

Warszawa, 02.10.2019 r.

Dr hab. inż. Krzysztof Zymmer, prof. IEI
Sieć Badawcza Łukasiewicz
Instytut Elektrotechniki
Zakład Energoelektroniki i Transportu Elektrycznego
ul. Pożaryskiego 28
04-703 Warszawa

O P I N I A

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Pawła Maciejewskiego pt.: „Praca maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z bezpośrednią regulacją momentu w układzie wytwarzania napięcia stałego”

1. Umieszczenie tematu, aktualność i zakres rozprawy

Proponowane przez autora rozwiązanie autonomicznego źródła zasilania w postaci maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej MDZ jest wyborem w pełni aktualnym zwłaszcza w aspekcie jego wprowadzenia do praktyki na przykład w sieciach typu Smart Grid. Jest to spowodowane prostą technicznie, tanią i od dawna opanowaną technologią wytwarzania maszyn indukcyjnych pierścieniowych. Niewątpliwą zaletą analizowanego przez autora systemu zasilania z MDZ jest niewielka zredukowana do mocy poślizgu moc falownika włączonego w obwód wirnika maszyny synchronicznej. Wpływa to korzystnie na koszty i gabaryty analizowanego układu. Proste, w pełni opanowane i tanie rozwiązanie stanowi zastosowany w układzie DC prostownik diodowy. Innym czynnikiem przemawiającym za stosowaniem proponowanego rozwiązania są rosnące ceny i trudności w pozyskiwaniu pierwiastków ziem rzadkich niezbędnych do wytwarzania ewentualnie konkurencyjnych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, których koszty wytwarzania rosną a dostępność maleje. W związku z powyższym realizowana w rozprawie tematyka staje się bardziej aktualna także w aspekcie badawczym.

Rozprawę przedstawiono na 112 stronach łącznie ze streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści i rysunków, bibliografią, listą symboli oraz załącznikiem prezentującym główne parametry schematu symulacyjnego układu, jego modelu rzeczywistego oraz silnika. Całość rozprawy podzielona została na 8 rozdziałów.

We wprowadzeniu (rozdział 1) sformułowane zostały tezy i cel rozprawy oraz przedstawiony został zakres pracy. W rozdziale 2 sformułowany został model matematyczny maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z prostownikiem w obwodzie stojana jako źródła napięcia stałego. Model ten wykorzystywano do badań symulacyjnych układu. W rozdziale 3 przedstawione zostały metody sterowania maszyną dwustronnie zasilaną z wyróżnieniem metody polowo-zorientowanej. W rozdziale 4 omówiono wyniki porównawczych badań symulacyjnych dla trzech metod sterowania momentem w układzie MDZ z wyjściem DC. Dwie metody są realizowane przez bezpośrednie zadawanie częstotliwości napięcia stojana, natomiast kolejna metoda bazuje na zadawaniu amplitudy strumienia stojana.

W rozdziale 5 przedstawiono zagadnienia związane ze sterowaniem bezczujnikowym w odniesieniu do wymienionych wyżej sposobów regulacji pracą układu MDZ. W rozdziale 6 zaprezentowany został opracowany przez doktoranta model matematyczny maszyny pierścieniowej o sześciofazowym stojanie stanowiący rozwiązanie alternatywne dla układu z transformatorem o sześciofazowym uzwojeniu wtórnym. Rozdział 7 zawiera opis eksperymentalnego układu MDZ oraz wyniki badań laboratoryjnych stanowiące praktyczną weryfikację uzyskanych wcześniej analiz symulacyjnych. W rozdziale 8 doktorant podsumowuje wyniki pracy i przedstawia swoje osiągnięcia w zakresie tematyki objętej niniejszą rozprawą.

Należy także podkreślić, że zespół badawczy, w którym realizowana jest niniejsza praca, przez wiele lat kierowany przez prof. Koczarek należy do wiodących ośrodków akademickich w obszarze badań nad napędami elektrycznymi, a prezentowana rozprawa jest kolejną, która nawiązuje do wymienionej tematyki wnosząc elementy oryginalne charakterystyczne dla szkoły warszawskiej, której jednym z głównych twórców jest promotor tego doktoratu.

2. Ogólna ocena rozprawy

W rozprawie poddano wszechstronnej analizie pracę maszyny indukcyjnej, pierścieniowej dwustronnie zasilanej z prostownikiem diodowym^w obwodzie stojana zastosowanej jako źródło napięcia stałego. Wyniki analiz zostały zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi modelu układu w laboratorium badawczym. Proponowane rozwiązanie pozwala regulować napięcie wyjściowe DC przy zachowaniu stałej częstotliwości napięcia stojana niezależnie od zmiennej prędkości kątowej wirnika. Istotną właściwością omawianego układu jest (określona mocą poślizgu) niewielka moc przekształtnika energoelektronicznego sterującego pracą generatora a włączonego w obwód wirnika. Niedogodnością rozwiązania z prostownikiem diodowym instalowanym w obwodzie stojana są występujące w wyniku

nieliniowych charakterystyk przewodzenia diod odkształcenia prądów i napięć stojana. Skutkuje to tętnieniami momentu maszyny a w wyniku zagrożeniami dla łożysk oraz przekładni. Zaproponowane w rozprawie ograniczenie wymienionych zjawisk obejmuje następujące środki zaradcze:

- Włączenie w obwód stojana transformatora z wielofazowym prostownikiem na wyjściu;
- Zastosowanie maszyny indukcyjnej pierścieniowej o wielofazowym stojanie i trójfazowym wirniku;
- Analiza i wybór metody sterowania zapewniającej w maksymalnym stopniu eliminowanie szkodliwych dla maszyny drgań momentu.

