

dr hab. inż. Damian Mazur, prof. PRz
Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Rzeszowska
tel. (17) 743 2469, mazur@prz.edu.pl

Rzeszów, 20.07.2020 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pani mgr inż. **Natalii Radwan-Pragłowskiej** na temat:

„Modelowanie generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi”,

wykonanej na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Węgiel, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK

Recenzję wykonano na podstawie decyzji Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika przy Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 4 czerwca 2020 r., nr pisma E-0/4/175/2020

1. Przedmiot rozprawy

Wybór tematyki rozprawy należy uznać za zasadny oraz wymagający wiedzy z zakresu elektrotechniki i automatyki, a w szczególności maszyn elektrycznych. Rozprawa stanowi wynik prac badawczych i eksperymentalnych, prowadzonych przez mgr. inż. Natalię Radwan – Pragłowską, koncentrujących się na modelowaniu interakcji harmonicznym przestrzennym w maszynach tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi. Jako reprezentatywną wybrano klasę trójfazowych generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi o symetrycznej budowie, co nie ogranicza jednak możliwości kreowania modeli z użyciem przedstawionej metodyki dla przypadków maszyn z niesymetriami wewnętrznymi uzwojeń oraz obwodu magnetycznego. W pracy przedstawiono metodykę modelowania i wyniki badań trzech modeli generatorów tarczowych: model matematyczny (obwodowy), polowy i laboratoryjny. Wykonano analizy porównawcze, weryfikujące poprawność wykonanych obliczeń numerycznych i symulacyjnych.

W pracy została przedstawiona metodyka wyznaczania pola magnetycznego w obwodzie magnetycznym maszyny, stwarzająca szansę analitycznego określenia zależności energetycznych oraz charakterystyk uzwojeń. W celu zapisu równań modeli matematycznych wykorzystano formalizm Lagrange'a, definiując zmodyfikowaną funkcję ko-energii oraz charakterystyki uzwojeń. Szczególna uwaga zwrócona została także na takie przetworzenie równań modeli maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi, aby było możliwe jakościowe określenie właściwości maszyny w stanach ustalonych już na podstawie równań, bez konieczności ich ilościowego rozwiązywania.

Rozwiązania tarczowych generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym mogą być przykładem tych nietypowych konstrukcji, stąd też problematyka modelowania tej klasy maszyn jest istotnym zagadnieniem. W przypadku konstrukcji bezrdzeniowej oczywistą zaletą jest brak powstawania momentów zaczepowych. Ponadto z punktu widzenia przetwarzania energii przy małej prędkości obrotowej możliwe jest opracowanie konstrukcji bez stosowania przekładni pomiędzy turbiną i generatorem.

2. Cel, zakres i układ pracy

Rozprawa doktorska liczy 138 stron, łącznie ze spisem treści, indeksem oznaczeń, skrótów i terminów obcojęzycznych, bibliografią oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Praca składa się z 8 rozdziałów, a bibliografia zawiera 69 pozycji, w tym 2 prac autorskich i 2 prac współautorskich.

