

Prof. Haitham Abu-Rub
Hamad Bin Khalifa University
Smart grid centre
Electrical and Computer Engineering Department

Doha, 2 June, 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Deepak Vyas

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI
Politechniki Gdańskiej
Wpłynęło dnia 16. 06. 2025

"Investigation and synthesis of selected control systems of multi-phase interior permanent magnet synchronous machine"

Przygotowanej pod opieką: Prof. dr hab. inż. Marcina Morawca

1. Wstęp

Rozprawa została przygotowana w sposób poprawny i jest dobrze przedstawiona. Zaproponowano w niej struktury sterowania, które pozwalają na rozwiązanie skomplikowanego problemu w obszarze napędów wielofazowych z maszynami synchronicznymi z magnesami trwałymi (IPMSM). Doktorant przedstawił własne rozwiązanie, przeprowadził szeroko zakrojone badania symulacyjne i eksperymentalne oraz dokonał szczegółowego porównania proponowanego rozwiązania z niektórymi istotnymi rozwiązaniami, które są dostępne w literaturze technicznej.

2. Informacje ogólne

Prowadząc badania w ramach studiów doktoranckich, doktorant opracował kompleksową metodę sterowania dla silników wielofazowych z magnesami trwałymi (liczbę faz ograniczono do trzech i pięciu). Zaproponowane podejście do sterowania wykorzystuje estymatory stanu do identyfikacji niektórych zmiennych stanu i prowadzi do zmniejszenia liczby wymaganych czujników, jednocześnie prezentując bezczujnikowe podejście do kontroli prędkości. Następnie doktorant zastosował technikę sterowania multiskalarnego, aby wykorzystać estymowane zmienne stanów i regulować pozostałe (mierzone lub niemierzone). Dodatkowo, technika backstepping została wykorzystana w celu poprawy jakości sterowania oraz zapewnienia stabilności i poprawy wydajności całego systemu sterowania. W rozprawie szczegółowo przedstawiono i omówiono analizę stabilności zarówno obserwatora, jak i układu sterowania.

3. Ocena wyboru tematyki badawczej

Wybór tematu badawczego oceniam jako doskonały i dobrze uzasadniony. Proponowane badania dotyczą sterowania silnika IPMSM, koncentrując się na redukcji czujników poprzez estymację stanu i zaawansowane strategie sterowania, takie jak transformacja multiskalarna, sterowanie predykcyjne i sterowanie z wykorzystaniem metody backstepping. Temat jest aktualny i dobrze wpisuje się w bieżące trendy badawcze w zakresie napędów elektrycznych i systemów sterowania w wiodących instytucjach badawczych.

4. Cel i teza rozprawy

Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie kompleksowej metody sterowania trójfazowym i pięciofazowym silnikiem IPMSM: "Badanie i synteza wybranych układów sterowania

wielofazowej wewnętrznej maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi". Cel ten został osiągnięty poprzez przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Doktorant określił tezy rozprawy jako:

- I. Zaproponowana transformacja multiskalarna wykorzystana w stacjonarnym układzie współrzędnych pięciofazowego IPMSM dla zdefiniowanych wektorów: $\psi_f(i), i_s(i)$ wektorów oraz $\psi_s(i), i_s(i)$ wektorów, pozwala na wyznaczenie statycznych praw sterowania ze sprzężeniem zwrotnym stanu dla obu strategii sterowania
- II. W proponowanych strukturach systemu sterowania uwzględniono klasyczne regulatory proporcjonalno-całkujące (PI), predykcyjne i backstepping. Ponadto te podejścia do sterowania zapewniają niezależną kontrolę zmiennych stanu w podsystemach elektromechanicznych i elektromagnetycznych, nawet jeśli trzecia harmoniczna jest wstrzykiwana.
- III. W proponowanej strukturze systemu sterowania wykorzystującego wektory $\psi_f(i), i_s(i)$ i $\psi_s(i), i_s(i)$ we współrzędnych stacjonarnych pięciofazowego IPMSM pozwala na wykorzystanie wstrzykiwania trzeciej harmonicznej w celu zwiększenia wartości wyjściowego momentu obrotowego.

Wybór celu i tez rozprawy oceniam jako doskonały.

