

dr hab. inż. Marek Jasiński, prof. uczelni  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny  
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej  
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

Warszawa, 27.XI.2019 r.

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Dla Rady Wydziału Elektrycznego, Politechniki Wrocławskiej

Tytuł rozprawy: **„Operation and faults analysis of energy-saving permanent magnet synchronous generator for small wind turbines”**

Autor rozprawy: **mgr inż. Roberto Eduardo Quintal Palomo**

Promotor: dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, prof. uczelni;

Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Gwoździwicz.

**Recenzja przygotowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej,  
prof. dr. hab. inż. Waldemara Rebizanta (pismo W-5/1451/2019 z dn. 30.IX.2019 r.)**

#### **1. Wstęp i aktualność tematyki**

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Roberto Eduardo Quintal Palomo „*Operation and faults analysis of energy-saving permanent magnet synchronous generator for small wind turbine*” („*Analiza pracy i uszkodzeń energooszczędnego generatora synchronicznego z magnesami trwałymi do małej elektrowni wiatrowej*”) jest napisana w języku angielskim, liczy 128 stron i jest poświęcona projektowaniu, modelowaniu i konstrukcji maszyny z wbudowanymi magnesami trwałymi (IPM) o niestandardowym ułożeniu W-W. Autor rozpatruje jej aplikację w małej elektrowni wiatrowej (MEW) wykorzystując różne topologie przekształtników tj. diodowy oraz tranzystorowy sterowany za pomocą metody połowo zorientowanej (FOC). Autor, przedstawił ciekawe porównanie wyników badań symulacyjnych, co-symulacyjnych z wybranymi wynikami eksperymentalnymi wykonanego przez siebie prototypu maszyny IPM. Przeprowadził analizę uzyskania wysokiej sprawności prądnicy, przy zachowaniu jak najmniejszych zniekształceń prądu stojana. Pokazał w wynikach co-symulacyjnych wpływ rozmagnesowania magnesów i wskazał możliwość poprawienia niezawodności układu dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu maszyny elektrycznej.

Wybrana tematyka jest bardzo aktualna, wpisuje się nie tylko w potrzeby nauki ale również w potrzeby rynku, który wykazuje wysokie zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE) oraz możliwością wysokosprawnego pozyskiwania energii z wiatru o stosunkowo niskiej prędkości z jakim mamy do czynienia na terenie Polski. NCBiR właśnie ogłosił otwarty konkurs na podobny układ

pozyskiwania i magazynowania energii wiatru w warunkach gospodarstwa domowego, w którym nagroda wynosi 1mln PLN. Powyższe wyraźnie potwierdza, że wybrana tematyka jest bardzo aktualna. Niniejsza praca w mojej ocenie wprowadza oryginalne i ciekawe elementy zagadnień związanych z projektowaniem maszyn elektrycznych, kluczowego elementu w OZE jak i w elektro-mobilności.

### **Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy**

Autor rozprawy na stronie 11 sformułował dwie tezy pracy:

“

- *First:*

*It is possible to design an energy-saving permanent magnet synchronous generator for small wind turbines working stable in opened and closed control structure. Application of a voltage source converter, with vector control methods, in the small wind turbine with PMSG provides a more efficient operation and lower distortion of the stator current than open control system.*

- *Second:*

*It is possible to achieve stable operation of an energy-saving permanent magnet synchronous generator for small wind turbine during permanent magnets faults in open and closed system.*

”

Wyznaczył również dwa cele główne, które pozwoliły mu na udowodnienie obu postulatów. Za pierwszy cel postawiono zaprojektowanie wysokosprawnej prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi i jej zbadanie w wybranych warunkach pracy. Jako drugi cel zdefiniowano przeprowadzenie badań w warunkach awaryjnych i bezpośrednio po awarii. Autor dołożył wszelkich starań aby konsekwentnie dążyć do zrealizowania powyższych zadań, i udowodnienia tez posługując się dostępnymi narzędziami naukowymi: teoretyczno-analitycznym, modelami i badaniami symulacyjnymi, co-symulacyjnymi oraz eksperymentalnymi.

