

dr hab. inż. Paweł Górecki, prof. UMG

Katedra Elektroniki Morskiej

Uniwersytet Morski w Gdyni

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Radosława Sobieskiego

nt. „Projektowanie przekształtników mocy z elementami z węgla krzemu w obszarze średnich napięć”

1. Uwagi wstępne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Sobieskiego została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej. Rozprawa ta dotyczy badania praktycznej realizacji przekształtnika DC/DC średniego napięcia z wykorzystaniem elementów półprzewodnikowych wykonanych z węgla krzemu. Dzięki zastosowaniu tych nowoczesnych elementów możliwe jest zmniejszenie masy, objętości i hałasu emitowanego przez ten układ. W pracy Doktorant przedstawił projekt takiego przekształtnika wykorzystując znaną z literatury topologię, dostosowując ją do wymagań jakie niesie za sobą wykorzystanie elementów półprzewodnikowych z węgla krzemu. Doktorant zaprojektował niskoindukcyjne połączenia obwodu mocy, układ sterownika bramkowego oraz dedykowanego układu chłodzenia cieczowego. Praktyczna użyteczność zaprojektowanego przekształtnika została zweryfikowana doświadczalnie przez Doktoranta oraz została potwierdzona wdrożeniem w przedsiębiorstwie.

Do ważniejszych osiągnięć Doktoranta należy m.in. opracowanie modeli symulacyjnych: modułu półprzewodnikowego w programie SABER oraz przekształtnika DC/DC w programach PLECS i SABER oraz projekty układu sterownika bramkowego i układu chłodzenia cieczowego. Najważniejszym jednak osiągnięciem Doktoranta jest skonstruowanie przekształtnika DC/DC z wykorzystaniem rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających wykorzystać potencjał modułów SiC MOSFET w zakresie średnich napięć.

Poruszane w pracy zagadnienia są ważne z punktu widzenia współczesnej energoelektroniki. Wyniki uzyskane przez Doktoranta mogą być przydatne dla projektantów

przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia, zawierających elementy półprzewodnikowe wykonane z węgla krzemu.

Tematyka podjęta w ocenianej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna, a częściowe problemy rozważane przez Doktoranta są również poruszane w pracach innych autorów w odniesieniu do innych przekształtników energoelektronicznych. Prace te zostały opublikowane w ostatnich kilku latach. Dowodzi to trafnego wyboru zagadnienia badawczego.

Doktorant wykazał, że przy wykorzystaniu elementów półprzewodnikowych wykonanych z węgla krzemu możliwe jest skonstruowanie przekształtników średniego napięcia o obniżonych: hałasie, masie i objętości względem rozwiązań opartych o elementy krzemowe dzięki wyższej częstotliwości przełączania. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji Doktoranta w zakresie projektowania przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia, w szczególności w obszarach symulacji komputerowych, sterowania tranzystorami wykonanymi z węgla krzemu oraz pomiarów technologii wytwarzania, doboru elementów przekształtnika oraz pomiarów jego charakterystyk.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca liczy łącznie 132 stron i zawiera 6 rozdziałów, spis treści, wykaz cytowanej literatury, a także spis rysunków i tabel, oświadczenie o wdrożeniu oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił planowany zakres wdrożenia, przy jednoczesnym zarysowaniu stanu techniki uwzględniając dotychczasowe aplikacje w obszarze węgla krzemu w obszarze średniego napięcia. ***Sformułował cel pracy, którym było zaprojektowanie, budowa oraz badania eksperymentalne przekształtnika prądu stałego średniego napięcia z elementami SiC.*** Jednocześnie przyjęto założenie wstępnie zgodnie z którym w celu uzyskania satysfakcjonującego poziomu innowacyjności przekształtnika było wykorzystanie elementów mocy z węgla krzemu o klasie napięciowej 3300 V w niskiindukcyjnej obudowie oraz przeniesienie jak największej możliwej ilości zalet z poziomu struktury półprzewodnikowej na poziom aplikacji.

Doktorant nie sformułował tezy rozprawy, ale podany powyżej cel pracy jasno definiuje zakres niezbędnych do przeprowadzenia badań. W kolejnych rozdziałach rozprawy Doktorant przedstawił niezbędne rozważania teoretyczne i efekty swoich badań, które pozwoliły na zrealizowanie celu pracy przy zastosowaniu właściwych metod badawczych.

