

O C E N A
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Listwana pt. „Analiza nieliniowych
metod sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym”**

Promotor przewodu: dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski, prof. Pol. Wrocławskiej

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej
prof. dr hab. inż. Waldemara Rebizanta, pismo: W-5/577/2018 z dnia 03.04.2018 r.

Tematyka i teza rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Listwana koncentruje się na badaniach nieliniowego sterowania wielofazowego silnika indukcyjnego zasilanego z wielofazowego falownika napięcia. Zostały rozpatrzone metody: metoda polowo-zorientowana i metoda bezpośredniego sterowania momentem z zastosowaniem regulatorów nieliniowych. Funkcję napędową realizuje układ złożony z falownika i silnika indukcyjnego klatkowego, przy czym silnik ma liczbę faz uzwojenia stojana $m = 5$ i 6 .

Temat jest aktualny. W zakresie napędów regulowanych dużej mocy, zamiast stosowania falowników i silników o napięciu znamionowym 6 kV, można stosować wielofazowe układy na napięciu znamionowe około 1000 V. Powiększając liczbę faz silnika zmniejsza się prąd znamionowy silnika. Układy o liczbie faz $m > 3$ i niższym napięciu mają kilka zalet w stosunku do układów trójfazowych o napięciu znamionowym 6 kV, a przede wszystkim są tańsze i mają wyższą sprawność energetyczną. Napędy takie są budowane i pracują, np. w jednej z elektrowni jest zainstalowany układ napędowy regulowany o mocy $4,5$ MW.

Teza pracy brzmi: „Zastosowanie nieliniowych metod sterowania wielofazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym pozwala na uzyskanie dokładnej regulacji zmiennych stanu silnika oraz zapewnia odporność układu sterowania na stany awaryjne występujące w układzie napędowym.” Wydaje się, że tylko niektóre stany awaryjne układu napędowego umożliwiają jego dalszą pracę, np. przerwa w zasilaniu jednej fazy silnika, bądź kilku faz, lecz przy zachowaniu symetrii zasilania pozostałych faz. Natomiast zwarcie zwojowe w uzwojeniu, zarówno w silniku trójfazowym jak i wielofazowym, jest awarią silnika.

Charakterystyka rozprawy

Treść rozprawy doktorskiej jest zawarta w ośmiu rozdziałach i trzech załącznikach, łącznie liczy 159 stron. Spis literatury obejmuje 122 pozycje, w tym 18 pozycji własnych doktoranta; 9 autorskich i 9 współautorskich z promotorem. Dziewięć artykułów jest opublikowanych w czasopismach punktowanych na liście B MNiSW: Archives of Electrical Engineering; Czasopismo Techniczne; Przegląd Elektrotechniczny; Power Electronic and Drives, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska; Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Napęd i Sterowanie; Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. Dziewięć referatów prezentował na konferencjach

naukowo – technicznych, wszystkie zostały opublikowane w materiałach konferencyjnych w j. angielskim.

Treść pracy, pod względem merytorycznym, składa się z dwóch części. Część pierwsza (rozdziały 2, 3 i 4) stanowi opracowanie bazowe, w oparciu o własną wiedzę i literaturę, a część druga obejmuje badania własne (rozdziały 5, 6 i 7).”

W części pierwszej zawarto modele matematyczne wielofazowego silnika indukcyjnego w układach współrzędnych fazowych i w układach współrzędnych przetransformowanych. Modele matematyczne pięcio- i sześćo- fazowych falowników napięcia i metody ich modulacji wektorowej. Doktorant przeprowadził analizę i badania symulacyjne bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego i bezpośredniego sterowania momentem silników indukcyjnych 5-cio i 6-cio fazowych z zastosowaniem regulatorów PI.

Część druga pracy, część badawcza, koncentruje się na metodach nieliniowego sterowania wielofazowym silnikiem indukcyjnym. Przeprowadzono analizę i syntezę metod sterowania pięcio- i sześćo- fazowymi silnikami indukcyjnymi, bazujących na układzie bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego w którym regulatory PI zastąpiono regulatorami ślizgowymi ekwiwalentnymi, regulatorami ślizgowymi drugiego rzędu typu Super-Twisting oraz regulatorem rozmytym. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych bezpośredniego sterowania momentem silnika pięcio- i sześćo- fazowego z wymienionymi regulatorami. Oryginalnym opracowaniem jest analiza działania układu sterowania przy wystąpieniu stanu awaryjnego polegającego na blokadzie, w systemie sześciofazowym, sterowania zaworami jednego z falowników trójfazowych. Opracowano układ sterowania odporny na uszkodzenie czujnika prędkości i model matematyczny estymatora dedykowany do układu sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym. Zaprojektowano i wykonano stanowisko laboratoryjne do badań eksperymentalnych metod sterowania sześciofazowym silnikiem indukcyjnym.

Podsumowanie monografii to rozdział ósmy, w którym zawarto wnioski końcowe i kierunki dalszych badań.

Zrealizowane zadania badawcze

W rozprawie Doktorant przeprowadził analizę metod sterowania nieliniowego falowników napięcia zasilających wielofazowe silniki indukcyjne klatkowe. Zajmował się metodami sterowania: regulatorem ślizgowym ekwiwalentnym, regulatorem ślizgowym Super-Twisting oraz regulatorem rozmytym. Regulatory te zostały zaaplikowane w strukturach układów sterowania wektorowego: bezpośredniego sterowania połowo-zorientowanego (DFOC) oraz bezpośredniego sterowania momentem z modulacją wektorową. Wykonał badania symulacyjne i eksperymentalne na modelowych układach napędowych: z silnikiem pięciofazowym o mocy 3 kW i sześciofazowym o mocy 1,5 kW. Badania te potwierdziły, że metody sterowania ślizgowego zapewniają poprawną regulację zmiennych stanu układu napędowego.