Praca zawiera: stronę tytułową, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, dziesięć rozdziałów, dwa załączniki oraz bibliografię.

Rozdział 1, wprowadzający, przedstawia motywację, stan wiedzy w zakresie symulacji, co-symulacji i modelowania PMSG oraz tezy i cel rozprawy.

Rozdział 2 omawia zagadnienia związane z projektowaniem PMSG ze szczególnym uwzględnieniem jego wysokiej sprawności. Autor porównuje rozmieszczenie magnesów symetryczne i asymetryczne oraz mechaniczne aspekty konstrukcji wirnika.

Rozdział 3 traktuje o zjawisku rozmagnesowania magnesów trwałych i podstawowych założeniach wyjściowych.

Rozdział 4 przybliży zagadnienia związane z aplikacją opracowanej prądnicy w MEW.

Rozdział 5 poświęcony jest sterowaniu i topologii przekształtników w MEW, przypomina zagadnienia związane ze śledzeniem punktu maksymalnej mocy (MPPT).

Rozdział 6 przedstawia i konfrontuje symulacje i podstawowe co-symulacje PMSG z prostownikiem diodowym i przekształtnikiem podwyższającym napięcie.

Rozdział 7 przypomina podstawy i przedstawia wybrane wyniki badań co-symulacyjnych układu z przekształtnikiem tranzystorowym sterowanym za pomocą FOC.

Rozdział 8 stanowi ciekawe przedstawienie wyników badań pracy PMSG po wystąpieniu częściowego rozmagnesowania magnesów trwałych.

Rozdział 9 jest próbą przedstawienia pracy MEW z PMSG sterowanym za pomocą FOC w stanach pracy z rozmagnesowanymi magnesami trwałymi.

Rozdział 10 stanowi zbiór wniosków z przeprowadzonych obszernych badań dotyczących projektowania PMSG, co-symulacji MEW, rozmagnesowania, pracy układu z rozmagnesowanymi magnesami trwałymi w PMSG. Zawarto tu również najważniejsze osiągnięcia Autora oraz jego publikacje. Mgr Roberto Eduardo Quintal Palomo jest współautorem 7 artykułów.

Załącznik A zawiera rozważania na temat możliwości pozyskiwania energii z wiatru w kontekście prawa Betz'a.

Załącznik B przedstawia podstawowe parametry opracowanej maszyny elektrycznej.

Bibliografia stanowi zbiór 181 źródeł, dobrze dobranych, z których jednak część wymagałaby odświeżenia.

## **2. Uwagi ogólne**

**Uwagi dyskusyjne o charakterze ogólnym**, które nasunęły mi się w czasie opracowywania recenzji:

- 1) We wstępie robiąc przegląd rynku Autor powołuje się na wiele źródeł, niektóre z nich jednak np. dotyczące cen energii [2] czy niezawodności [3], [6] oraz maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi [7], [10] pochodzą z lat od 2009 do 2014. Czy to oznacza, że obecnie dane te się nie zmieniły? Czy nie ma nowszych pozycji w literaturze z ostatnich 3 – 4 lat podających ww. dane, które uwzględniają zmiany spowodowane rozwojem e-mobilności i turbin wiatrowych?
- 2) Autor dokonał szeregu porównań i badań symulacyjnych i co-symulacyjnych. Między innymi na stronie 107 pisze, że regulatory PI prądu i ich nastawy odgrywają ważną rolę. Jest to prawdą jednak nigdzie nie znalazłem informacji w jaki sposób zostały dobrane nastawy regulatorów prądu oraz prędkości? Dodatkowo nasuwa się pytanie czy parametry maszyny nie ulegają zmianie szczególnie w przypadku zmian temperaturowych, oraz czy wtedy nastawy regulatorów PI prądu oraz prędkości były przestawiane?

