

Artur Wiertek, Rockwell Automation, Katowice

Tomasz Kądziołka, Maciej Kryś, MESco Sp. z o.o., Tarnowskie Góry

ANALIZA ROZKŁADU STRAT MOCY ORAZ TEMPERATURY W ROZDZIELNICACH NISKIEGO NAPIĘCIA – ANALIZA SPRĘŻONA Z WYKORZYSTANIEM MES (EM + CFD) W PROGRAMIE ANSYS, MAXWELL I ICEPAK

ANALYSIS OF POWER AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN LOW VOLTAGE SWITCHGEAR – COUPLED FEM ANALYSIS (EM + CFD) USING ANSYS, MAXWELL AND ICEPAK SOFTWARE

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę termiczną rozdzielnicy niskiego napięcia zawierającą moduł z wyłącznikiem głównym. Zaprezentowano podejście do analizy sprzężonej składającej się z dwóch etapów, tj. wyznaczenia strat przy wykorzystaniu analizy elektromagnetycznej i przeniesieniu ich do analizy CFD. Na etapie analizy elektromagnetycznej obliczono straty ciepła Joule'a, jako wynik grzania rezystancyjnego w przewodnikach miedzianych oraz ciepła wyindukowanego na elementach stalowych obudowy (prądy wirowe). Analiza elektromagnetyczna uwzględnia również zjawisko naskórkowości oraz efekt zbliżenia pomiędzy przewodnikami różnych faz. Straty ciepła wykorzystane są jako dane wejściowe do analizy termicznej, która zawiera rozwiązanie promieniowania i konwekcji naturalnej. Wyniki otrzymane w symulacji numerycznej porównano z rzeczywistym testem termicznym wykonanym w laboratorium firmy Rockwell Automation zgodnie z normą IEC 61439-1.

Abstract: Paper presents thermal analysis of low voltage motor control center column which contains main unit with air circuit breaker. Described is two-stage simulation approach which includes solution of electromagnetic field and CFD analysis coupled together. The result of electromagnetic simulation, which is the first step of this combined approach, is heat loss generated as the result of Joule heating and induction of eddy currents on sheet metal parts of the enclosure. Heat loss is an input for further CFD simulation which is the final stage of analysis. CFD simulation is used to calculate radiation and natural convection. Results of conducted simulation were compared to real thermal test ran in Rockwell Automation laboratory according to IEC 61439-1 standard.

Słowa kluczowe: ANSYS, EM, CFD, sprzężona, elektromagnetyzm, termika, szynoprzewody, rozdzielnica elektryczna

Keywords: ANSYS, EM, CFD, coupled, electromagnetics, thermal, busbars, switchgear

1. Wstęp

Rozdzielnice niskiego napięcia są objęte dyrektywą elektromaszynową, a w szczególności normą IEC 61439 zgodnie, z którą powinny zostać poddane szeregowi testów przed wdrożeniem produktu na rynek. Jednym z nich jest test termiczny, którego warunki zostały szczegółowo ujęte w wyżej wymienionej normie. Norma IEC 61439 szczegółowo opisuje sposób obciążenia testowanego modułu oraz podaje maksymalne dozwolone przyrosty temperatury w miejscach krytycznych ze względu na bezpieczeństwo użytkowników oraz urządzenia. Przy obecnym postępie technologicznym producenci aparatury

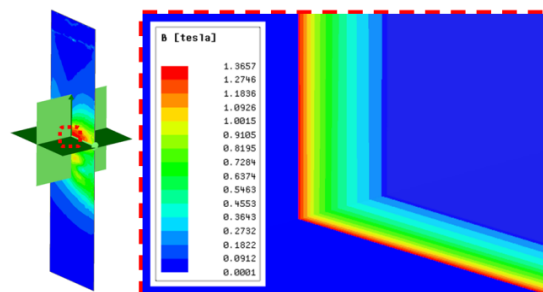
rozdzielczej zmuszeni są wypuszczać na rynek nowe serie produktów z dużo większą częstotliwością niż w latach poprzednich. Rozwój technologiczny wymusza zwiększenie inwestycji w rozwój produktu, którego nieodłączną częścią są testy certyfikacyjne. Symulacja staje się zatem nieodłącznym elementem procesu projektowego pozwalając na obniżenie kosztów prac badawczo-rozwojowych oraz skrócenia czasu wprowadzenia produktu na rynek końcowy. Opracowanie szczegółowych modeli numerycznych odzwierciedlających zachowanie się rzeczywistego obiektu podczas pracy może znacząco ograniczyć liczbę

