne wartości temperatury w transformatorze.

Opracowany model matematyczny może być wykorzystane zarówno podczas procesu projektowania, jak i eksploatacji. Otrzymane wyniki mogą być szczególnie przydatne do analizy urządzeń pracujących w warunkach utrudniających odprowadzanie ciepła. Tak szerokie zastosowanie wyników pracy jest możliwe dzięki następującym przeanalizowanym urządzeniom: transformator żywiczny małej mocy chłodzony wodą, suchy transformator średniej mocy z wentylowanymi cewkami umieszczony poziomo w komorze transformatorowej chłodzonej wodą i suchy transformator średniej mocy z wentylowanymi cewkami, który pracował wewnątrz stacji transformatorowej chłodzonej powietrzem w sposób naturalny.

Powyższe przykłady zostały wybrane, ponieważ właściwie reprezentują całą grupę suchych transformatorów. Ponadto, ze względu na różną konstrukcję wewnętrzną, położenie w obudowie, konfigurację układu chłodzenia, model symulacyjny pozwolił określić najbardziej efektywny sposób chłodzenia tych urządzeń. Aby to osiągnąć, pomocne okazały się również analizy zastosowania rur cieplnych oraz wpływu pęknięć na pole temperatury. Dodatkowo, opracowane procedury mogą być również zastosowane w najczęściej spotykanych transformatorach olejowych. Wymaga to jedynie przededefiniowania w modelu numerycznym właściwości materiałowych czynnika chłodzącego.

Należy również podkreślić, że wyniki uzyskane w pracy mogą być wykorzystane w innych projektach. Przykładowo, zastępcze anizotropowe współczynniki przewodzenia ciepła wyznaczone dla różnych typów cewek mogą być zastosowane jako dane wejściowe do analiz obwodowych. Ponadto wyznaczono uśrednione współczynniki przewodzenia ciepła na podstawie lokalnych pól strumieni ciepła dla wszystkich istotnych elementów transformatora i jego obudowy. Te dane mogą być użyte w uproszczonych analizach, w których nie uwzględnia się rzeczywistego przepływu czynnika chłodzącego.