

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 12.04.2014

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Nowaka

pt. Analiza wrażliwości asynchronicznych napędów trakcyjnych sterowanych wektorowo na zmiany parametrów

Recenzja wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej.

1. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy obejmuje badanie i porównanie wrażliwości na dokładność parametrów dwóch układów regulacji napędów z silnikiem indukcyjnym. Jednym z badanych napędów jest układ z pośrednią połową orientacją układu współrzędnych (IFOC), natomiast drugim jest układ z pośrednią prądową orientacją układu współrzędnych (ICOC). Autor przedstawił metodę analizy wrażliwości układów sterowania, przeprowadził badania symulacyjne oraz potwierdził uzyskane rezultaty badaniami eksperymentalnymi.

Badania wrażliwości układów sterowania na dokładność parametrów użytych w algorytmach regulacji nie są często opisywane w literaturze. Analiza teoretyczna wrażliwości układów napędowych jest złożona, wymaga przeprowadzenia żmudnych wyprowadzeń, a wyniki nie są bezpośrednio widoczne. Konieczne jest przeprowadzenie badań symulacyjnych, wymagających dobrej znajomości metod modelowania maszyn elektrycznych oraz analizy układów regulacji. Złożone jest również prowadzenie badań eksperymentalnych, które wymaga bardzo dobrego opanowania warsztatu badawczego.

Powyższe uwarunkowania powodują, że pomimo dużej wartości poznawczej opisanych badań, otrzymywanych zwłaszcza przy porównywaniu różnych układów, liczba prac

dotyczących porównawczego badania wrażliwości układów napędowych jest mała. Badania wrażliwości mają szczególnie duże znaczenie na etapie wyboru układu regulacji przewidzianego do zastosowania w technice napędowej.

Na tle stanu techniki i badań można zatem stwierdzić, że podjęta przez Autora tematyka rozprawy jest aktualna pod względem naukowym i ważna dla zastosowań praktycznych.

2. Ogólna analiza merytoryczna rozprawy

Celem pracy jest analiza porównawcza połowo-zorientowanego układu pośredniego sterowania momentem i strumieniem z symulatorem (FOSB-ITFC) i prądowo-zorientowanego układu pośredniego sterowania momentem i strumieniem z symulatorem (CO-ITFC) poprzez zbadanie wrażliwości na dokładność parametrów silników indukcyjnych użytych w algorytmach regulacji. Zapewniono identyczne warunki dla obydwu układów, przy czym ograniczono zakres badań do wpływu dokładności indukcyjności wzajemnej uzwojeń stojana i wirnika.

Zaproponowany w 1980 r. przez promotora rozprawy układ CO-ITFC został porównany z układem FOSB-ITFC opisanym w podrozdziale 2.3.

Znany z literatury układ ze sterowaniem połowo zorientowanym został przedstawiony w rozdziale 2.3.1. Autor spróbował wyjaśnić różnicę pomiędzy układem z obserwatorem a układem z symulatorem. Ogólny schemat układu z obserwatorem pokazano na rysunku 2.5. Opis sterowania z obserwatorem podany na stronach 16 i 17 jest niejasny. Na szczegółowym schemacie pokazanym na rysunku 2.6. można rozpoznać znany z literatury tzw. pośredni układ połowo zorientowany, w którym zastosowany jest model zmiennych wirnika. Nie jest to obserwator.

Układ CO-ITFC został opracowany z wykorzystaniem jako stymulatora modelu silnika zapisanego w biegunowym układzie współrzędnych. Autor przedstawił stymulator oparty na modelu silnika indukcyjnego określonym w prostokątnym układzie współrzędnych. Koncepcja i opracowanie tego modelu jest oryginalnym osiągnięciem Autora przedstawionym w rozprawie.

Przedstawione układy regulacji z symulatorami są równoważne w stanach ustalonych. Jest to oczywiste, ponieważ układy te różnią się jedynie układami współrzędnych przyjętymi do zapisu zmiennych i równań. Autor pokazał analitycznie, że również nadążanie stanu elektromagnetycznego silnika za stanem stymulatora dla odchyień od warunków początkowych jest identyczne w obydwu przypadkach.

Analizę wrażliwości układów sterowania wektorowego Autor poprzedził przeglądem metod sterowania wektorowego podanym w podrozdziale 3.1. Przegląd obejmuje wiele znanych metod, ze szczególnym uwzględnieniem polskich rozwiązań. Nie jest jasne w jakim celu Autor zamieścił rysunek 3.1. Jest to rozkład pola magnetycznego w obwodzie magnetycznym silnika z zagłębionymi magnesami, a nie, jak podpisano, rozkład pól w silniku indukcyjnym.