testów porównawczych wykonywanych na co dzień w laboratorium. W ramach niniejszej pracy przedstawiono podejście do tematu analizy obciążenia termicznego rozdzielnic niskiego napięcia składającej się z symulacji elektromagnetycznej sprzężonej z analizą przepływową CFD. Analizie poddany został moduł z nadprądowym wyłącznikiem głównym. Moduł ten dedykowany jest do pracy w sieci trójfazowej o częstotliwości zarówno 50 jak i 60 Hz. Na potrzeby niniejszej analizy moduł został przetestowany pod obciążeniem prądowym 2000 A (wartość skuteczna prądu RMS) w układzie trójfazowym pracującym z częstotliwością 50Hz. Obudowa testowanego modułu spełnia wymagania klasy ochrony IP54. Zamierzeniem autorów było ujęcie wszystkich zjawisk fizycznych (elektromagnetycznych i termodynamicznych) mających wpływ na stan termiczny badanego obiektu.

2. Model numeryczny

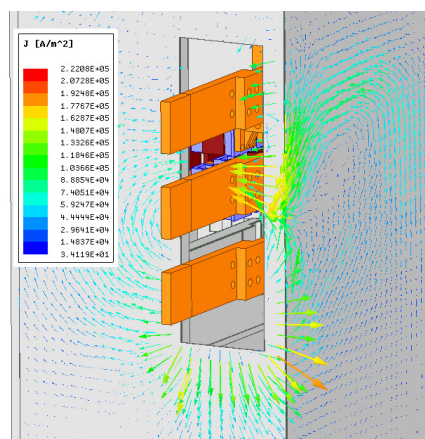
Pierwszym etapem pracy była analiza elektromagnetyczna, która wykonana została w programie ANSYS Maxwell. Wyznaczenie strat ciepła w elementach przewodzących oraz elementach obudowy nie należy do prostych zagadnień z uwagi na efekty związane ze zmiennym polem magnetycznym. Oprócz dobrze znanych strat Joulea $P = I^2 \cdot R$ w obliczeniach należy uwzględnić zagadnienia związane z efektem naskórkowości oraz zbliżenia, które zależą m.in. od kształtu badanego układu (geometrii) i stanowią istotny udział w całkowitych stratach. W celu przeprowadzenia analizy numerycznej zaimportowano geometrię rozdzielnic bezpośrednio do programu Maxwell (wym. modelu 0,6m x 0,6m x 2,6m), a następnie zdefiniowano własności materiałowe oraz określono warunki brzegowe i wymuszenia w programie. Model elektromagnetyczny rozdzielnic składa się z szynoprzewodów, w których płynie prąd przemienny o wartości skutecznej 2 kA, modelu wyłącznika głównego oraz elementów stalowych obudowy rozdzielnic. Rezultatem analizy elektromagnetycznej (EM) są rozkłady pól elektromagnetycznych oraz straty ciepła powstałe w wyniku grzania rezystancyjnego przewodników oraz prądów wirowych indukowanych (Rys.2) w elementach obudowy - na rysunku 1 pokazano zjawisko wnikania pola

magnetycznego B w elementy konstrukcyjne obudowy rozdzielnic wykonanej ze stali.



Rys. 1. Wartość indukcji magnetycznej B w przekroju tylnej ściany obudowy rozdzielnic nN

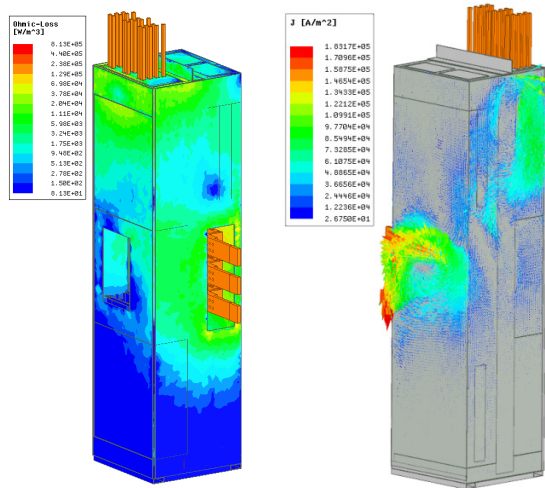
Rozwiązanie polowe uwzględnia również inne zjawiska występujące w rzeczywistym obiekcie, takie jak efekt zbliżenia czy zjawisko naskórkowości.



Rys. 2. Prądy wirowe w elementach konstrukcyjnych obudowy rozdzielnic.

