

Prof. dr hab. inż. Robert Stala
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

Kraków, 20.11.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Woszczyny pt.: „Indywidualne, miękkie przełączanie tranzystorów w trójfazowym, trójpoziomowym falowniku napięcia”

Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt.: „Indywidualne, miękkie przełączanie tranzystorów w trójfazowym, trójpoziomowym falowniku napięcia”, autorstwa mgr. inż. Bartosza Woszczyny została opracowana pod opieką promotora dr. hab. inż. Witolda Mazgaja, prof. Politechniki Krakowskiej, oraz promotora pomocniczego dr. inż. Marka Dudzika z Politechniki Krakowskiej. Recenzja zrealizowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej pismem z dnia 21.09.2023 o numerze E-00-510.2.2023.

Praca zawiera 9 rozdziałów głównych, a także bibliografię, streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz wykaz oznaczeń, a całkowita objętość pracy to 114 stron. Praca związana jest z tematyką ograniczania strat energii w przekształtniku energoelektronicznym przez opracowanie modyfikacji jego topologii oraz sterowania. Jest to tematyka ważna i aktualna, ponieważ redukcja strat energii przy jej przekształcaniu jest jednym z istotnych kryteriów optymalizacji przekształtników. Wybór tematu oraz jego zakres, obejmujący badania przekształtnika trójpoziomowego typu NPC (neutral point clamped) jest prawidłowy ze względu na istotne znaczenie falowników w zastosowaniach przemysłowych.

W rozdziale wprowadzającym autor prawidłowo charakteryzuje zagadnienie badawcze, jego zakres i cel, wymieniając tu „główny cel pracy”, jakim jest „szerokie omówienie działania trójfazowego, trójpoziomowego falownika napięcia z diodami poziomującymi, w którym zastosowano układ miękkiego przełączania w celu ograniczenia strat powstających podczas załączania i wyłączenia tranzystorów.” Z opisu zawartości pracy zamieszczonego we wprowadzeniu wynika, że badania obejmowały analizę układu, dobór parametrów oraz jego badania symulacyjne, modelowanie i analizę numeryczną oraz testy eksperymentalne. Zakres badań pozwala na właściwe scharakteryzowanie działania falownika w analizowanej topologii, wpływ sterowania a także strat energii w elementach układu, co poddano wnikliwej analizie, ponieważ modyfikacja badanego układu umożliwiła redukcję strat energii podczas przełączeń tranzystorów.

Poza wynikami badań autora rozprawa, w rozdziale drugim, zawiera właściwe informacje wstępne charakteryzujące podstawową topologię układu trójpoziomowego z, a także koncepcję modulacji i zagadnienia teoretyczne bilansu strat mocy w elementach przekształtnika.

W rozdziale trzecim rozprawy omówiono metody ograniczania strat energii w przekształtnikach przez zmniejszenie strat przełączania tranzystorów wyjaśniając koncepcję załączania tranzystora przy zmniejszonej wartości prądu kolektora (ZCS) i zerowym napięciu kolektor-emiter (ZVS). W rozdziale tym, z wykorzystaniem odwołań do literatury, dokonano klasyfikacji metod miękkiego i przełączania tranzystorów w falownikach na układy wspomagania grupowego i indywidualnego. Dla scharakteryzowania problemów wspomagania grupowego, wybrano dwa układy, które spełniają funkcję miękkiego przełączania z wykorzystaniem dodatkowych elementów, w tym obwodów z dławikami szeregowo połączonymi z tranzystorami w gałęzi o zdolności dwukierunkowego blokowania prądu, co stwarza zagrożenie wystąpienia przepięcia przy przerwaniu prądu tych obwodów. Obszernie omówiono również znane z literatury koncepcje układów z obwodami pomocniczymi miękkiego przełączania dla każdej fazy. Autor przedstawił to dwa schematy przykładowych rozwiązań i konkludując te metody wymienił główne problemy związane z możliwością rozładowania kondensatorów pomocniczych, przerwania prądu w obwodach z dławikami oraz komplikacją sterowania uogólniając to stwierdzenie na podstawie cytowanej literatury. Istotnym byłoby tu jednak bardziej szczegółowe przedstawienie poszczególnych rozwiązań szczególnie tych, które nie posiadają wyżej wymienionych problemów.