Pierwszy rozdział zawiera przedmowę do niniejszej pracy. Drugi rozdział stanowi wprowadzenie i przedstawienie przedmiotu oraz zakresu pracy, obecny stan wiedzy na temat generatorów tarczowych z magnesami trwałymi oraz omówienie motywacji wyboru tematu pracy. Rozdział drugi to również cel i przedstawienie zawartości pracy. Rozdział trzeci niniejszej pracy przedstawia istniejące rozwiązania konstrukcyjne generatorów o strumieniu osiowym, wzbudzanych magnesami trwałymi. Znajdują się w nim również rozważania dotyczące polepszenia wybranych parametrów AFPMG, w oparciu o analizy polowe, wykonane w środowisku symulacyjnym ANSYS Maxwell, na podstawie których wybrano konstrukcje generatorów do dalszych rozważań. W rozdziale czwartym znajduje się omówienie obwodowych modeli matematycznych trójfazowych generatorów AFPMG. Kolejne podrozdziały przedstawiają analityczny rozkład pola magnetycznego i modele generatorów dla wybranych w poprzednim rozdziale rozwiązań konstrukcyjnych. Rozdział piąty to przedstawienie modeli matematycznych trójfazowych generatorów AFPMG dla stanu ustalonego. Znajduje się tu zapis równań modelu generatora w składowych symetrycznych i model interakcji harmonicznym przestrzennych. W tym rozdziale zawarta została również uproszczona struktura modelu, w celu nawiązania do klasycznych modeli maszyn elektrycznych. Rozdział szósty dotyczy analiz polowych, wykonanych przy użyciu metody elementów skończonych oraz obliczeń analitycznych. Kolejne podrozdziały zawierają porównanie rezultatów otrzymanych z obliczeń FEM oraz obliczeń analitycznych. Rezultaty zostały przedstawione dla czterech wybranych konstrukcji AFPMG. Rozdział siódmy to weryfikacja przedstawionych w poprzednich rozdziałach modeli generatora z magnesami trwałymi poprzez analizę badań laboratoryjnych. Pomiary zostały porównane z obliczeniami analitycznymi i polowymi. W rozdziale ósmym zebrane zostały wnioski wynikające z niniejszej pracy oraz przedstawiono podsumowanie przeprowadzonych rozważań. Następnie umieszczono dodatek, stanowiący uzupełnienie pracy. Zakończenie rozprawy stanowi spis literatury.

3. Merytoryczna ocena pracy

Celem pracy było:

- Zaproponowanie wielowariantowych obwodowych modeli generatorów, wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznego przestrzennego rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń,
- Doświadczalna weryfikacja tych modeli poprzez zbudowanie prototypów i badania laboratoryjne,
- Opracowanie metodyki tworzenia modeli matematycznych i ich weryfikacji celem udoskonalenia procesu projektowania AFPMG.

Cel pracy zrealizowano poprzez:

- zidentyfikowanie obszarów badań maszyn axialnych i ich właściwości
- przeprowadzenie analizy możliwości i dokonanie oceny przydatności i znaczenia określonych typów maszyn axialnych
- opracowanie modeli maszyn axialnych i ich porównanie
- opracowanie wytycznych dotyczących śledzenia interakcji harmonicznego przestrzennego rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń oraz dokonanie badań tych interakcji
- opracowanie i scharakteryzowanie zasad i czynników, istotnych w badaniu wielowariantowych obwodowych modeli generatorów, wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym oraz przeprowadzenie tych badań

Poprzez zrealizowanie celu pracy udowodniono tezę, że

„Istnieje możliwość utworzenia obwodowych modeli generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznego przestrzennego rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń”.

Cel pierwszy.

W pracy analizowano 4 konstrukcje generatora. Różnice między nimi polegały na obecności lub braku występowania rdzeni żelaznych wewnątrz cewek, oraz prostym lub skośnym ustawieniu magnesów trwałych na tarczach wirnika.

Tworzone dla tak wybranych przykładów konstrukcyjnych modele matematyczne (formuły analityczne) różniły się względem siebie tym że:

1. W przypadku modelu z magnesami skośnymi i bez rdzeni w cewkach bazowy model dla magnesów prostych (opisany wcześniej przez Autorkę oraz zawarty w pracach Prof. T. Węgla) został zmieniony tak że:
 - a. przesunięto początek układu współrzędnych do środka magnesu
 - b. skos magnesu uwzględniono przez wprowadzenie kąta skosu α (poniżej równania 4.55)
2. W przypadku występowania w generatorze rdzeni żelaznych fakt ten uwzględniono zmieniając w modelu bazowym funkcję permeancji jednostkowej (przenikalność magnetyczna ośrodka) na funkcję typu sygnał prostokątny, którą następnie uwzględniono w modelu harmonicznego poprzez jej rozkład w szereg Fouriera.

3. W przypadku konstrukcji z rdzeniami i magnesami skośnymi model stworzono poprzez wprowadzenie do modelu bazowego obu wymienionych wcześniej modyfikacji.