Badania te zostały powtórzone dla sterowania z zastosowaniem regulacji rozmytej. Otrzymane wyniki także dla tej regulacji potwierdziły możliwość jej poprawnego działania.

Sprawdzono działanie badanych metod regulacji w stanach awaryjnych: blokadzie sterowania zaworami jednego z falowników napięcia i braku sygnału z czujnika prędkości obrotowej.

Wyniki badań potwierdzają tezę rozprawy, że praca wielofazowego silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z falownika napięcia przy sterowaniu regulatorami: ślizgowym ekwiwalentnym, Super-Twisting i rozmytym, jest poprawna i układ jest odporny na wyłączenie sterowania jednego z 3-fazowych falowników i na brak sygnału z czujnika prędkości obrotowej.”

Uwagi dyskusyjne

1. Stosowane w napędach układy sześćfazowe mają zazwyczaj konfigurację niesymetryczną. W silniku dwa uzwojenia trójfazowe są ułożone w żłobkach na obwodzie twornika tak, że kąty elektryczne między osiami kolejnych faz wynoszą 30° , 90° , 30° itd. Gwiazdy trójfazowych napięć fazowych są także przesunięte w fazie o kąt 30° . Taki układ ma dwie zalety:
 - uzwojenie jednej fazy zajmuje mniejszą liczbę żłobków pod biegunem, ma zatem większy współczynnik rozłożenia uzwojenia,
 - 5-ta i 7-ma harmoniczne obwodowe indukcji magnetycznej w szczelinie (tzw. harmoniczne przestrzenne), zerują się, a są to harmoniczne największe, które generują straty dodatkowe w maszynach elektrycznych. Harmonicznych tych nie eliminuje układ sześćfazowy symetryczny.
2. W pracy jest obszerny przegląd literatury lecz nie znalazłem informacji jakie problemy w sterowaniu występują w obecnie produkowanych falownikach napięcia, które ma rozwiązać sterowanie ślizgowe i rozmyte.
3. Brak jest wzajemnego porównania metod sterowania z wykorzystaniem regulatorów: ślizgowego ekwiwalentnego, Super-Twisting i rozmytego.
4. Jaki jest warunek optymalnego sterowania ślizgowego i czy warunek (5.2) jest warunkiem koniecznym i wystarczającym?

Uwagi powyższe nie obniżają wartości naukowo – badawczej pracy, którą oceniam bardzo dobrze.

Konkluzja

Praca doktorska mgr inż. Jacka Listwana pt. „*Analiza nieliniowych metod sterowania silnikiem indukcyjnym wielofazowym*”, wykonana pod kierunkiem promotora: dr hab. inż. Krzysztofa Pieńkowskiego, prof. Pol. Wrocławskiej obejmuje pełny cykl badawczy:

- ✓ opracowanie modeli matematycznych silników indukcyjnych pięcio- i sześćfazowych,
- ✓ analizę metod sterowania nieliniowego wielofazowym silnikiem indukcyjnym,
- ✓ opracowanie algorytmów i układów sterowania z dwoma rodzajami regulatorów ślizgowych i z regulatorem rozmytym oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- ✓ projekt i wykonanie stanowiska laboratoryjnego, w tym projekt uzwojeń silników i przeprowadzenie pomiarów weryfikujących poprawność analizy teoretycznej i uzyskanych wyników z symulacji komputerowych,
- ✓ sprawdzenie działania układu sześćfazowego w stanach awaryjnych.

Według mojej oceny Doktorant zrealizował zadanie badawcze, a ponadto:

- ✓ wykazał dużą wiedzę w tematyce sterowania układami napędami elektrycznymi z silnikami klatkowymi trój- i wielofazowymi,
- ✓ wykazał się dobrą umiejętnością w planowaniu i przeprowadzaniu badań eksperymentalnych,
- ✓ prezentacja wyników badań w formie wykresów jest czytelna,
- ✓ ma bardzo dobre rozeznanie w literaturze przedmiotu.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska ma jasno sprecyzowany cel, a postawione zadanie zostało zrealizowane poprzez analizę teoretyczną, badania symulacyjne i eksperymenty na stanowisku laboratoryjnym. Uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania obowiązującej *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o*

stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2014 poz. 1852) i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.

T. Głuska

Wniosek o wyróżnienie pracy

Nie wątpię, że publiczna obrona pracy doktorskiej zakończy się wynikiem pozytywnym. Wyróżniam wysoki poziom naukowy monografii doktorskiej, a ponadto:

- ✓ zakres badań, organizację badań i sposób ich przeprowadzenia; badania były czasochłonne i trudne w realizacji, Doktorant doskonale rozwiązał te trudności,
- ✓ znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta, w tym artykuły opublikowane w czasopiśmie o wysokim poziomie naukowym i naukowo - technicznym: Archives of Electrical Engineering; Czasopismo Techniczne (15 punktów na liście MNiSW); Przegląd Elektrotechniczny.

W mojej ocenie doktorat zasługuje na wyróżnienie i taki wniosek stawiam Wysokiej Radzie Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.

T. Głuska