W rozdziale 4 wprowadzono topologię analizowanego w pracy układu przekształtnika z miękkim przełączaniem tranzystorów. Zawarto to przejrzyste wyjaśnienie działania układu, chociaż opis topologii z początkowej części rozdziału jest raczej w konwencji zgłoszenia patentowego. Szczegółowe omówienie zasady działania, w trybie miękkiego przełączania oraz sterowania poszczególnych tranzystorów poszczególnych przedziałach czasu jest jednak zwięzłe i zrozumiałe. Bardzo ważny jest tu podrozdział 4.4 związany z doбором łączników półprzewodnikowych i elementów pasywnych, ponieważ z przedstawionych przebiegów widać, że obwody pomocnicze wprowadzają dodatkowe obciążenie prądowe tranzystora głównego, a ładowanie kondensatorów pomocniczych w trybie miękkiego wyłączania tranzystora głównego może odbywać się przy zwiększonym stresie napięciowym tranzystora głównego.

Badania przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej obejmują również weryfikację eksperymentalną działania układu i koncepcji jego sterowania. W rozdziale 5 rozprawy podano parametry układu laboratoryjnego, który testowano przy mocy 1 kW, zasilając część stałonapięciową z dwóch źródeł napięciu 60 V i zachowując dopuszczalną wartość prądu zasilania na wartości 12 A. Układ zaprojektowano z wykorzystaniem tranzystorów i diod o napięciu blokowania 1200 V. W pracy zamieszczono wystarczającą ilość wyników eksperymentalnych w postaci przebiegów prądów i napięć dla wykazania działania przekształtnika zgodnie z założoną koncepcją. Nie podano natomiast wyników związanych ze stratami energii, co jednak mogłoby nie być istotną oceną ilościową ze względu na prace przy parametrach znacznie mniejszych od napięć znamionowych łączników półprzewodnikowych. Istotnym uzupełnieniem badań stanowią więc wyniki zamieszczone w rozdziale 5 rozprawy uzyskane z wykorzystaniem analizy symulacyjnej układu dla napięć wejściowych o wartości 1000 V i znamionowego prądu fazowego o wartości 400 A. Badania symulacyjne przeprowadzono w programie PLECS, a ich zakres obejmuje analizę przebiegów i ich parametrów, a także modelowanie rzeczywistych na podstawie danych katalogowych tranzystorów i diod. Autor wykorzystał tu możliwość zmiany parametrów elementów pasywnych uzyskując porównanie przypadków działania układu. Istotnym aspektem jaki przeanalizowano jest również wpływ przesunięcia fazowego prądu wyjściowego na liczę przełączeń z miękką komutacją w okresie podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego, co można wykorzystać do projektu falownika dla zdefiniowanego rodzaju obciążenia. Jednym z obciążeń jakie uwzględniono podczas badań symulacyjnych jest silnik indukcyjny.

Poza analizą działania przekształtnika, bardzo istotne przy dla scharakteryzowania układu o miękkim przełączaniu jest analiza strat mocy jego elementów. Wyniki dla tego problemu, a także omówienie metody jaką autor zastosował w swoich badania zawarto w rozdziale 7 rozprawy. Na początku rozdziału 7 określono metodę wyznaczania strat mocy w układzie, która bazuje na obliczeniach uzyskanych w programie symulacyjnym PLECS. Symulacje te obejmują wyznaczenie temperatury elementów półprzewodnikowych oraz modelowanego radiatora. Autor dokonał tu założeń dla temperatury pracy tranzystorów oraz parametrów radiatora przy realizacji symulacji. Przed rozpoczęciem testów badanego falownika przeprowadzono również rzetelną weryfikację metody wyznaczania strat mocy w tranzystorze porównując wartości energii przełączania z danymi katalogowymi tranzystorów oraz porównując wyniki obliczeniowe i symulacyjne dla układu dwupoziomowego falownika napięcia. Dla strat mocy uzyskano zbieżność metod z błędem nie przekraczającym 5%. Dla falownika z twardym oraz miękkim przełączaniem przeprowadzono analizę symulacyjną strat obejmującą aspekty projektowe, takie jak moc znamionową, częstotliwość impulsowania, pojemność i indukcyjności w obwodach pomocniczych miękkiego przełączania, a także współczynnika określającego maksymalną wartość napięcia kondensatora w danym cyklu przełączania, co pozwoliło na wyciągnięcie wniosków dotyczących wpływu parametrów na straty mocy falownika. We właściwy sposób wykorzystano to możliwości programu symulacyjnego uzyskując wyniki sprawności układu oraz straty mocy w poszczególnych elementach falowników dla analizowanych przypadków. Podobnie, w przypadku analiz niepoprawnych stanów pracy falownika z miękkim przełączaniem, wykorzystano badania symulacyjne do demonstracji przypadków niewłaściwego doboru parametrów elementów biernych oraz sterowania. Pozwoliło również to na wyciągnięcie wniosków dotyczących spadku efektywności metody miękkiego przełączania w przypadku zbyt dużych wartości indukcyjności i pojemności w obwodach miękkiego przełączania. Procesy zachodzące w obwodach miękkiego przełączania wymagają zastosowania właściwego sterowania zapewniającego zachowanie odpowiednich okresów czasu dla tych procesów. W rozdziale 8 analizowano również takie przypadki