W dalszej części realizacji celu pierwszego pracy (dotyczącego wielowariantowości prezentowanych modeli matematycznych) kolejne modele utworzono poprzez narzucenie na uprzednio przedstawione modele następujących założeń upraszczających:

1. Uwzględniono jedynie podstawowe harmoniczne prądów oraz rozkładu przestrzennego pola magnetycznego w maszynie – model uproszczony.
2. Wprowadzono w modelu uproszczonym formuły pozwalające na analizę przypadku współpracy generatora z 6-cio pulsowym prostownikiem niesterowalnym.

Cel drugi.

Odnosnie do realizacji celu drugiego, weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń nie budzi zastrzeżeń.

Cel trzeci.

Jeśli chodzi o samą metodykę tworzenia modeli matematycznych to polegała ona na:

1. wprowadzeniu do modelu bazowego poprawek dotyczących ułożenia magnesów i obecności rdzeni (jeśli to konieczne) i wyznaczeniu funkcji rozkładu pola magnetycznego oraz na tej podstawie współczynników sprzężeń magnetycznych
2. zapisaniu równań obwodowego modelu maszyny synchronicznej utworzonego na bazie teorii Lagrange'a
3. przekształceniu tak otrzymanego modelu do układu składowych symetrycznych
4. rozwiązaniu równań modelu dla kolejnych uwzględnianych harmonicznych rozkładu przestrzennego pola magnetycznego oraz prądu.
5. Opcjonalnie wprowadzaniu wymienionych wcześniej założeń upraszczających.

W mojej ocenie twierdzenie Autorki iż zaprezentowane metody nie mają do końca charakteru ogólnego i dadzą się zastosować w procesie optymalizacji konstrukcji maszyn tarczowych z magnesami trwałymi są do dyskusji. Autorka stwierdza iż w klasie maszyn tarczowych znajdują się również maszyny o poprzecznym przepływie pola magnetycznego (TFM) do których wyniki te nie w pełni mają odniesienia.

Jednakże, rezultaty przeprowadzonych badań mają zastosowanie praktyczne i mogą zostać wykorzystane przez projektantów branży maszyn elektrycznych, a w szczególności projektantów i integratorów systemów związanych z energetyką wiatrową bądź motoryzacyjną.

4. Szczegółowe uwagi formalne i merytoryczne

Układ redakcyjny pracy jest przejrzysty i logiczny, co znakomicie ułatwia jej lekturę. Wątpliwości nie budzi również strona językowa. W pracy występują pojedyncze błędy, głównie edytorskie, które nie mają istotnego wpływu na jakość pracy.

Wnikliwa analiza pracy nasuwa kilka krytycznych uwag i pytań. Uwagi te wskazują raczej kierunki dalszych badań, związanych bezpośrednio z tematyką poruszaną w pracy doktorskiej. Nie są argumentami dyskredytującymi osiągnięcia Doktorantki.

Uwagi krytyczne:

1. Brak jest informacji na temat złożoności obliczeniowej prezentowanych metod, natomiast mówi się o ich praktycznym wykorzystywaniu we wspomaganiu konstrukcji, w kontekście czego ma to istotne znaczenie.
2. Oceny otrzymanej dokładności powinny być zrealizowane w bardziej wymierny sposób. (można by zastosować jakąś obiektywną wielkość np. względną normę L2, zamiast określić "niemal idealnie" i "bardzo dobrze"

Należy podkreślić, że powyższe uwagi nie mają wpływu na moją wysoką merytoryczną ocenę pracy.

Pytania dyskusyjne:

1. Pod koniec rozdziału (str. 21) Autorka stwierdza że wariant ze skosem magnesów "wydaje się być konstrukcją optymalną" nie podaje jednak względem jakiego kryterium ani też na jakiej podstawie tak wnosi.
2. Zaprezentowane w rozdziale czwartym metody analityczne są mało dokładne dla maszyny bezrdzeniowej i konieczne jest rozwijanie modelu analitycznego do 2D (str. 25). Autorka uznała średnie rozbieżności na poziomie 10% i maksymalne na poziomie 20% za dokładność satysfakcjonującą. Biorąc to pod uwagę i uwzględniając, że te metody nastroczają trudności obliczeniowych z uwagi na dużą liczbę rozwinięć w szeregi Fouriera, możemy odnieść się do tego krytycznie.