5. Szczegółowa ocena rozprawy

Rozprawa jest dobrze zorganizowana, a jej treść poprawnie przedstawiona. Autor przedstawia interesujące rozwiązanie techniczne oraz obszerną analizę i dyskusję uzyskanych wyników. W trakcie przygotowywania recenzji pojawiły się pewne uwagi i pytania, które zostały przedstawione w następnym rozdziale.

Praca liczy 171 stron i jest dość obszerna. Przedstawiono w niej 6 rozdziałów, bibliografię i dwa załączniki. Nie znaleziono błędów o charakterze merytorycznym. Doktorant w rozprawie doktorskiej przedstawił syntezę wybranych metod sterowania bezczujnikowego wielofazowej maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi. Badania ograniczono do maszyny wielofazowej o liczbie faz 3 i 5. W zaproponowanych strukturach regulacji maszyny z magnesami trwałymi wykorzystano podejście z transformacją do zmiennych multiskalarnych i sterowania ze sprzężeniem zwrotnym oraz regulatorami proporcjonalno-całkowymi (PI), sterowania backstepping i predykcyjnego. W celu zwiększenia momentu elektromagnetycznego do około 15 % momentu znamionowego, zaproponowano dodatkowy układ regulacji umożliwiający iniekcję trzeciej harmonicznej. Zaproponowane rozwiązania zapewniają niezależne sterowanie podsystemami elektromechanicznym i elektromagnetycznym w każdej płaszczyźnie wektorowej układu. Rozprawa doktorska zawiera analizę teoretyczną, symulacyjną oraz eksperymentalną zaproponowanych układów regulacji na dwóch maszynach: trójfazowej i pięciofazowej o mocy 3,5 kW. Analiza teoretyczna dotyczyła modelu matematycznych silnika wielofazowego w oparciu o metodę z wykorzystaniem strumienia aktywnego wirnika, analizę stabilności wybranych struktur sterowania oraz analizę stabilności obserwatora prędkości i położenia wirnika. Każda z zaproponowanych struktur sterowania została odpowiednio wyjaśniona, skomentowana i zweryfikowana w sposób symulacyjny i eksperymentalny.

W badaniach symulacyjnych porównano właściwości wybranych struktury regulacji w kontekście szybkości regulacji, przeregulowań oraz błędów estymacji.

W badaniach eksperymentalnych skoncentrowano się na przedstawieniu właściwości maszyny pięciofazowej IPMSM dla zakresów pracy: niskich prędkości wirnika $< 10\%$, prędkości znamionowych oraz dla prędkości wyższych od znamionowych (do dwukrotnej prędkości znamionowej wirnika). Przeprowadzono również testy wybranych struktur regulacji dla zmiennej wartości momentu obciążenia silnika. Doktorant wykazał, że struktury regulacji pozwalają na zwiększenie momentu elektromagnetycznego silnika do około 12-15 %, przy odsprężeniu torów regulacji (podsystemów regulacji) oraz odsprężeniu pomiędzy układami regulacji zmiennych w dwóch płaszczyznach (dla harmonicznej podstawowej i trzeciej harmonicznej).

Uważam, że do najważniejszych osiągnięć Doktoranta przedstawionych w rozprawie należy zaliczyć:

- syntezę wybranych układów sterowania dla maszyny pięciofazowej z magnesami trwałymi,
- analizę struktur regulacji opartych na transformacji multiskalarnej z wykorzystaniem linearyzacji przez sprzężenia zwrotne z regulatorami PI, sterowaniem backstepping i sterowaniem predykcyjnym;
- analizę stabilności układu zlinearyzowanego przez sprzężenia zwrotne oraz dobór nastaw regulatorów PI;
- implementacja opracowanych struktur sterowania na stanowisku eksperymentalnym z silnikiem trójfazowym i pięciofazowym. Badania eksperymentalne i symulacyjne wraz z ilościową i jakościową analizą porównawczą.

Podsumowując, zaproponowane przez Doktoranta nowe struktury sterowania pozwalają na rozwiązanie skomplikowanego problemu w obszarze napędów wielofazowych z maszyną synchroniczną z magnesami trwałymi. Układy regulacji są bezczujnikowe, gdyż zastosowano w nich obserwator prędkości kątowej wirnika i położenia. Doktorant przeprowadził szeroko zakrojone badania symulacyjne i eksperymentalne potwierdzone licznymi rysunkami w rozprawie. Dokonał szczegółowego porównania proponowanego rozwiązania z niektórymi istotnymi rozwiązaniami, które są dostępne w literaturze technicznej w szczególności ze sterowaniem wektorowym FOC.

