

Dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. nzw. PL
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 28.09.2018 r.

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. BARTOSZA ROZEGNAŁA PT. „TRÓJFAZOWY FALOWNIK NAPIĘCIA Z ŁAGODNYM PRZEŁĄCZANIEM TRANZYSTORÓW ODPORNYM NA ZAKŁÓCENIA STEROWANIA”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo dziekana Wydziału Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej Politechniki Krakowskiej z dnia 28.06.2018 r.

1. Ocena problematyki rozprawy

Problematyka ocenianej rozprawy doktorskiej obejmuje zagadnienia związane z opracowaniem nowych konstrukcji trójfazowych falowników napięcia charakteryzujących się miękkim przełączaniem tranzystorów. Zadanie uzyskania miękkiego przełączania tranzystorów wynika z potrzeby minimalizacji strat mocy w energoelektronicznych elementach sterowanych i zwiększenia sprawności tych układów przekształtnikowych. Taka potrzeba jest jak najbardziej uzasadniona. W wielu ośrodkach badawczych na świecie trwają badania nad uzyskaniem wysokosprawnych rozwiązań przekształtników. Istnieje szereg metod poprawy sprawności tych układów. Ze względu na konstrukcje można je podzielić na trzy grupy, w których poprawę sprawności uzyskuje się poprzez:

- zastosowanie niskostratnych elementów półprzewodnikowych, np. tranzystory oparte na strukturze węgla krzemu lub azotku galu,
- opracowanie wielopoziomowych topologii pozwalających na redukcję strat przełączania,
- opracowanie układów z miękkim przełączaniem tranzystorów.

Niezależnie od tego, należy pamiętać, że decydujący wpływ na oszczędzanie energii mają zastosowane metody sterowania, które całościowo biorą pod uwagę przekształtnik, układ wykonawczy i proces technologiczny. Oszczędności energetyczne i finansowe mogą wynikać wówczas np. z zastosowania efektywnych metod precyzyjnego sterowania wektorowego czy zarządzania realizacją określonych procesów technologicznych uwzględniających sposoby ograniczania i zarządzania wykorzystaniem energii, czyli zastosowania tzw. metod demand side response.

Przedstawione w rozprawie rozważania należą więc do jednej z wymienionych metod konstrukcyjnych minimalizacji strat i zwiększania sprawności układów

przekształtnikowych. Tak jak wcześniej stwierdzono, problematyka jest bardzo ważna i istotna dla całej branży energoelektronicznych układów przekształtnikowych. Z tego względu uważa, że wybór problematyki i jej zakres merytoryczny rozprawy za bardzo trafny.

2. Struktura i ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa obejmuje 127 stron i podzielona jest na osiem numerowanych rozdziałów, bibliografię oraz spis ważniejszych symboli i oznaczeń. W części uzupełniającej, na stronach 18–143 znajdują się dodatki, w których Autor podaje noty katalogowe oraz wybrane listingi programu.

Układ treści jest uporządkowany logicznie. W części wstępnej Autor uzasadnia podjęcie tematu. Wyjaśnia stosowane nazewnictwo, formułuje cel rozprawy oraz przedstawia problematykę poruszaną w poszczególnych rozdziałach. W rozdziale drugim omawia straty w układach przekształtnikowych, skupiając szczególną uwagę na stratach przełączania tranzystorów. Stan wiedzy nt. falowników o miękkiej komutacji jest dyskutowany w kolejnym rozdziale. Autor przytacza znane z literatury rozwiązania, a na podstawie przedstawionych argumentów formułuje konkluzję, że najbardziej obiecujące ze względu na możliwości sterowania i odporność na zakłócenia są wśród falowników o miękkiej komutacji układy z indywidualnymi, względem tranzystorów głównych, obwodami wspomagającymi komutację. Niestety mankamentem znanych rozwiązań jest złożoność sterowania i podatność na powstawanie przepięć prowadzących do uszkodzenia tranzystorów. **Stąd Doktorant stawia przed sobą problem badawczy opracowania takiego układu, jego przebadania i dowiedzenia czy jest to rozwiązanie konkurencyjne względem innych układów tego typu.** Istotny wkład w realizację tego zadania znajduje się już w rozdziale czwartym, którego zawartość już we wstępie określona została za główną część rozprawy. Przedstawione są tam schematy, poglądowe przebiegi, dobór parametrów i wpływ ich poprawnego doboru na charakterystyki miękkiego przełączania tranzystorów.