Statyczną wrażliwość badanych układów ze stymulatorem na różnice parametrów modelu i silnika Autor przedstawił w podrozdziale 3.2. Pokazał analitycznie, że obydwa układy są równoważne w stanach ustalonych.

Istotną częścią rozprawy jest podrozdział 3.3, w którym Autor przedstawił analityczne modele wrażliwości trzech układów zaprezentowanych w rozdziale 2. Modele wrażliwości są złożone i zwykle ich otrzymanie wymaga przeprowadzenia skomplikowanych przekształceń. Śledzenie tych przekształceń w podrozdziale 3.3 jest trudne, ponieważ Autor wprowadził kilka własnych niezdefiniowanych oznaczeń. Rozprawa zawiera wprawdzie wykaz ważniejszych oznaczeń na stronie 2, jednak ograniczony do powszechnie przyjmowanych symboli. Przykładem jest symbol $I_{s\varphi}^*$. Nie jest to prąd, jak można się domyślać, lecz kąt. Indeksy są mylące, a poza tym kąt ten zdefiniowany jest wyłącznie na rysunku 3.3. Nie jest to dobry styl pisania rozprawy.

Przez niekonsekwencję oznaczeń niezrozumiały jest wzór (3.116) i dalej (3.117). W akapicie powyżej występuje zależność $p=L_m$, natomiast kąt $I_{s\varphi}^*$ zależy od p , a poza tym w tym samym wzorze p oznacza liczbę par biegunów.

Literą V oznaczono pochodną cząstkową zmiennej względem parametru. Nie ma w rozprawie definicji modelu wrażliwości i dopiero z tekstu można się domyślać, że równanie, w którym występuje pochodna zmiennej V jest modelem wrażliwości.

Ostatecznie Autor otrzymał zależności dla przyrostów zmiennych sterujących silnikiem oraz dla częstotliwości poślizgu w funkcji zmian parametrów w układzie regulacji. Dla badanych układów zmienne sterujące są różne. Autor nie pokazała zależności przeliczonych dla tych samych zmiennych, co uniemożliwia wykorzystanie zależności analitycznych do porównania wrażliwości badanych modeli.

Wrażliwość przedstawionych metod sterowania silnikiem indukcyjnym Autor zbadał metodą symulacji cyfrowych oraz eksperymentalnie. Wyniki badań, zarówno symulacyjnych jak i eksperymentalnych, przedstawiono dla innych zmiennych niż w przypadku analizy teoretycznej, co znacznie utrudnia interpretację rezultatów.

Pomimo wymienionych wyżej utrudnień można zadać pytanie, dlaczego zmienna „prąd” na rysunkach 4.1, 4.2 i 4.3 odtwarzana jest bezbłędnie, skoro w równaniach wrażliwości na parametry, np. (3.51) i (3.53) zależność od parametrów występuje.

Brakuje w rozprawie wykorzystania zależności analitycznych otrzymanych przy analizie wrażliwości do obliczeń wartości zmiennych przy zmianach parametrów. Wskazane byłoby porównanie wyników takich obliczeń z wynikami przeprowadzonych symulacji i badań eksperymentalnych.

Autor potwierdził za pomocą przeprowadzonych badania symulacyjnych i eksperymentalnych, że zaprezentowane trzy układy są równoważne w stanach ustalonych, a w stanach dynamicznych występują niewielkie różnice wrażliwości, przy czym określił, które układy są korzystne przy określonych wymaganiach.

Autor wykazał duże umiejętności prowadzenia zarówno rozważań teoretycznych jak i badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Zwłaszcza przeprowadzenie badań wymagało opanowania na wysokim poziomie metod programowania i wykonywania eksperymentów.

3. Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest dobrze opracowana od strony redakcyjnej. Poza wspomnianymi wcześniej niedogodnościami wynikającymi z braku definicji niektórych oznaczeń literowych tekst jest napisany zwięzłym, jasnym stylem.

6. Ocena ogólna i wniosek końcowy

Autor wykazał dużą wiedzę teoretyczną z zakresu elektrotechniki i automatyki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co świadczy o spełnieniu wymagań stawianych przy nadawaniu stopnia naukowego doktora.

Uwagi krytyczne przedstawione wyżej mają charakter dyskusyjny i nie pomniejszają wartości pracy. Autor rozwiązał samodzielnie postawione problemy naukowe i wykazał ogólną wiedzę w zakresie elektrotechniki. Stwierdzam, że praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w Art. 13.1 Ustawy z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw¹⁾ i stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.

(prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński)