

Wojciech Piasecki¹, Marek Florkowski¹, Marek Fulczyk¹, Aleksander Gul²

ANALIZA MES ODDZIAŁYWAŃ ELEKTRODYNAMICZNYCH PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH ROZDZIELNICY ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie: W artykule zaprezentowano analizę sprzężoną (elektryczno-mechaniczną) oddziaływań przekładników prądowych w warunkach zwarcia trójfazowego dla przekładników prądowych zmodyfikowanej rozdzielniczy średniego napięcia ZS1 firmy ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH. Analizy dokonano metodą elementów skończonych (MES) przy użyciu programu ANSYS. Przedstawiony w artykule przykład ilustruje możliwość zastosowania oprogramowania ANSYS dla przypadku analizy elektromechanicznej urządzenia dla którego istnieje trójwymiarowy model CAD zbudowany przy użyciu narzędzia ProEngineer.

1. Wstęp

Oddziaływania elektrodynamiczne w aparatach elektrycznych stanowią zawsze poważny problem dla konstruktorów. Siły Lorentza działające na tory prądowe muszą być brane pod uwagę, w szczególności dla rozdzielnic średniego napięcia, w których odległości pomiędzy torami prądowymi są stosunkowo niewielkie natomiast prądy (a zwłaszcza prądy zwarciove) osiągają duże wartości. Najsilniejsze oddziaływania elektrodynamiczne mają miejsce w przypadku wystąpienia zwarcia. Wartość chwilowa prądu, który w warunkach zwarcia posiada składową harmoniczną i aperiodyczną może osiągnąć nawet 2,5-krotną wartość znamionowego prądu zwarciovego.

W czasie gdy nie istniały jeszcze narzędzia do analizy MES zagadnienia oddziaływań elektrodynamicznych, obliczenia prowadzić można było wyłącznie metodami analitycznymi. Ich zastosowanie wymagało ogromnych uproszczeń geometrii torów prądowych. Z tego powodu konstruowane urządzenia były często przewymiarowane w celu zapewnienia potrzebnego „marginesu bezpieczeństwa”. Rosnące wymagania dotyczące niewielkich rozmiarów rozdzielnic średniego napięcia stanowią wyzwanie dla konstruktorów ze względu na zwiększone oddziaływania elektrodynamiczne torów prądowych.

Obecnie komputerowe narzędzia modelowania i symulacji numerycznej są już powszechnie akceptowane w procesie projektowania i optymalizacji, zwłaszcza w przypad-

¹ ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków

² ABB ZWAR S.A., Żegańska 1, 04-713 Warszawa

kach gdy złożoność geometryczna nie pozwala na zastosowanie metod analitycznych. Możliwe są tu dwa sposoby wykorzystania narzędzi symulacyjnych: Pierwszy z nich polega na zamodelowaniu fragmentu analizowanego urządzenia (zwykle w dużym uproszczeniu) za pomocą narzędzi zawartych w pakiecie oprogramowania (moduł *preprocessor*). Drugie możliwe podejście polega na wykorzystaniu gotowego modelu 3D urządzenia, istniejącego już zwykle dzięki stosowaniu narzędzi CAD (np. Pro Engineer, CATIA) przez konstruktora. Pierwsza z wymienionych metod jest bardziej efektywna z punktu widzenia symulacji numerycznych, gdyż model urządzenia budowany jest wyłącznie pod kątem późniejszych symulacji. Druga z metod jest natomiast mniej czasochłonna z punktu widzenia pracy inżyniera, ponieważ raz stworzony model konstrukcyjny jest następnie wykorzystany do celów symulacji. Z punktu widzenia konstruktora, powtórne budowanie modelu urządzenia przy pomocy narzędzia *preprocessor* pakietu symulacyjnego jest nieefektywne czasowo.

W prezentowanym artykule przedstawiono praktyczne aspekty wykorzystania oprogramowania ANSYS do analizy oddziaływań elektrodynamicznych dla istniejącego modelu geometrycznego urządzenia zbudowanego przy użyciu programu ProEngineer.