6. Uwagi ogólne

1. W streszczeniu, na stronie 3, wspomniano: "Rozprawa doktorska przedstawia syntezę wybranych bezczujnikowych metod sterowania wielofazową maszyną synchroniczną z magnesami trwałymi. Badania ograniczono do maszyn 3 i 5 fazowych.". Ważne jest, aby podkreślić oryginalny wkład i określić, które części zostały zaadoptowane z literatury.
2. Strona 21: To stwierdzenie nie jest dokładne: „w istniejącej literaturze brakuje analiz i dyskusji na temat zaawansowanych systemów sterowania, w których rozważana jest nieliniowa transformacja zmiennych stanu”. Istnieje wiele zaawansowanych regulatorów nieliniowych, a także wiele skutecznych metod odsprężania stanów i nieliniowości.
3. Na temat sterowania multiskalarnego dla maszyn wielofazowych powstało już wiele publikacji. Czy warto tutaj pokazać kluczowe różnice między proponowanym „sterowaniem transformacją multiskalarną” a najnowocześniejszymi metodami?
4. W rozdziale 3 zaproponowano metodę estymacji stanu. Jednak przedstawiony obserwator jest znany jako obserwator Luenbergera.

5. Analiza stabilności przedstawiona w punkcie 3.5 została przeprowadzona dla określonych parametrów. Chociaż autor przetestował różne parametry i przeanalizował stabilność:
 - a) dobrze, aby podkreślić, czy istnieje jakiś zestaw zmiennych, które prowadzą do niestabilnej pracy,
 - b) struktura obserwatora w ogóle - a obserwator Luenbergera w szczególności - zależy od dokładności modelu dynamicznego. Oznacza to, że niepewność parametrów będzie miała wpływ na stabilność. Dlatego zaawansowane metody stabilności, takie jak Lyapunov, mogą być pomocne w analizie stabilności proponowanego podejścia do sterowania w rozdziale 4.
6. W jaki sposób można zagwarantować pełne odsprężenie na schemacie blokowym proponowanego układu sterowania (rys. 4.4)? We wstępie doktorant wspomniał, że w literaturze dostępne metody sterowania prowadzą do „niedoskonałego odsprężania”.
7. Metoda strojenia wzmocnienia nie jest jasna. Sekcja 4.4.2 pokazuje równania dynamiki błędu w funkcji wzmocnień, ale nie pokazuje wyraźnie, jak je dostroić. Oczekuje się, żeby doktorant przedstawił to w następującej postaci: $K_p(k+1) = K_p(k) + \Delta e_{ij}(k) + f(e_{ij})$.

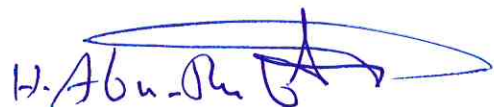
7. Pytania

1. Dlaczego doktorant nie wykorzystał popularnych odpornych obserwatorów stanu, takich jak filtr Kalmana, obserwator ślizgowy itp.
2. Jakie będą przewidywane rezultaty rozprawy doktorskiej? Nie wspomniałeś o swoich publikacjach.
3. W jaki sposób można rozszerzyć pracę na większą liczbę faz?

8. Wniosek końcowy

Przedłożona rozprawa doktorska stanowi oryginalny i wartościowy wkład w rozwiązanie skomplikowanego i aktualnego problemu naukowego. Jakość rozprawy doktorskiej, jak również przejrzystość i dogłębność prezentowanych treści, jest na bardzo wysokim poziomie akademickim. Doktorant wykazał się solidną wiedzą poprzez wszechstronne analizy teoretyczne, poparte badaniami symulacyjnymi i walidacją eksperymentalną. Podjęty problem badawczy jest aktualny i istotny z praktycznego punktu widzenia, a zaproponowane rozwiązanie wykazuje duży potencjał do szerszego zastosowania.

Doktorant jest współautorem czterech publikacji (jednej recenzowanej publikacji w czasopiśmie IEEE (Q1), dwóch opublikowanych w Bulletin of the Polish Academy of Technical Sciences (Q3) i jednego artykułu w czasopiśmie AEEE (Q3). Wszystkie są tematycznie zgodne z rozprawą doktorską. W związku z tym rekomenduję przyjęcie jej do obrony.



Prof. Haitham Abu-Rub
Hamad Bin Khalifa University
Doha, Qatar