pracy falownika przy niewłaściwym sterowaniu. Wyniki badań symulacyjnych zamieszczone w pracy bardzo dobrze uzupełniają wyniki eksperymentów i pozwoliły autorowi na demonstrację przebiegów oraz analizę strat mocy w układach o znamionowych parametrach, a także analizę przypadków pracy falownika przy niewłaściwych parametrach.

Praca zawiera liczne wyniki badań, które znacznie rozszerzają wiedzę w obszarze zagadnienia ograniczania strat w falowniku napięcia, szczególnie w kontekście układów przedstawionych w literaturze [48] – [51]. Pozwala to stwierdzić, że mgr. inż. Bartosz Woszczyzna osiągnął cel badawczy określony w rozprawie doktorskiej. Autor proponuje również w podsumowaniu rozprawy kierunki dalszych badań nad układem, które przykładowo mogą być związane z analizą wpływu miękkiego przełączania w falowniku na parametry jego napięcia wyjściowego i zjawiska związane z kompatybilnością elektromagnetyczną.

Zagadnienia dyskusyjne

Tematyka prac badawczych przedstawiona w rozprawie jest złożona, a mgr. inż. Bartosz Woszczyzna uzyskał istotne dla osiągnięcia celów badawczych wyniki z wykorzystaniem analizy, badań symulacyjnych i eksperymentów. Praca nie wymaga poprawy, ale zawarty w rozprawie opis przeprowadzonych badań nasuwa następujące uwagi, które mogą być również podstawą do szczegółowej dyskusji wybranych aspektów pracy:

1. Ponieważ, falowniki badane w ramach tematu rozprawy bazują na tranzystorach IGBT, interesujące byłoby zamieszczenie przebiegów prądu i napięcia kolektor-emiter tranzystora IGBT uzyskanych eksperymentalnie lub symulacyjnie, dla wyjaśnienia powstawania strat mocy podczas twardego przełączania jak to przedstawiono na rys. 2.5 oraz dla pracy z układem miękkiego przełączania, analogicznie do uproszczonych przebiegów przedstawionych na rys. 3.1.
2. W rozdziale 3 rozprawy, gdzie omawiane są „Metody miękkiego przełączania tranzystorów w falownikach napięcia” stwierdza się, że „Główną wadą dotychczas proponowanych układów miękkiego przełączania tranzystorów w trójpoziomowych falownikach napięcia jest (...) niebezpieczeństwo przerwania prądu w tranzystorach pomocniczych, z którymi szeregowo połączone są dławiki indukcyjne” cytując przy tym zdanie literaturę, wraz z pozycją [45]. Jednak w układzie omawianym w artykule, wymienionym w wykazie literatury w pozycji [45], nie występują tranzystory pomocnicze oraz szeregowo połączone z nimi dławiki indukcyjne, więc, że komentarz ten nie powinien odnosić się do przypadku omówionego w [45], podobnie jak uwaga zawarta w dalszej części rozdziału 3 rozprawy „Mankamentem proponowanych układów miękkiego przełączenia tranzystorów są również złożone algorytmy sterowania tranzystorów głównych i pomocniczych [33, 35, 43, 45, 46]”.
3. W rozdziale 4, na stronie 38 napisano, że „W chwili t_{21} środkowy tranzystor główny T12 zostaje wyłączony. Jego prąd maleje skokowo do zera. W tej samej chwili następuje załączenie tranzystora T14.”. W modelu symulacyjnym omawianych na str. 65 i 66 uwzględniono realizację czasu martwego w generatorze sygnałów sterujących. Istotne jest zatem pytanie o różnicę w wymaganiach dla długości czasu martwego w badanym układzie z miękkim przełączaniem oraz klasycznym falownikiem trójpoziomowym.
4. W rozdziale 7.2 przedstawiane są straty i sprawność falownika, przy czym porównania poszczególnych przypadków dokonuje się z wykorzystaniem pojedynczej wartości. Porównanie charakterystyk sprawności w funkcji mocy pozwoliłoby na jeszcze dokładniejsze porównanie poszczególnych przypadków konfiguracji falowników.