Rozdział pierwszy został zakończony przedstawieniem zakresu i metodologii badań.

W rozdziale drugim przedstawiono wyniki symulacji komputerowych wykonanych na potrzeby procesu projektowania przekształtnika. Wykorzystując zalety dwóch programów symulacyjnych: SABER i PLECS, precyzyjnie dobrano parametry pracy przekształtnika. W tym celu przygotowano w programie SABER model symulacyjny rozważanego w pracy modułu SiC MOSFET i określono parametry pracy układu oraz pozyskano dane wejściowe do projektowania komponentów bloku mocy. Następnie wykorzystując obliczenia w programie PLECS, określono parametry napięciowe i prądowe wszystkich komponentów przekształtnika, parametrów układu sterowania oraz trybów pracy w przykładowej aplikacji. Finalnie, ponownie wykorzystując program SABER oraz uprzednio przygotowany model modułu SiC MOSFET, obliczono maksymalne straty mocy w elementach półprzewodnikowych dla topologii dwugałęziowego przekształtnika DC/DC.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił proces projektowania przekształtnika DC/DC z średnionapięciowymi elementami z węgla krzemu. Zaprezentowano problematykę wpływu indukcyjności pasożytniczych na parametry użytkowe przekształtnika oraz projektowanie niskoindukcyjnych połączeń obwodu mocy przy wykorzystaniu pakietu symulacyjnego Ansys. Poruszono też tak istotne zagadnienia procesu projektowania przekształtników DC/DC jak: projektowanie układu sterownika bramkowego przy uwzględnieniu norm przemysłowych, układu chłodzenia cieczowego oraz dobór kondensatorów w obwodzie stałego napięcia.

Sterowanie łącznikami dwugałęziowego przekształtnika DC/DC średniego napięcia przedstawiono w rozdziale czwartym. W celu możliwie wysokiego wykorzystania potencjału modułów SiC MOSFET niezbędne jest wykorzystanie regulatorów o wysokiej wartości pochodnej czasowej napięcia bramka-źródło. Doktorant przedstawił zagadnienie sterowania wielogałęziowymi przekształtnikami DC/DC zawierającymi takie moduły, wskazał na wyzwania projektowe związane z symetryzacją prądów gałęzi przekształtnika oraz schemat regulacji dwugałęziowego, dwukierunkowego przekształtnika DC/DC średniego napięcia z elementami SiC.

Rozdział piąty skupiony jest wokół badań eksperymentalnych przekształtnika zarówno w trybie obniżającym jaki podwyższającym. Wykonane badania potwierdzają możliwość pracy układu z częstotliwościami przełączania sięgającymi 25 kHz. Przeprowadzone dla trybu obniżania napięcia dla dwóch wartości indukcyjności dławików dowiodła, że przy pracy w okolicach trybu BCM pozwala na uzyskanie niższych strat łączeniowych w module niż w

przypadku pracy w trybie CCM, jednak wartość sprawności przekształtnika jest wtedy niższa, prawdopodobnie z powodu strat w dławikach.

Przeprowadzone w trybie podwyższającym badania eksperymentalne dowiodły, że wzrost częstotliwości przełączania negatywnie wpływa na uzyskiwaną sprawność, ze względu na proporcjonalny wzrost strat łączeniowych w module. W przypadku trybu podwyższania napięcia układ pracował w trybie DCM oraz z wyższą mocą co nie pozwoliło uzyskać tak wysokiej jak w trybie obniżania sprawności.

Badanie eksperymentalne uwypukliły również inne pożądane cechy przekształtnika takie jak brak hałasu, kompaktowa budowa oraz niska masa.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie pracy, w którym Doktorant wskazał swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie.

Wykaz literatury zawiera łącznie 95 pozycji, w tym 4 prace, których współautorem jest Doktorant. Cytowane są zarówno prace klasyczne, jak i aktualne prace opublikowane w ciągu ostatnich 15 latach. Dobór cytowanych prac świadczy o dobrej orientacji Doktoranta we współczesnej wiedzy z zakresu energoelektroniki.