Badania modelowe polegające na analizie numerycznej przedstawione są w rozdziale piątym. Symulacje pracy falownika wykonano dla różnych parametrów układu rezonansowego z odbiorem typu RL oraz w postaci silnika indukcyjnego klatkowego. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność konstrukcji a uzyskaną wiedzę wykorzystano dalej podczas badań laboratoryjnych opisanych w rozdziale 6.

Z uwagi na ograniczenia sprzętowe, badania laboratoryjne wykonano dla falownika o dopuszczalnym prądzie 15A i napięciu 100V przy częstotliwości przełączeń tranzystorów 1 kHz i 3 kHz. Uzyskane wyniki zilustrowano na przebiegach prądu i napięcia tranzystora głównego i pomocniczego.

W kolejnym rozdziale analizę rozszerzono o badanie zależności pomiędzy maksymalną ustaloną wartością prądu tranzystora, współczynnikiem krotności napięcia maksymalnego w układzie rezonansowym a minimalnym czasem przewodzenia tranzystora głównego. Uzyskane wielkości określają istotne ograniczenia badanego układu i stanowią ważne osiągnięcie Autora. W rozdziale tym obliczono również straty w poszczególnych

elementach badanego przekształtnika, a w dalszej części całkowite straty szacowane dla falowników 100 kW i 1 MW. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach.

W podsumowaniu rozprawy podkreślono, że uzyskano poprawną pracę falownika, którego tranzystory główne jak i pomocnicze przełączane są miękko. Uzasadniono, że uzyskane wyniki badań koncepcyjnych, modelowych i laboratoryjnych świadczą o spełnieniu celu i udowodnieniu problemu badawczego rozprawy.

3. Uwagi ogólne

Recenzowana praca stanowi oryginalne dzieło w zakresie opracowania nowego układu trójfazowego falownika napięcia o komutacji miękkiej. Autor na podstawie wcześniejszego patentu, którego był współautorem, zbudował model rzeczywisty, opracował układ sterowania i przebadał go. Opracował również model numeryczny, dla którego wykonał szereg obliczeń i symulacji.

Struktura rozprawy jest poprawna. Widoczna jest duża dbałość o zachowanie odpowiedniego układu logicznego. Mimo to nasuwa się szereg pytań, wśród których wymienić można następujące zagadnienia do dyskusji:

- A. Na jakiej podstawie Autor uważa, że opracowany układ jest układem odpornym na zakłócenia?
- B. Czy rozważane były dla opracowanego przekształtnika inne metody modulacji niż omawiana w pracy modulacja sinusoidalna?
- C. Brak satysfakcjonującego uzasadnienia bardzo uproszczonego modelu tranzystora IGBT. Odwołanie się do pracy doktorskiej, w której zastosowano ten model nie jest poprawnym uzasadnieniem, gdyż nie znamy recenzji tej pracy.
- D. Przeprowadzenie obliczeń porównawczych dla falownika z komutacją miękką i twardą komutacją dla tych samych tranzystorów na napięcie 6,5 kV budzi znaczące zastrzeżenia, gdyż przy komutacji twardej nie ma potrzeby stosowania tranzystorów o tak dużym napięciu. Tranzystory na taką wysoką wartość napięcia mają strukturę wielowarstwową, co powoduje, że spadek napięcia na nich jest wyraźnie wyższy niż dla tranzystorów o kilkukrotnie niższym napięciu.
- E. Przedstawione obliczenia i pomiary strat mocy powinny być w przyszłości powtórzone. Zaleca się, aby uwzględniono zarzut D. niniejszej recenzji. W jaki sposób Autor zamierza zwiększyć dokładność obliczeń strat mocy oraz zrealizować odpowiednie badania laboratoryjne?