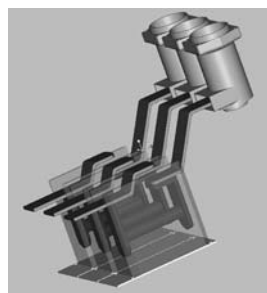
2. Przedmiot analizy

Analiza oddziaływań elektrodynamicznych została przeprowadzona dla przekładników prądowych zmodyfikowanej rozdzielnicy średniego napięcia ZS1 (ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH), w której odległości pomiędzy torami prądowymi zmniejszono z 210mm do 150mm [1]. Wnętrze rozdzielnicy ZS1 z widocznymi przekładnikami prądowymi pokazano na rysunku 1.

Z uwagi na to, że elementy uziemiające, widoczne na rysunku 1. są w czasie normalnej pracy rozdzielnicy otwarte i nie przewodzą prądu, zostały one wyłączone z modelu geome-



Rys. 1. Analizowane przekładniki prądowe



Rys. 2. Model geometryczny (ProEngineer)

trycznego. Uproszony w ten sposób model geometryczny (ProEngineer) przedstawiono na rysunku 2. Tory prądowe tworzą szyny miedziane wraz z zasilanymi przez nie uzwojeniami pierwotnymi przekładników prądowych. Półprzezroczyste elementy widoczne na rysunku 2. stanowią bloki żywicy epoksydowej, w której zalane są uzwojenia przekładników. Ze względu na to, iż prądy płynące w uzwojeniach wtórnych przekładników są niewielkie porównaniu z prądami uzwojeń pierwotnych (miedzianych prętów), uzwojenia wtórne zostały również wyłączone z modelu geometrycznego.

3. Procedura symulacji

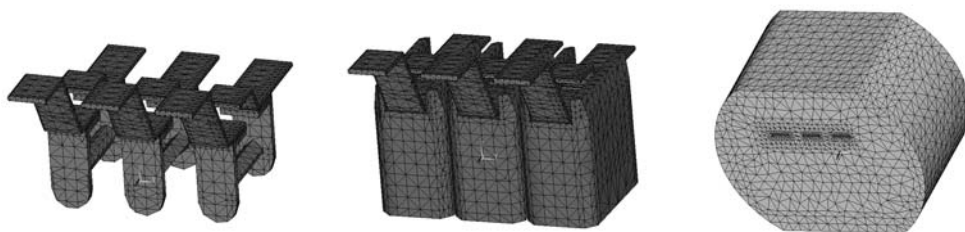
W celu obliczenia sił Lorentza działających na tory prądowe należy obliczyć zarówno rozkład gęstości prądu jak również pola magnetycznego. Z uwagi na to, że pole magnetyczne w obrębie każdego z torów jest efektem przepływu prądu przez wszystkie tory prądowe, rozkład pola magnetycznego musi zostać obliczony w pewnej ograniczonej objętości obejmującej całe analizowane urządzenie. W przypadku analizy wymaga to fizycznego zamodelowania owej objętości i pokrycia go siatką elementów objętościowych. Objętość taka musi zostać dodana do modelu geometrycznego. Jedynym parametrem fizycznym, który trzeba dla niej określić, jest przenikalność magnetyczna ($=1$, ze względu na to, że przestrzeń pomiędzy przekładnikami stanowi powietrze). Dla zachowania spójności modelu geometrycznego wszystkie elementy przekładników muszą zostać „wycięte” z dodanej objętości (powietrza). Dodatkowa objętość wymagana jest wyłącznie dla obliczenia rozkładu pola magnetycznego. Nie będzie ona zatem uwzględniana w późniejszych obliczeniach mechanicznych. Procedura mająca na celu obliczenie naprężeń i odkształceń wywołanych oddziaływaniem elektrodinamicznym dla istniejącego modelu geometrycznego urządzenia składa się z etapów: 1) przygotowania modelu (dodanie dodatkowej „objętości powietrza”, utworzenie siatki, zadanie warunków brzegowych i wymuszeń), 2) analizy magnetycznej oraz 3) analizy mechanicznej.