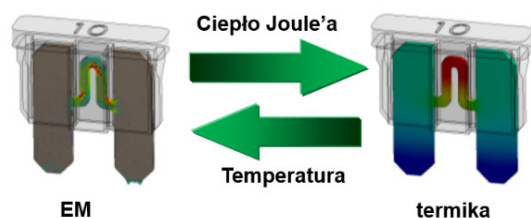
Na rysunku 3 przedstawiono wybrane zrzuty ekranu z symulacji elektromagnetycznej pokazujące wartości gęstości strat mocy w obudowie rozdzielnic w W/m^3 oraz wektory gęstości prądu w A/m^2 (prądy indukowane bezpośrednio w obudowie rozdzielnic). W drugim etapie symulacji obliczone w module elektromagnetycznym straty ciepła zostały użyte, jako dane wejściowe (źródła ciepła) do analizy termicznej CFD, w której rozwiązano konwekcję naturalną oraz promieniowanie. Analiza przepływowa wykonana została przy użyciu oprogramowania ANSYS Icepak. Narzędzie to bazuje na solverze innego, popularnego programu CFD – ANSYS Fluent. Podstawą

jego działania jest numeryczne rozwiązywanie równań transportu (zachowania).



Rys. 3. Gęstość strat mocy w W/m³ (skala logarytmiczna) w elementach rozdzielnic (lewy) oraz wektory gęstości prądów wirowych w obudowie (prawy)

W zdyskretyzowanej domenie rozwiązywane są w przybliżeniu równania ciągłości strugi, równania Naviera-Stokesa, czy równania zachowania energii cieplnej. W przeciwieństwie do modelu elektromagnetycznego model przepływowy uwzględniał pełną geometrię szafy, wraz z elementami stalowymi czy izolującymi. Stanowią one przeszkodę dla przepływającego powietrza oraz wpływają na termikę układu. Wszelkie elementy perforowane (przegrody z otworami, siatki itp.) zostały uwzględnione w formie odpowiedniego warunku brzegowego. Warunek ten generuje opór dla powietrza odwrotnie proporcjonalnie do procentowego udziału powierzchni otworów w płycie w stosunku do całkowitej jej powierzchni. Szafę obudowano również otoczeniem powietrza, tak aby dokładnie rozwiązać konwekcję wokół szafy.

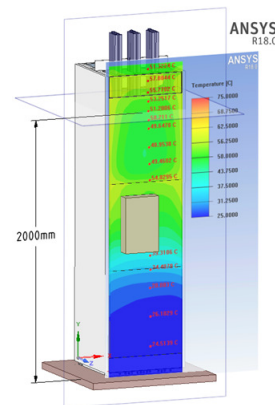


Rys. 4. Schemat analizy sprzężonej EM-CFD

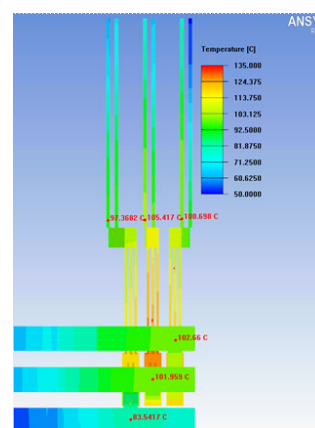
W celu uzyskania dokładniejszych wyników w analizie elektromagnetycznej parametry materiałowe miedzi zostały zdefiniowane w taki sposób, aby uwzględniały one zmianę wartości rezystywności od temperatury zgodnie ze wzorem:

$$\sigma = 1 / ((1 + 0,0039 * (T - 20)))$$

Wprowadzenie zależności rezystywności od temperatury w Maxwellu połączone z analizą CFD pozwala na wykonanie sprzężenia dwustronnego tj. obliczenie energii strat zamienianej na ciepło w modelu polowym są następnie przekazywane do Icepaka, gdzie na podstawie wartości obciążeń (rozpraszane ciepła), własności materiałowych oraz termicznych warunków brzegowych, otrzymujemy temperaturę dla poszczególnych elementów rozdzielnic.



Rys. 5. Rozkład temperatury na obudowie rozdzielnic podczas pracy - stan ustalony



Rys. 6. Rozkład temperatury na obudowie rozdzielnic podczas pracy

W kolejnym etapie wartości temperatur wyliczonych w Icepaku zostają przesłane do Maxwella,

a program na podstawie rozkładu temperatury w obiekcie przypisuje wartości rezystywności dla poszczególnych elementów obiektu. Przykładowy schemat ilustrujący ideę analizy sprzężonej pokazano na rysunku 4. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono rozkłady pól temperatury będące wynikiem analizy sprzężonej w programach Maxwell oraz Icepak.

3. Test termiczny

W celu weryfikacji modelu numerycznego został wykonany test termiczny według standardowej procedury opisanej w normie IEC 61439-1. Standard szczegółowo wyznacza maksymalne przyrosty temperatur w ściśle określonych miejscach testowanego modułu podczas obciążenia prądem znamionowym. Na rys. 7 przedstawiono stanowisko badawcze składające się z układu zasilającego: panel sterowania, trzy autotransformatory oraz główny transformator 3-fazowy, rozdzielnicę, układu pomiarowego składającego się z: termopar, przetworników analogowo-cyfrowych oraz komputera z oprogramowaniem do odczytu i analizy danych. Natomiast rys. 8 przedstawia przykład pomiaru termoparą miedzianych przyłączy klienta.