4. Uwagi szczegółowe

Redakcja pracy jest staranna, ale zawiera pojedyncze pomyłki edytorskie. Polegają one głównie na interpunkcji i błędnym zapisie słów lub niepoprawnej formie gramatycznej. Nie mają one jednak praktycznego znaczenia, warto tym niemniej aby w udostępnianej po obronie wersji elektronicznej Autor wyeliminował te pomyłki. Poza tego typu błędami, wątpliwości budzą następujące kwestie:

- a. dlaczego parametry modelowanych i symulowanych układów nie odpowiadają laboratoryjnemu układowi? str. 5, 10 wers od dołu (wod): Co oznacza określenie "prawie sinusoidalny". W rozważaniach naukowych ten termin nie powinien się znaleźć;
- b. rys. 3.1 str. 21: prawdopodobnie górny i dolny wykres są przesunięte w czasie względem siebie, czy jest to pomyłka edytorska?
- c. str. 21, 7-9 wers od góry (wog): Straty przełączania można ograniczyć również przez zastosowanie tranzystorów o wyższej generacji;
- d. poglądowe przebiegi przedstawiono przy założeniu zerowej rezystancji cewek oraz pojemności pasożytniczych tranzystora. Brak dyskusji uzasadniającej możliwość wykonania takiego założenia.
- e. str. 42, wzór (4.2): W jakim stopniu pominięcie rezystancji cewek wpływa na dokładność wyznaczenia parametrów indukcyjności?
- f. dlaczego na żadnym etapie badań nie obliczano parametrów THD napięcia?
- g. brak konsekwencji wyboru częstotliwości przełączania tranzystorów. W rozdz. II na stronie 19 wybrano 3 i 6 kHz, a w rozdz. V na stronie 61 już tylko 1 i 3 kHz.
- h. str. 88, 7 wod: W jaki sposób oszacowano straty mocy? Określenie, że zrobiono to na podstawie wykresów jest niewystarczające.

5. Ocena rozprawy

Praca napisana jest bardzo zwięzłym językiem, jej układ jest przejrzysty i nie zawiera zbędnych powtórzeń. Układ treści jest logicznie uporządkowany. W rozprawie podano koncepcję rozwiązania. Szczegółowo wyjaśniono zasady działania, wykonano modele numeryczne, dla których sporządzono obliczenia strat w elementach i strat całkowitych układu. Poprawność koncepcji falownika z miękką komutacją potwierdzono poprzez zbudowanie falownika i jego przebadanie. W opinii recenzenta do najważniejszych osiągnięć należą:

- Opracowanie koncepcji trójfazowego dwupoziomowego falownika napięcia o miękkim przełączaniu.
- Opracowanie analizy działania oraz wyprowadzenie zależności na parametry układu.
- Budowa modelu numerycznego i określenie przydatnych podczas projektowania zależności pomiędzy parametrami obwodu rezonansowego i wielkościami prądowo-napięciowymi.
- Wykazanie, że wszystkie tranzystory falownika przełączane są miękko, a opracowany układ sterowania w dużym stopniu zabezpiecza tranzystory przed awaryjnymi stanami pracy.

Opracowanie, zbudowanie i przebadanie dwupoziomowego falownika napięcia o miękkiej komutacji potwierdzają poprawność przeprowadzonych rozważań. **Uzyskane wyniki są zgodne z postawionymi celami, że tranzystory główne jak i pomocnicze przełączane są miękko, co świadczy jednoznacznie o rozwiązaniu postawionego we wstępie problemu badawczego.**

6. Podsumowanie i końcowy wniosek

W rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Bartosz Rozegnał wykazał się ogólną wiedzą ogólną w **dyscyplinie naukowej elektrotechnika** oraz szczegółową wiedzą w zakresie tematyki rozprawy. Dowiódł umiejętności opracowania nowych miękko-przełączalnych układów falownikowych, formułowania modeli numerycznych, planowania i przeprowadzania badań laboratoryjnych oraz analizy uzyskanych wyników. Świadczy to o nabyciu kwalifikacji do prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgra inż. Bartosza Rozegnała uznać za istotny wkład Autora w rozwój układów falownikowych o komutacji miękkiej.

Na tej podstawie stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 13 pkt.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późn. zm.) a także w stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Rozegnała do publicznej obrony przed komisją doktorską Wydziału Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej Politechniki Krakowskiej.