Tak sformułowane zadania do realizacji ramach niniejszej pracy sformułowane przez doktoranta w formie następujących tez niniejszej rozprawy:

Teza 1 Bezpośrednia regulacja momentu elektrycznego pozwala na zmniejszenie tętnień momentu elektrycznego prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej pracującej w układzie wytwarzania napięcia stałego w stosunku do polowo zorientowanej metody regulacji prądu wirnika.

Teza 2 Zastosowanie sześciofazowego stojana zmniejsza tętnienia momentu elektrycznego w prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej pracującej w układzie wytwarzania napięcia stałego w stosunku do maszyny o trójfazowym stojanie.

Celem rozprawy jest opracowanie i porównanie wariantów sterowania przekształtnikiem wirnikowym metodą bezpośredniego sterowania momentem (DTC) zarówno z wykorzystaniem czujnika położenia wirnika jak i w wariantcie bezczujnikowym oraz analizę układu prądnicy z sześciofazowym stojaniem.

Cel rozprawy został w pełni zrealizowany a tezy udowodnione w wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych i badań symulacyjnych, których rezultaty były weryfikowane wynikami badań eksperymentalnych na modelu układu o znacznej mocy równej 3,2 kW.

Istotne znaczenie dla pozytywnej oceny rozprawy mają uzyskane przez doktoranta patenty obejmujące zastosowanie MDZ w proponowanych aplikacjach. Na podkreślenie zasługuje także wykazana przy realizacji rozprawy umiejętność prowadzenia przez autora badań eksperymentalnych co pozwala rokować na łatwiejsze wprowadzenie opracowanych rozwiązań do praktyki przemysłowej.

Do oryginalnych osiągnięć autora zaliczam:

- Opracowanie modelu maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z sześciofazowym uzwojeniem stojana i jego implementacji w układzie wytwarzania napięcia stałego wraz z weryfikacją eksperymentalną rozwiązania;
- Wytypowanie w wyniku analiz i badań laboratoryjnych optymalnej metody DTC sterowania pracą maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej pracującej jako źródło napięcia stałego w aspekcie ograniczenia tętnień momentu;
- Implementacja tej metody w autonomicznym układzie maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej zastosowanej jako źródło napięcia stałego;

- Zaprojektowanie i budowa eksperymentalnego stanowiska badawczego z MDZ jako źródła DC o znacznej mocy;
- Analizy pracy układu w stanach dynamicznych;
- Opracowanie i przedstawienie odpowiednich wyników dla układu z maszyną beczujnikową;
- Badania eksperymentalne w zakresie porównania metod bezpośredniego sterowania momentem ze sterowaniem połowo zorientowaniem;
- Przeprowadzenie analizy wariantów sterowania momentem z zadawaniem składowej prądu wirnika DTIC lub składowej strumienia stojana CTΨC.

W podsumowaniu stwierdzam, że tezy rozprawy zostały udowodnione a ogólny cel rozprawy osiągnięty. Istotna jest w tym weryfikacja analiz i badań symulacyjnych przeprowadzona przez prace eksperymentalne wykonane w układzie rzeczywistym o znacznej mocy co może być zdecydowanie pomocne przy wprowadzaniu rozwiązania do praktyki przemysłowej. Przy rozwiązywaniu problemów zarówno teoretycznych oraz przez prace eksperymentalne doktorant wykazał się dobrą znajomością narzędzi badawczych. Praca została zredagowana na ogół poprawnie, prezentowany materiał przedstawiony został w sposób komunikatywny, co ułatwi adaptację zawartości rozprawy nawet przez czytelnika mniej zorientowanego w prezentowanej tematyce. Jedynie osiągnięcia doktoranta zostały przedstawione w sposób zbyt syntetyczny i wskazane byłoby nieco szersze rozwinięcie tych elementów wraz z odpowiednim komentarzem.