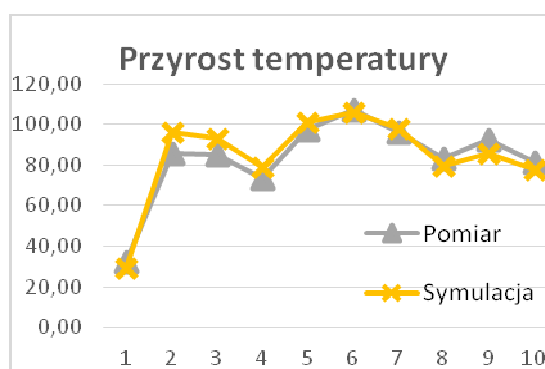
Rys. 7. Stanowisko pomiarowe

Typowe miejsca pomiarowe to między innymi terminale klienta, szyny miedziane, elementy izolacji, elementy obudowy, czy też terminale urządzeń elektrycznych, których warunki pracy są określone przez producenta. Przyrost temperatury musi być odniesiony do średniej temperatury otoczenia mierzonej po dwóch stronach badanej kolumny. Dodatkowo test powinien być przeprowadzony do ustabilizowania się temperatur tj. momentu, w którym przeciągu jednej godziny

zmiana temperatury we wszystkich punktach pomiarowych nie będzie większa niż 1 K [1].



Rys. 8. Termopara umieszczona na środkowej fazie przyłącza klienta



Rys. 9. Przyrosty temperatur w poszczególnych punktach pomiarowych oraz symulacji komputerowej

Na potrzeby badania moduł, którego głównym elementem jest wyłącznik powietrzny układ obciążono prądem o wartości skutecznej 2 kA z sieci o częstotliwości 50Hz. Wybrano 10 charakterystycznych punktów pomiarowych. Wyniki przyrostu temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych zestawiono na wspólnym wykresie wraz z wynikami otrzymanymi z symulacji komputerowej (Rys. 9).

4. Wnioski

W celu weryfikacji modelu numerycznego został wykonany test termiczny według standardowej procedury opisanej w normie IEC 61439-1. Standard ten szczegółowo wyznacza maksymalne przyrosty temperatur w rozdzielnicach. Uzyskane wyniki z symulacji komputerowej dobrze zbiegają się z wynikami eksperymentu. Drobne różnice mogą wynikać z niedoskonałej siatki numerycznej, uproszczeń geometrycznych lub niedokładnych modeli materiałowych. Najważniej-

szym celem analizy było osiągnięcie tego samego trendu przyrostu temperatur, który jest obserwowany podczas testu laboratoryjnego. Założenie to zostało zrealizowane. Temperatury na zewnętrznej obudowie rozdzielnic wahają się od 25 do 75°C - przy czym najwyższe temperatury występują na bocznych ścianach rozdzielnic m.in. w miejscach doprowadzeń szynoprzewodów. Zgodność przyrostów temperatur w 9 krytycznych lokalizacjach, tj. elementach miedzianych wyłącznika oraz przyłączy klienta jest na poziomie 95%. Takie rezultaty pozwalają na zastąpienie testów porównawczych poprzez symulację. Dają również podstawę do tego, by myśleć w przyszłości o zastąpieniu części testów weryfikacyjnych (obliczenia wymagają dużych zasobów systemowych), a co z tym się wiąże jeszcze lepsze odzwierciedlenie modelu rzeczywistego. Wykorzystanie symulacji komputerowej pozwala na optymalizację istniejących konstrukcji rozdzielnic w celu zwiększenia m.in.

oddawanie ciepła do otoczenia oraz wyeliminowanie miejsc, w których mamy do czynienia ze stagnacją powietrza. Pozwala ono również na znaczącą redukcję kosztów oraz skrócenie czasu projektowania rozdzielnic.

5. Literatura

- [1]. IEC 61439-1 Low-voltage switchgear and control assemblies – Part 1: General rules.
- [2]. ANSYS Documentation, ANSYS Inc.
- [3]. Materiały szkoleniowe: Obliczenia pól elektromagnetycznych w ANSYS Maxwell, MESco Sp. z o.o.

Autorzy

mgr inż. Artur Wiertek
Rockwell Automation, Katowice
mgr inż. Tomasz Kądziołka
mgr inż. Maciej Kryś
MESco Sp. z o.o.
ul. Górnicza 20a, 42-600 Tarnowskie Góry
info@mesco.com.pl