Z uwagi na to, że model geometryczny został utworzony przy użyciu programu ProEngineer, posiadającego również moduł służący do tworzenia siatki, należało zdecydować, czy przeniesiony do programu ANSYS ma zostać model geometryczny, czy też gotowa siatka. Wady i zalety obu możliwości były analizowane szczegółowo w [4].

Wybrana metoda polegała na przeniesieniu do programu ANSYS nie modelu geometrycznego, lecz gotowej siatki objętościowej utworzonej w programie ProEngineer. Ograniczeniem tej metody jest fakt, iż moduł ProMesh programu ProEngineer posiada możliwość generowania elementów objętościowych tylko w postaci elementów czworościennych. Jej zastosowanie umożliwia jednak uniknięcie problemów związanych z uszkodzeniem modelu geometrycznego [4].

3.1 Model

Model w postaci siatki elementów czworościennych został utworzony w programie ProEngineer i zapisany jako plik .ans. Powietrze zostało zamodelowane jako cylinder, obcięty z góry i z dołu w celu zredukowania liczby elementów. Rozmiar objętości powietrza był wynikiem kompromisu pomiędzy dokładnością obliczeń i wielkością modelu. Na rysunku 3. pokazano siatkę elementów tworzących a) tory prądowe, b) tory prądowe wraz z blokami żywicy oraz c) pełny model obejmujący objętość powietrza. Pełny model zawierał 112 415 elementów czworościennych. Z uwagi na to, że urządzenie nie posiada elementów ferromagnetycznych wybrano do analizy elementy typu SOLID 97 [2]. We wszystkich węzłach znajdujących się na powierzchni zewnętrznej objętości powietrza (granica modelu) zadany został warunek brzegowy równoległości strumienia magnetycznego do powierzchni.



Rys. 3. Model MES analizowanych przekładników.

3.2 Wymuszenie

Ponieważ celem analizy było sprawdzenie wytrzymałości mechanicznej przekładników, wybrano najgorszy możliwy przypadek, a więc zwarcia trójfazowego. W przypadku wystąpienia zwarcia trójfazowego wartości chwilowe prądów w poszczególnych torach prądowych są wynikiem nakładania się składowej okresowej i aperiodycznej [3]. Szczegółowa analiza przebiegów prądów zwarciovych pokazuje, że wartość maksymalna siły Lorentza dla aparatu o znamionowym prądzie skutecznym 31,5kA ma miejsce gdy wartości chwilowe prądów w torach prądowych A,B i C wynoszą odpowiednio 80kA, -60kA i -20kA. Takie wartości prądów muszą być zatem użyte jako wymuszenia do analizy magnetycznej.

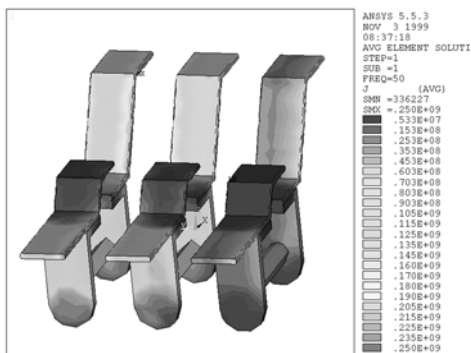
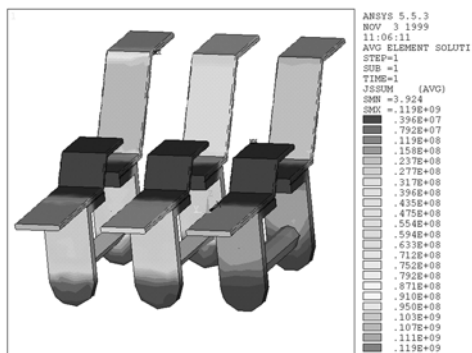
3.3 Etap 1: Analiza magnetyczna