Pracę zamykają spisy rysunków i tabel oraz oświadczenie przedsiębiorstwa Markel Sp. z o. o. o wdrożeniu przekształtnika DC/DC średniego napięcia zaprojektowanego i przebadanego w trakcie realizacji doktoratu.

3. Uwagi ogólne

Praca jest napisana w języku polskim w sposób zrozumiały, a dobrze zaprojektowany podział doktoratu na rozdziały ułatwia lekturę. W niektórych miejscach pracy widoczne jest dążenie Autora do nadmiernego skracania myśli. Część prezentowanych rysunków nie jest skomentowana w tekście pracy, a niektóre akronimy nie zostały rozwinięte. Praca jest starannie przygotowana pod względem edycyjnym, choć zawiera nieliczne literówki.

Zamieszczone w pracy rysunki są dobrze dobrane i ułatwiają zrozumienie zagadnień poruszanych przez Autora, a także klarownie ilustrują prezentowane w pracy spostrzeżenia i wnioski. Wrażenie robi szeroki zakres prac wykonanych przez Doktoranta i umiejętność dobrego zaplanowania badań, które tworzą spójną całość. Świadczy to o jego wysokich kompetencjach badawczych.

W pracy przedstawiono wyniki badań Doktoranta dotyczące projektowania przekształtnika DC/DC średniego napięcia z wykorzystaniem elementów półprzewodnikowych z węgla krzemu. Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta, przedstawionych w recenzowanej rozprawie, można zaliczyć:

- opracowanie modelu symulacyjnego przekształtnika w programach SABER oraz PLECS z uwzględnieniem efektów pasożytniczych,
- opracowanie układu sterownika bramkowego z funkcją przyspieszonego załączania,
- zaprojektowanie niskoindukcyjnego obwodu mocy przekształtnika zintegrowanego z układem chłodzenia,
- Wykazanie doświadczalnie wysokiej sprawności energetycznej przekształtnika.

Osiągnięcia te dowodzą, że Doktorant opanował umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania przy zastosowaniu nowoczesnych metod naukowych oraz prezentacji uzyskanych wyników badań. Oceniana rozprawa dowodzi, że Doktorant opanował zaawansowaną wiedzę z zakresu energoelektroniki, modelowania i projektowania przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia przy wykorzystaniu modeli skupionych, właściwości półprzewodnikowych elementów mocy wykonanych z węgla krzemu i pomiaru charakterystyk przekształtników oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka uwag:

- a) W rozprawie przedstawiono projektowanie przekształtnika DC/DC średniego napięcia z elementami półprzewodnikowymi wykonanymi z węgla krzemu. Tytuł rozprawy wskazuje, że procedurę projektową można z powodzeniem zastosować do projektowania innych przekształtników energoelektronicznych. Czy doktorant mógłby wskazać jakie są granice takiej generalizacji przedstawionej procedury?
- b) Jak słusznie zauważył Doktorant na stronie 34, straty przy załączaniu tranzystorów SiC MOSFET są w przybliżeniu dwukrotnie wyższe niż straty wyłączania, w przypadku pracy ze stałym włączanym i wyłączanym prądem drenu. Jednak w przypadku zmiany warunków pracy przekształtnika na tryb BCM (boundary conduction mode), prąd wyłączany rośnie względem opisanego wyżej scenariusza około dwukrotnie, a włączany wynosi zero. Tymczasem zależność energii wyłączania od prądu drenu jest silniejsza niż liniowa, a zgodnie z rys. 2.21 energia załączania jest zauważalnie wyższa od zera. W związku z tym można się spodziewać, że zysk w postaci ograniczenia strat w tranzystorze MOSFET dzięki przejściu do trybu pracy BCM będzie ograniczony przez kształt zależności $E_{off}(I_D)$. Czy doktorant mógłby oszacować o ile zmniejszają się straty w tranzystorze

MOSFET przy pracy w trybie BCM, względem pracy przy włączanych i wyłączanych prądach drenu o zbliżonej wartości.

