

Rozprawa doktorska

Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych

Łukasz Knypiński

Streszczenie

Celem rozprawy jest pogłębienie teorii oraz udoskonalenie procedur modelowania silników o magnesach trwałych w ujęciu polowym.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów oraz wykazu literatury i liczy 200 stron.

W rozdziale pierwszym przedstawiono cel badań polegający na połączeniu efektywnego numerycznego (polowego) modelu silnika, ze skutecznie i stabilnie działającą procedurą optymalizacyjną.

Rozdział drugi zawiera przegląd i analizę prezentowanych w literaturze współczesnych maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi. Krótko scharakteryzowano w nim wady i zalety proponowanych rozwiązań.

W rozdziale trzecim scharakteryzowano najczęściej stosowane modele matematyczne zjawisk elektromagnetycznych, to jest modele o parametrach skupionych. Omówiono ogólne zalecenia dotyczące wybranych aspektów projektowania silników o magnesach trwałych. Wskazano ograniczenia wynikające z przyjmowanych założeń upraszczających.

Zaproponowane przez autora procedury do analizy zjawisk statycznych i zjawisk nieustalonych z wykorzystaniem metody elementów skończonych przedstawiono w rozdziale czwartym. Opracowano zmodyfikowany, efektywny algorytm do rozwiązywania nieliniowych układów równań modelu polowo-obwodowego, bazujący na metodzie Raphsona-Newtona. Zaprezentowany algorytm umożliwia modelowanie zjawisk polowych w stanach dynamicznych (nieustalonych pod względem mechanicznym), to jest w stanach w których w układzie występują ruch wirnika ze zmienną, nieznaną „a priori” prędkością obrotową.

Stworzone środowisko komputerowe składa się z dwóch modułów: modułu optymalizacyjnego oraz modułu zawierającego matematyczny model zjawisk analizowanej maszyny. Zagadnienia związane z połączeniem głównych bloków, to znaczy kompleksowego numerycznego modelu obiektu z efektywnie działającą procedurą optymalizacyjną są przedmiotem rozdziału piątego. Opracowane środowisko umożliwia także łączenie modułu zawierającego oprogramowanie własne z modułem wykorzystującym oprogramowanie komercyjne. Jest to praktyczne rozwiązanie, szczególnie przy wykorzystaniu środowiska komercyjnego do odwzorowania polowych zjawisk elektromagnetycznych. W wyniku wykonania wielu obliczeń testowych stwierdzono, że w procesie optymalnego projektowania silników magnetoelektrycznych należy stosować algorytmy niedeterministyczne. Na podstawie zrealizowanych i prezentowanych w rozdziale piątym obliczeń stwierdzono, że najbardziej efektywne w optymalnej syntezy silników magnetoelektrycznych z wykorzystaniem modeli polowych są algorytmy genetyczne oraz metoda roju cząstek. Autor, zarówno w przypadku algorytmu genetycznego, jak również metody roju cząstek stosował różne proponowane

w literaturze modyfikacje i udoskonalenia, a także zaproponował własne modyfikacje. Wszystkie modyfikacje zwiększają oczywiście czas obliczeń w jednej iteracji modułu optymalizacyjnego. Umożliwiają jednak osiągnięcie optimum przy mniejszej liczebności pokolenia lub roju i mniejszej liczbie pokoleń (kroków czasowych).

Opracowano oryginalną procedurę uwzględniania ograniczeń w algorytmach genetycznych z wykorzystaniem funkcji kary zewnętrznej. W procedurze iteracje związane z generowaniem kolejnych pokoleń w algorytmie genetycznym są sprzężone z iteracjami dotyczącymi narastającej kary zewnętrznej. Zastosowano sigmoidalną transformację funkcji kary zapewniającą dodatnią wartość zmodyfikowanej funkcji celu.

W rozdziale szóstym zaprezentowano algorytmy i wyniki badań dotyczących wykorzystania algorytmu genetycznego do optymalizacji: wirnika PMSM z magnesami łukowymi z uwzględnieniem momentu zaczepowego, wirnika PMSM z uwzględnieniem współczynnika THD zawartości harmonicznych w przebiegu siły elektromotorycznej, wirnika PMSM z uwzględnieniem współczynnika THD i momentu zaczepowego, wirnika PMSM z hybrydowym układem wzbudzenia.

Najważniejsze osiągnięcie autora w zakresie zaleceń co do metodyki definiowania zadania optymalizacji, jest sformułowana w rozdziale szóstym teza dotycząca doboru cząstkowych kryteriów w funkcji kompromisowej. Wykazano, że przy niewłaściwym wyborze kryteriów algorytm optymalizacji może działać wadliwie. Dotyczy to przypadku gdy poszczególne kryteria mają znacznie zróżnicowaną czułość na zmiany parametrów decyzyjnych. W przypadku maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi, zmiana przyjętej jako parametr decyzyjny względnej rozpiętości magnesu o kilka procent może generować kilkuprocentowe zmiany użytecznego momentu elektromagnetycznego, przy jednoczesnych zmianach momentu zaczepowego o kilkaset procent. Algorytm jest zbyt czuły na moment zaczepowy, co wypacza wynik lub zakłóca proces optymalizacji wydłużając wielokrotnie czas obliczeń. Dlatego zaproponowano dekompozycję zadania optymalizacji na etapy, w taki sposób by uniknąć łączenia w jedną funkcję kompromisową składników o charakterze unimodalnym i multimodalnym, a w szczególności by uniknąć łączenia członów o bardzo różnej czułości na zmiany poszczególnych parametrów decyzyjnych.

W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki obliczeń i wynikające z nich wnioski dotyczące formułowania i rozwiązywania zadań optymalnej syntezy silników typu BLDC. W procesie optymalnej syntezy wykorzystano algorytm genetyczny. Porównano procesy optymalizacji silnika BLDC dla dwóch różnych strategii: (a) z kompromisową, wielokryterialną funkcją celu, (b) z dołączoną do algorytmu genetycznego procedurą kary zewnętrznej za przekroczenie ograniczeń. Przeprowadzono również wnikliwą analizę dotyczącą optymalnego doboru liczby osobników w pojedynczym pokoleniu. Zaproponowano liczebność pokolenia zapewniająca kompromis pomiędzy jakością otrzymywanych wyników, a złożonością czasową procesu optymalizacyjnego.

W ostatnim, ósmym rozdziale przedstawiono wnioski z przeprowadzonych w ramach rozprawy badań.