Skoro znane są wartości chwilowe prądu, najprostrze podejście polega na wykonaniu analizy statycznej dla zdanych wartości prądu. Wówczas zaniedbuje się efekt niejednorodnego rozkładu prądu związanego ze zjawiskiem naskórkowości. Rozkład gęstości prądu dla analizy statycznej pokazano na rysunku 4. Analiza magnetostatyczna umożliwiła obliczenie rozkładu składowych x,y,z siły Lorentza. W wyniku sumowania składowych y sił dla elementów stanowiących poszczególne tory prądowe uzyskano wypadkowe wartości maksymalnej siły Lorentza. Obliczone w ten sposób wartości maksymalne składowej y dla poszczególnych torów prądowych wynoszą odpowiednio: -3820N, 4270N i -557N.

Drugą możliwą metodą analizy jest zastosowanie analizy harmonicznej z wykorzystaniem obliczonych wartości prądów jako wartości szczytowych przebiegów harmonicznnych. Daje to możliwość uwzględnienia efektu naskórkowości. W celu zbadania wpływu efektu naskórkowości przeprowadzono zatem analizę harmoniczną dla częstotliwości 50Hz. Na rysunku 5. pokazano uzyskany rozkład gęstości prądu. Obliczone w podobny jak dla analizy statycznej sposób siły Lorentza wynoszą odpowiednio -3980N, 4350N i -457N. Różnice pomiędzy wynikami analizy statycznej i harmonicznej wynoszą 160N, 80N i 100N. Są one mniejsze niż 4% wartości maksymalnej siły działającej na środkowy tor prądowy.

3.4 Etap 2: Analiza mechaniczna

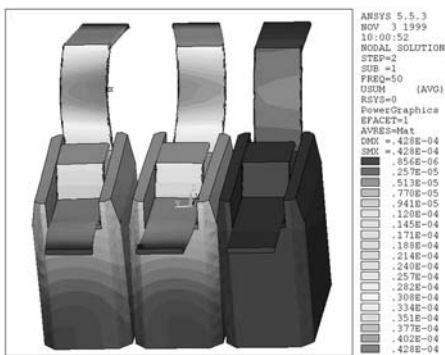
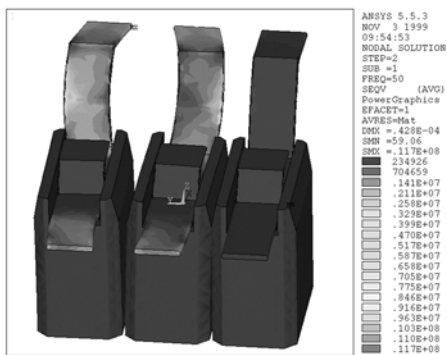
W celu przeprowadzenia analizy mechanicznej w modelu uwzględnione muszą być wyłącznie elementy tworzące tory prądowe oraz bloki żywicy epoksydowej. Elementy tworzące objętość powietrza zostały zatem usunięte z modelu. Dla analizy mechanicznej



Rys. 4. Rozkład gęstości prąd (Analiza statyczna) Rys. 5. Rozkład gęstości prądu (analiza harmoniczna)

zastosowano elementy typu SOLID 45 [2]. Warunki brzegowe polegające na unieruchomieniu węzłów siatki zadane zostały na płaszczyznach stanowiących podstawy bloków żywicy a ponadto na zakończeniach szyn prądowych.