- c) W rozprawie dość lakonicznie potraktowano zagadnienie zastosowanych dławików, w których straty z dużym prawdopodobieństwem zauważalnie obniżały sprawność. Czy doktorant mógłby podać informacje o procedurze projektowej w obszarze dławików i dobranych elementów tego typu do przedstawionego w rozdziale piątym przekształtnika.
- d) W przypadku symulacji przekształtnika w programie SABER opisanych w podrozdziale 2.3, uwzględniono indukcyjności i rezystancje w obwodzie mocy. Czy w symulacjach, których wyniki zostały przedstawione w tym podrozdziale, elementy inne niż półprzewodnikowe zostały zamodelowane jako idealne?
- e) W przypadku formułowania modelu modułu MOSFET oraz projektowania kondensatora w obwodzie mocy Doktorant dość lakonicznie wspomina o współpracy z producentami tych elementów. Czy Doktorant mógłby sprecyzować zakres tej współpracy?
- f) Wyniki symulacji przedstawione na rys. 3.24. istotnie odbiegają od wyniku uzyskanego w obliczeniach opisanych jako (3.14). Czy Doktorant mógłby wskazać przyczyny tych rozbieżności? Czy w przypadku obliczeń (3.11-15) nie jest zasadne uwzględnienie wzajemnych oddziaływań cieplnych pomiędzy strukturami półprzewodnikowymi?

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają pozytywnej oceny pracy.

4. Uwagi szczegółowe

Oceniana praca jest zredagowana starannie, ale doktorant nie ustrzegł się drobnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Najważniejsze z tych usterek podano poniżej.

- a) W pracy występują żargonowe określenia, np. półprzewodniki zamiast elementy półprzewodnikowe, prąd nieciągły zamiast nieciągły przepływ prądu,
- b) Na rys. 2.1. symbole i oznaczenia wyprowadzeń przedstawiono dla modułu IGBT zamiast modułu MOSFET.
- c) Na stronach 37 i 38 doktorant nieprawidłowo rozwinął akronimy CCM, CrCM i DCM.

- d) Rys. 2.18 jest wklejony w zbyt niskiej rozdzielczości, co powoduje, że nie można odczytać wartości i oznaczeń elementów.
- e) Na rys. 3.1 opis osi i legenda są w języku angielskim, co kontrastuje z językiem polskim, w którym napisano rozprawę.
- f) Nie rozumiem, dlaczego na rys. 3.1. Doktorant skupił się na energii E_{on} , podczas gdy jak wynika ze wcześniejszej części rozprawy, celowo projektowano przekształtnik z założeniem pracy w okolicach trybu BCM, aby ten komponent strat łączeniowych miał relatywnie małe znaczenie. W mojej opinii bardziej zasadne byłoby umieszczenie analogicznego rysunku dotyczącego E_{off} .
- g) Na stronie 55 Doktorant pomylił załączanie i wyłączanie stwierdzając, że w trybie CrCM wyłączanie następuje przy zerowej wartości prądu oraz wskazując, że opisany w tabeli 3.1. sterownik wymaga poprawy szybkości wyłączania.
- h) Rys. 3.9. bez komentarza Doktoranta jest niezrozumiały. W szczególności trudne w interpretacji są ścieżki prowadzone najprawdopodobniej w warstwie bottom, nie łączące żadnych widocznych na rysunku elementów.
- i) Występują też drobne uchybienia w zakresie odmiany pojedynczych wyrazów oraz tzw. „literówki”, ale ich liczba jest niewielka.

5. Wniosek końcowy

Oceniana praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w badania i rozwój przekształtników DC/DC z elementami półprzewodnikowymi wykonanymi z węgla krzemu w obszarze średniego napięcia. Badania te obejmowały zarówno symulacje komputerowe, projektowanie i konstrukcję przekształtnika, jak i pomiary oraz analizę uzyskanych wyników. Doktorant samodzielnie rozwiązał ważne zagadnienie badawczo-rozwojowe i wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Przedstawione wyniki badań wraz z oświadczeniem o wdrożeniu dowodzą, że ich cel sformułowany przez Doktoranta został osiągnięty. Sposób przeprowadzenia badań i przedstawienia ich wyników dowodzą dobrego przygotowania Doktoranta do prowadzenia badań naukowych.

Uwagi sformułowane w punkcie 3 mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony.

W mojej opinii praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa. Temat i zakres pracy wpisują się w obszar elektrotechniki, czyli odpowiadają dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i

Technologie Kosmiczne. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Radosława Sobieskiego do publicznej obrony.