- 3) W rozdziale 9 porównano wyniki badań symulacyjnych i co-symulacyjnych zwracając uwagę we wnioskach na wysoką czasochłonność tych drugich (57 godzin). Brak jest testów laboratoryjnych – dlaczego? Autor dysponował stanowiskiem laboratoryjnym zastanawia więc czytelnika co powstrzymało go przed dokonaniem analogicznych badań w laboratorium. W rozdziale tym Autor nadmienia, że parametry modeli symulacyjnych i co-symulacyjnych były takie same – proszę zestawić w tabeli ww. parametry.
- 4) Czym spowodowane są większe pulsacje momentu dla większej prędkości wiatru (rys. 9.8) ? Czy można przedstawić analogiczne przebiegi jak na rysunkach 9.8, 9.9 oraz 9.10 uzyskane w wyniku badań laboratoryjnych potwierdzające to zjawisko?
- 5) Bardzo ciekawe badania Autor przedstawił w rozdziale 8 – tj. pracę maszyny po częściowym rozmagnesowaniu. Zastanawia jednak fakt dlaczego Autor zdecydował się nie używać filtra prędkości (strona 87), który przecież szczególnie w warunkach laboratoryjnych powinien być stosowany. W tym rozdziale również nasuwa się pytanie – co powstrzymało Autora przed badaniami laboratoryjnymi? Czy nie można było dostosować warunków symulacji i co-symulacji do szczególnych przypadków, które w stosunkowo prosty sposób można przeprowadzić w warunkach eksperymentalnych na rzeczywistym prototypie PMSG? Autor wspomina również o dostrojeniu parametrów regulatorów PI do przypadku „zdrowego” – proszę o podanie wartości nastaw regulatorów. Bardzo ciekawa może być informacja jak zmieniają się parametry maszyny?
- 6) W rozdziale 7 (dokładniej 7.3) Autor przedstawia analizę PMSG sterowaną za pomocą bezpośredniego sterowania zorientowanego polowo (DFOC). Wspomina o ograniczeniach regulatorów prądu do 0.9 p.u. – dlaczego wprowadzono takie ograniczenie i jak zdefiniowano jednostki p.u. – brak w pracy definicji.  
Nie jest dla mnie jasne co oznacza ograniczenie regulatora prędkości na +/- 45 (czego? p.u. rad, czy obr/min. a może amperów), dlaczego akurat tyle? Jaka jest struktura regulatorów – może podać strukturę lub schemat blokowy?
- 7) W paragrafie 7.4 i 7.5 przedstawiona jest weryfikacja co-symulacyjna i laboratoryjna PMSG z przekształtnikiem tranzystorowym sterowanym za pomocą DFOC. Pojawia się pytanie czy zasadny był wybór częstotliwości generowania impulsów PWM na 1kHz a potem podwyższenie jej do 3 kHz a w przypadku badań laboratoryjnych nawet wyżej niż 3 kHz – pytanie do jakiej? Czy z przebiegów na rysunku 7.9 wynika, że co-symulacja nie działa do końca stabilnie? Proszę przeprowadzić porównanie również w stanach dynamicznych (nawrót prędkości, skok momentu obciążenia itp. - rys. 7.6, 7.8 i 7.9 przedstawiają stany statyczne) natomiast dalsze wyniki dotyczą tylko co-symulacji.

- 8) We wnioskach 6.5 Autor pisze, że co-symulacje wskazały, że maszyna może nie pracować tak jak oczekujemy przy pewnych prędkościach wiatru (układ z prostownikiem diodowym). Proszę o przedstawienie weryfikacji na stanowisku laboratoryjnym.