Wymuszania w postaci sił Lorentza dla poszczególnych węzłów zostały przeniesione z wyników analizy magnetycznej (pliki .rmg oraz .rst). Dla żywicy epoksydowej przyjęto moduł Younga o wartości 1×10^{10} Pa, natomiast dla części miedzianych zastosowano wartość $11,72 \times 10^{10}$ Pa. Współczynniki Poissona przyjęte do obliczeń miały wartości 0.4 dla żywicy i 0.36 dla miedzi. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 6 (naprężenia von Mises'a) i rysunku 7 (odkształcenia). Przedstawione na rysunkach deformacje zostały powiększone 655-krotnie w stosunku do rzeczywistych odkształceń. Wartość maksymalna naprężenia wynosi 0.117×10^8 Pa a maksymalne odkształcenie 0.043mm. Analiza wykazała więc, że zarówno naprężenia mechaniczne, jak również odkształcenia mające miejsce w przypadku wystąpienia zwarcia trójfazowego mają wartości niewielkie, znacznie poniżej wytrzymałości zastosowanych materiałów.



Rys. 6. Rozkład naprężeń (von Mises)

Rys. 7. Odkształcenia mechaniczne (powiększone 655x)

5. Dyskusja

Głównym celem przedstawionych prac była ocena przydatności programu ANSYS do analizy oddziaływań elektrodynamicznych w aparatach elektrycznych. Analiza przeprowa-

dzona została przy użyciu praktycznego przykładu przekładników prądowych zmodyfikowanej rozdzielniczy średniego napięcia ZS-1. Model geometryczny urządzenia wykonany przy użyciu programu ProEngineer został wykorzystany do obliczeń metodą elementów skończonych. Z punktu widzenia efektywności najlepszym podejściem okazało się przeniesienie do programu ANSYS nie modelu geometrycznego lecz utworzonej w programie ProEngineer siatki elementów objętościowych. Pozwoliło to na uniknięcie problemów związanych z naprawą modelu uszkodzonego na skutek przenoszenia za pomocą formatu IGES.

Zarówno analiza statyczna oraz analiza harmoniczna pozwoliły na obliczenie wartości sił Lorentza dla poszczególnych torów prądowych. Pokazano ponadto, że różnica w wartościach sił obliczonych metodą statyczną i harmoniczną były poniżej 4% wartości maksymalnej. Oznacza to, że analiza statyczna wymagająca mniej czasu i pamięci komputera może być z powodzeniem stosowana w podobnych przypadkach. Warto w tym miejscu wspomnieć, że siły elektrodynamiczne obliczone analitycznie dla trzech równoległych przewodów z prądem (długość, odległości oraz prądy takie same jak dla analizowanego przykładu) wynoszą odpowiednio: -6320N, 6770N i -453N. Maksymalna siła działająca na przewód środkowy jest o 35% większa niż obliczona przy zastosowaniu metody elementów skończonych dla prawdziwego modelu geometrycznego przekładnika.

Przestrzeń dyskowa zajęta w czasie analizy harmonicznej wynosiła 3,5GB, a analiza trwała 3 godziny (obliczenia przeprowadzono na komputerze 2-procesorowym Silicon Graphics Origin 2000). Analiza magnetostatyczna wymagała 2GB przestrzeni dyskowej i trwała poniżej godziny.

Literatura

- [1] **Gul A.:** *Kryterium oceny zdolności wyłączania prądów zwarciovych przez wyłączniki próżniowe, w warunkach podwyższonej stromości napięcia powrotnego i asymetrii prądu wyłączeniowego*, Ph.D. Thesis, Warszawa, 1997
- [2] NSYS User's manual, rev. 5.4
- [3] **Kryński J.:** *Elektryczne aparaty rozdzielcze*, PWN, 1964, pp.170-176
- [4] **Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M.:** *Coupled electro-mechanical analysis of MV current transformers*, ABB Corporate Research internal report, Krakow, 1999

FEM ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC INTERACTIONS OF MV CURRENT TRANSFORMERS

In the present paper coupled electro-mechanical analysis of Lorentz interaction between current transformers of modified ZS1 Medium Voltage Switchgear (ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH) is presented. The above design case was used to explore possibilities of using ANSYS to solve electro-mechanical interactions using predefined 3D physical model in ProEngineer CAD/CAM software.