3. na stronie 30

Formułując funkcję "lambda" przyjęto że przenikalność magnetyczna wewnątrz maszyny bezrdzeniowej jest odwrotnie proporcjonalna do długości linii sił pola. To jest przecież zależne od ośrodka (czy magnes czy płyta czy powietrze), więc w jaki sposób jest to tutaj uwzględniane? Jakie znaczenie ma wartość referencyjna funkcji 'lambda' i skąd się ta wartość wzięła. W dalszej części (str. 33 i 34) pojawia się założenie że magnesy nie zmieniają szerokości na promieniowym wymiarze maszyny, a bardzo często tak nie jest. Pytanie: Jak w prezentowanych tu metodach uwzględnić taką zmienność?

4. Strona 41

Autorka twierdzi że w przypadku obecności rdzeni efekt osłabienia pola magnetycznego na krawędziach traci znaczenie. Rozumiem że jest to związane z poprawą przenikalności magnetycznej, tym niemniej w pracy brak jest wyników potwierdzających że faktycznie można

przyjąć $k_e = 1$. Według mnie brak też informacji na temat tego jak dobór 'ke' wpływa na dokładność wyznaczania wartości strumienia sprzężonego od magnesów.

5. Rozdział 6 zawiera zestawienia wyników FEM 3D oraz obliczeń analitycznych.

Można by tu zwrócić uwagę na brak szczegółowych informacji dotyczących symulacji 3D (a więc jaki błąd energii przyjęto, czy sprawdzono jak jego wielkość wpływa na błąd energii, jakiej użyto siatki i ilu iteracji wymagało osiągnięcie zbieżności) Są to informacje dodatkowe ale pozwalały by orientacyjnie ocenić złożoność obliczeniową i dokładność symulacji FEM.

Ponadto porównując wyniki Autorka jest mało precyzyjna (używa określeń typu "niemal idealnie się pokrywają") W moim przekonaniu należałoby użyć jakiejś wymiernej oceny np. obliczyć wartości norm z błędów (różnic).

Należałoby czymś poprzeć stwierdzenie Autorki że zbieżność wyników (Analitycznych z FEM 3D) "jest na zadowalającym poziomie".

5. Ogólna ocena rozprawy i wniosek końcowy

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

- opracowanie modeli analitycznych, przeprowadzenie badań symulacyjnych w oparciu o opracowane modele analityczne oraz oparte na obliczeniach z wykorzystaniem programu Ansys-Maxwell - pozwoliły na wypracowanie istotnych wniosków, które mogą być przydatne dla projektantów
- porównania zawartości wyższych harmonicznych w przebiegach indukowanych napięć fazowych dla czterech modeli trójfazowej konstrukcji AFPMG
- zbudowanie rzeczywistych modeli generatorów poprzez zestawienie dwóch tarcz wirnika - weryfikację eksperymentalną przeprowadzono dla stanu biegu jałowego oraz dla stanu obciążenia, porównując najważniejsze parametry elektromechaniczne

Doktorantka wykazała się umiejętnością poprawnego wyboru i sformułowania naukowego celu pracy. Następnie logicznie i konsekwentnie, z dobrą znajomością zagadnienia, cel ten zrealizowała.

Uwzględniając odnotowane oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze oraz walory poznawcze rozprawy, a także to, że przedstawione uwagi nie podważają jej zasadniczych wartości, stwierdzam, że **recenzowana rozprawa mgr. inż. Natalia Radwan – Pragłowska spełnia wymagania obowiązującej Ustawy**. Wnoszę do Rady Naukowej dyscypliny „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika” Politechniki Krakowskiej o przyjęcie pracy oraz dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

Damian Męć