### 3. Uwagi szczegółowe

Redakcja rozprawy doktorskiej jest w miarę staranna jednak szczególnie w rozdziałach końcowych można znaleźć więcej niekonsekwencji w oznaczeniach i błędów językowych. Nie zawsze jest jasne co Autor miał na myśli np. odwołując się do szerszego opisu zawartego we wcześniejszych swoich publikacjach. Dobrze by było dodać zdanie wyjaśnienia na co powinien zwrócić uwagę czytelnik w danej publikacji. W poniższej tabeli zestawiono wybrane pomyłki i niedociągnięcia edytorskie:

Nr str.	Linia lub numerów./rys./tab.	Uwagi
W wielu miejscach	Słowo big	Zamiast słowa big np. bigger rotor losses powinno być raczej użyte słowo high tj. higher rotor losses; big current peak itp.
W wielu miejscach	Skróty np. FSCW	Powinny być wyjaśnione przy pierwszym wystąpieniu. Lub powinien być dodany spis skrótów i oznaczeń. Co znacząco by poprawiło przejrzystość pracy. Niektóre skróty są rozwijane w wielu miejscach pracy (niepotrzebnie). Inne z kolei podawane są w nawiasach lub bez, raz rozwinięcia są z małych liter raz z wielkich. Np. doubly salient permanent magnet (DSPM) – skrót potem nie występuje w tekście pracy.
W wielu miejscach	Prądy $d$ $q$ i $D$ $Q$	Powinny być oznaczone w ten sam sposób zarówno w tekście jak i na rysunkach

### 4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-doświadczalny, zawiera ciekawe wyniki badań symulacyjnych, co-symulacyjnych i podstawowych eksperymentalnych. W mojej ocenie stanowi oryginalne pogłębienie wiedzy na temat modelowania za pomocą elementów skończonych i co-symulacji prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi (PMSG), szczególnie uwzględniając efekt rozmagnesowania magnesów trwałych. Autor wykazał się dobrą znajomością tematyki. Na szczególną uwagę zasługuje opis procesu projektowania maszyny.

Za osiągnięcia własne Autora rozprawy uznają:

- ✓ Wykonanie projektu i stworzenie prototypu PMSG,

- ✓ Aplikacja opracowanego prototypu PMSG do MEW i badania w różnych topologiach i trybach pracy.
- ✓ Wykonanie modeli symulacyjnych i badań co-symulacyjnych w przypadku rozmagnesowania i różnych trybów pracy oraz ich porównanie z wynikami badań symulacyjnych i eksperymentalnych.
- ✓ Zestawienie i analizę wyników oraz przedstawienie interesujących wniosków.

Autor, opublikował w tematyce bezpośrednio związanej z zagadnieniami poruszonymi w niniejszej rozprawie doktorskiej 7 prac przedstawionych na konferencjach międzynarodowych (IEEE IECON 2016, SME 2017, EPE-ECCE Europe 2017) oraz w czasopiśmie (dwa w Power Electronics and Drives, COMPEL, Przegląd Elektrotechniczny).

## 5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Roberto Eduardo Quintal Palomo „*Operation and faults analysis of energy-saving permanent magnet synchronous generator for small wind turbine*” („*Analiza pracy i uszkodzeń energooszczędnego generatora synchronicznego z magnesami trwałymi do małej elektrowni wiatrowej*”), niezależnie od uwag krytycznych wymienionych powyżej stanowi dowód dojrzałości i samodzielności doktoranta.

Uważam, że zaprezentowana praca w ramach opiniowanej rozprawy doktorskiej wnosi istotny wkład do zagadnień związanych z projektowaniem, symulacją i co-symulacją oraz budową prototypu oraz jego aplikacją w MEW.

Przedstawione wyniki w sposób istotny mogą przyczynić się do dalszego rozwoju teorii i praktyki projektowania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi.

Autor jednoznacznie potwierdził, że opanował teorię i praktykę dotyczącą problemu.

Dokonał analizy i potrafi zweryfikować uzyskane wyniki w praktyce, wykorzystując przy tym nowoczesne narzędzia mikroprocesorowe (dSPACE) oraz potwierdzając tym samym swoją dojrzałość naukową.

W świetle powyższego potwierdzam, że recenzowana przeze mnie praca spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika (zawierającą dyscyplinę elektrotechnika oraz dyscyplinę automatyka i robotyka) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Marek Jasiński