Bardziej szczegółowe uwagi dotyczące treści i edycji pracy są następujące:

5. W rozdziale 4, na str. 46 występuje następujący opis sterowania „W chwili t_{11} skrajny tranzystor główny T11 został wyłączony. Jego prąd maleje skokowo do wartości zero. W tej samej chwili następuje wyłączenie tranzystora T13,” a z przebiegów sygnałów sterujących przedstawionych na rys. 4.19. wynika, że sygnał sterujący dla tranzystora T13 jest zanegowany w stosunku do sygnału sterującego tranzystora T11.
6. Interesujące byłoby uzasadnienie, dlaczego układu symulacyjnego do wyznaczania strat, przedstawionego na rys. 7.1 nie skonfigurowano jak dla testu podwójnego impulsu.

7. W rozdziale 4, na str. 55 użyto następującego określenia: „tr jest czasem narastania tranzystora.”. Powinno się użyć analogicznego opisu tej wielkości do zamieszczonego w wykazie oznaczeń na str. 10.
8. W zdaniu „radiator ten dobrano w taki sposób, aby układ w czasie symulacji mógł pracować z temperaturą oscylująca w okolicach 125 °C.”, można było dokładniej określić, którego elementu tranzystora dotyczy wskazana wartość temperatury. W tym zdaniu występuje również błąd edycyjny.
9. Z opisu badań symulacyjnych może nie być całkiem jasne czy wyniki strat mocy przedstawione w rozdziale 7.3 uzyskano dla jednego typu tranzystora.
10. Uzyskanie wyniku zerowych strat łączeniowych w diodach zwrotnych, zamieszczone w rozdziale 7, można było dokładnie uzasadnić.
11. W pracy zamieszczono podrozdział dotyczący doboru indukcyjności dławików, jednak ze względu na wartość prądu jaka występuje w dławikach miękkiego przełączania istotnym byłby również komentarz dotyczący wymagań rzeczywistego dławika miękkiego przełączania w analizowanym układzie.
12. Zdanie „Sprawność trójfazowych, trójpoziomowych falowników z proponowanym układem miękkiego przełączania tranzystorów wzrasta wraz z częstotliwością przełączania.”, zamieszczone w ostatnim akapicie rozdziału 7, wydaje się, że powinno odnosić się do porównania z układem o twardym przełączaniu.
13. Na str. 32 występuje błąd edycyjny w następującym fragmencie zdania: „W większość układów miękkiego przełączania ...”.
14. Na str. 40 występuje błąd edycyjny w następującym fragmencie zdania: „, a niewielki prąd płynie także dławik L16”
15. W wykazie literatury, w pozycji 45 zawarto niepełny tytuł.

Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Bartosz Woszczyna zrealizował prace badawcze w ramach rozprawy doktorskiej pt. „Indywidualne, miękkie przełączanie tranzystorów w trójfazowym, trójpoziomym falowniku napięcia”, uzyskując oryginalne wyniki dla rozwiązania problemu naukowego związanego z realizacją miękkiego przełączania w analizowanej koncepcji układu przekształtnika energoelektronicznego. Przeprowadzone badania analityczne, eksperymentalne oraz symulacyjne, potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia badań oraz ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (wcześniej dyscyplina: automatyka, elektronika i elektrotechnika). Zawarte w niniejszej recenzji uwagi do treści rozprawy mają charakter dyskusyjny i nie wpływają ocenę pracy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Woszczyny pt. „Indywidualne, miękkie przełączanie tranzystorów w trójfazowym, trójpoziomym falowniku napięcia”, spełnia wymagania określone przez ustawodawcę w odniesieniu do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (wcześniej dyscyplina: automatyka, elektronika i elektrotechnika) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Bartosza Woszczyny do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Robert Stala