3. Uwagi ogólne

- 1) W modelu prostownika zastosowano uproszczony model diody, który można zastąpić modelem wykorzystującym napięciowo-prądową charakterystykę przewodzenia co poprawiłoby dokładność wyników badań symulacyjnych. Model taki jest dostępny w programie PSiM.
- 2) Wątpliwa wydaje się potrzeba opracowania modelu prostownika w języku C. Modele prostowników trójfazowych mostkowych są proponowane w różnych programach symulacyjnych jak na przykład program PSiM.
- 3) Na rys. 1.2 przedstawiono model 12-pulsowego zespołu prostownikowego bez dławika wyrównawczego. Taki sam model zastosowano w analizowanym układzie wytwarzania napięcia stałego z prądnicą indukcyjną o sześciofazowym uzwojeniu stojana. Należałoby wyjaśnić w jaki sposób wyeliminowano ewentualne niezrównoważenie prądów mostków prostownika.
- 4) Czy autor brał pod uwagę fakt, że w układzie prostownika dwunasto-pulsowego bez dławika wyrównawczego stosunek wartości skutecznej prądu diody prostownika do wartości średniej tego prądu jest większa niż w rozwiązaniu z takim dławikiem. Większa jest także wartość skuteczna prądu w uzwojeniach transformatora.

- 5) Autor analizuje różne metody sterowania pracą maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej
W aspekcie drgań momentu i napięcia na wyjściu układu przez badania symulacyjne oraz eksperymentalne. Wskazane byłoby przedstawienie i szersze omówienie wyników porównawczych uzyskanych wymienionymi sposobami.
- 6) W Przypadku odłączenia obciążenia (rys. 4.8) wartość napięcia w obwodzie DC gwałtownie wzrasta w wyniku transmisji energii zgromadzonej w indukcyjnościach maszyny dla obwodu pośredniczącego DC. W celu przeciwdziałania temu zjawisku autor sugeruje zastosowanie rezystora rozładowczego załączonego łącznikiem tranzystorowym (tzw. breaking choper). Wskazane byłoby przedstawienie przynajmniej wyników badań symulacyjnych takiego rozwiązania wraz z doбором parametrów rezystora zapewniających akceptowalny poziom generowanego przepięcia.
- 7) W jakim zakresie mocy układ MDZ stosowany jako autonomiczne źródło napięcia stałego może być konkurencyjny, w aspekcie techniczno-ekonomicznym, w stosunku do innych rozwiązań o podobnym przeznaczeniu.

4. Uwagi redakcyjne

- 1) Autor używa neologizmów jak „moment elektryczny, stopnie elektryczne”, których to sformułowań należy unikać w pracach naukowych.
- 2) Str. 17
jest: prostownik wprowadza znaczną ilość harmonicznnych prądu pobieranego od strony napięcia przemiennego
proponuję: znaczną ilość harmonicznnych prądu wprowadzanych do sieci elektroenergetycznej
jest: metodą na zmniejszenie zakłóceń jest zwiększenie liczby pulsów w prostowniku przez zastosowanie transformatorów przesuwających fazę napięcia
proponuję: metodą na zmniejszenie zakłóceń jest zwiększenie liczby pulsów w napięciu wyprostowanym przez zastosowanie transformatorów wielouzwojeniowych
- 3) Str. 25
jest: celem sterowania jest sterowanie mocą czynną i bierną
proponuję: Celem sterowania jest zadawanie mocy czynnej i biernej
- 4) Str. 26
jest: charakteryzuje się ona brakiem regulatorów prądu gdyż regulatory oddziałują ...
proponuję: charakteryzuje się ona brakiem regulatorów prądu, gdyż regulatory te ...
- 5) Str. 38 W pierwszym zdaniu pod tytułem 4.1.4 pomiędzy słowami: prądnicą pierścieniową a przedstawiono *należy wprowadzić:* na rys. 4.5 i 4.6.

- 6) Str. 42 Zdanie pierwsze wiersz drugi: zwrot regulacji strumienia stojana *proponuję zastąpić* zwrotem zadawania strumienia stojana
Wiersz 12: zwrot co możemy zaobserwować w [28] proponuję zastąpić zwrotem – co jest przedstawione w [28]
- 7) Str. 54 Trzeci wiersz pod tytułem punktu 5.2: niejasne wyrażenie: kąt mechaniczny
- 8) Str. 84 Wiersz 8- niejasne sformułowanie: zapad można zmniejszyć przez zastosowanie sprzężenia do przodu od mocy obciążenia.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Maciejewskiego pt.: „Praca maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej z bezpośrednią regulacją momentu w układzie wytwarzania napięcia stałego”, niezależnie od uwag zgłoszonych w punktach 3 i 4 stanowi samodzielny wkład doktoranta do teorii praktyki zwłaszcza w zakresie sterowania pracą dwustronnie zasilanych maszyn indukcyjnych. Na podkreślenie zasługuje przeprowadzona w szerokim zakresie weryfikacja wyników analiz teoretycznych i symulacji komputerowych przez przeprowadzone w układzie rzeczywistym badania eksperymentalne. Jako poprawną oceniam stronę edytorską rozprawy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Pawła Maciejewskiego pt.: „Praca maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej” spełnia stawiane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku kryteria i wymagania o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw Nr 65, pozycja 595, z późniejszymi zmianami i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

