

Wrocław 06.09.2019

Mgr inż. Roberto Eduardo Quintal Palomo  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wydział Elektryczny  
Politechnika Wrocławska

Streszczenie rozprawy doktorskiej pt.

**„ANALIZA PRACY I USZKODZEŃ ENERGOOSZCZĘDNEGO GENERATORA  
SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO MAŁEJ ELEKTROWNI  
WIATROWEJ”**

W niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono projekt, analizę teoretyczną, weryfikację eksperymentalną nowego synchronicznego generatora z magnesami trwałymi (PMSG) dla małych turbin wiatrowych (SWT). W pierwszej części pracy przedstawiono wprowadzenie związane z tematyką uszkodzeń turbin wiatrowych, w szczególności małych turbin wiatrowych. Przedstawiono również opis zastosowanego podejścia badawczego zwanego współsymulacją lub co-symulacją. Następnie przedstawiono cele oraz tezy pracy.

W drugim rozdziale zaprojektowano maszynę z wewnętrznymi magnesami trwałymi (IPM) stworzoną w oparciu o seryjnie produkowany silnik indukcyjnym (IM). W konstrukcji wirnika zastosowano podejście zwane biegunem indukowanym. Przeprowadzono optymalizację parametrów maszyny metodą elementów skończonych, w celu uzyskania najwyższej siły elektromotorycznej przy niskim całkowitym zniekształceniu wyższymi harmonicznymi. W rezultacie opracowano generator PMSG o prawie dwukrotnie większej gęstości mocy niż silnik indukcyjny, na którym bazował generator PMSG. Wyniki badań polowych potwierdzone zostały na stanowisku laboratoryjnym.

W następnym rozdziale pokazano sposób modelowania rozmagnesowania wirnika przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Przedstawiono również podstawy teoretyczne oraz wstępne badania rozmagnesowania zaprojektowanego generatora PMSG na skutek zwarcia międzyfazowego. Wykazano, że dla stałej prędkości zwarcie trójfazowe nie powoduje rozmagnesowania maszyny, przy założeniu, że temperatura magnesów wynosi poniżej  $110^{\circ}\text{C}$ . Badania wskazują, że wybrane magnesy są odpowiednie dla zaproponowanej koncepcji generatora PMSG.

W czwartym rozdziale przedstawiono różne koncepcje turbin wiatrowych, ich układy sterowania i topologie. Przedstawiono wady i zalety poszczególnych koncepcji turbin

wiatrowych. Zaprezentowano także ideę i koncepcje dla małych wolnostojących turbin wiatrowych SWT.

W rozdziale V omówiono różne koncepcje sterowania dla turbin wiatrowych. Zwrócono uwagę na budowę wybranych układów energoelektronicznych oraz układów sterowania. Opisano także algorytm sterowania MPPT.

W kolejnej części pracy przedstawiono badania symulacyjne, współsymulacyjne oraz weryfikację eksperymentalną pracy generatora PMSG oraz turbiny wiatrowej z generatorem PMSG wraz z prostownikiem niesterowanym, prostownikiem niesterowanym wraz z układem podwyższającym napięcie wraz z układem OTC (optymalne sterowanie momentem). Sprawdzono działanie układów WECS (Wind Energy Conversion System) w różnych warunkach pracy. Przedstawiono zalety analizy systemów typu WECS przy wykorzystaniu podejścia współsymulacyjnego oraz porównano otrzymane w ten sposób wyniki z rezultatami otrzymanymi dla obwodowego modelu generatora PMSG i pomiarami laboratoryjnymi.


W rozdziale VII pokazano działanie opracowanego generatora PMSG z dwupoziomowym falownikiem napięcia (2L-VSC). Jako metodę sterowania wybrano algorytm sterowania połowo – zorientowanego - Field Oriented Control (FOC). Badania współsymulacyjne porównane zostały z badaniami eksperymentalnymi. Otrzymano zbieżne wyniki tych analiz. Sprawdzono także wpływ zwarcia międzyfazowego generatora na proces rozmagnesowania magnesów trwałych w układzie sterowania wektorowego. Wykazano, że po zaniku zwarcia magnesy ulegają częściowemu rozmagnesowaniu.

W następnym rozdziale przedstawiono działanie generatora PMSG sterowanego metodą wektorową przy częściowym rozmagnesowaniu wirnika. Założono, że maszyna pracuje bez niektórych magnesów. Wyniki porównano z przypadkiem zwarcia pokazanym w poprzednim rozdziale. Analizowano cztery przypadki: „zdrowy” wirnik, wirnik bez jednego magnesu, wirnik bez dwóch magnesów po tej samej stronie i bez dwóch magnesów po przeciwnej stronie. Podobieństwo między wynikami rozmagnesowania otrzymanymi na skutek analizy zwarcia dwufazowego w temperaturze 150 ° C i badaniami układu bez dwóch magnesów wskazują, że metoda analizy rozmagnesowania polegająca na usuwaniu magnesów z wirnika, jako metoda analizy częściowego rozmagnesowania, jest poprawna. Wyniki wskazują również, że model generatora wykonany w środowisku połowym prawidłowo reaguje na uszkodzenia, które doprowadzają do rozmagnesowania wirnika.

W rozdziale IX pokazano badania symulacyjne i co-symulacyjne systemu małej elektrowni wiatrowej z opracowanym generatorem PMSG sterowanej metodą DFOC w różnych warunkach pracy. Przedstawiono działanie układu wraz z uwzględnieniem modelu aerodynamicznego turbiny wiatrowej o trzech łopatach i o poziomej osi obrotu (HAWT). Pokazano porównanie pracy elektrowni wiatrowej z wirnikiem nieuszkodzonym oraz z

wirnikiem, w którym usunięto dwa magnesy po przeciwnej stronie (częściowe rozmagnesowanie).

Na koniec przedstawiono podsumowanie i wnioski badawcze dotyczące badań i analiz przedstawionych w poprzednich rozdziałach. Przedstawiono główne osiągnięcia Autora. Przedstawiono listę publikacji wykonanych podczas realizacji pracy doktorskiej. Załączniki zawierają opis modelu aerodynamicznego HAWT i parametry PMSG stosowanego w klasycznych symulacjach, w tym kilka uwag na temat obszaru pracy maszyny PMSG.



Roberto E. Quintal Palomo