

Gliwice, dn. 09.10.2023r.

Dr hab. inż. Marcin Kasprzak, prof. PŚ.
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
ul.B.Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

WPŁYNEŁO

Recenzja

dn.....2023...-10-...12.....

rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Sobieskiego

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

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (Politechnika Warszawska)

prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego

(pismo z dnia 27.06.2023 roku).

1. Wprowadzenie

Przedmiotem rozprawy jest dwugałęziowy, dwukierunkowy przekształtnik DC/DC średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET, o mocy ok. 260 kW, pracujący z częstotliwością przełączania do ok. 25 kHz. W przekształtniku zastosowano nowoczesne moduły SiC MOSFET firmy Hitachi, w układzie półmostka, klasie napięciowej/prądowej 3300 V/450 A i niskoindukcyjnej obudowie. Ze względu na klasę napięciową modułu SiC MOSFET, przekształtnik przewidziano do współpracy z obwodami niskonapięciowymi do 800 V (np. sieć tramwajowa, metra, mikrośieć przemysłowa) oraz wysokonapięciowymi do 1800 V (np. bateryjny magazyn energii). Przekształtnik taki ma wszechstronne zastosowania np. do stabilizacji parametrów sieci komunikacyjnej, awaryjnego zasilania pojazdów szynowych, wspierania układów szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych lub poprawy parametrów energetycznych mikrośieci DC. Na przedmiot rozprawy składają się również najważniejsze podzespoły przekształtnika, które zaprojektowano, opisano i przebadano: moduł SiC MOSFET i jego model komputerowy, dedykowany kondensator w obwodzie DC, szynoprzewody obwodu DC (tzw. bus-bar), układ chłodzenia oraz dedykowany sterownik bramkowy. Cały przekształtnik w skład którego wchodzi ww. podzespoły a w szczególności najnowszy moduł SiC MOSFET typu MSM450FS33A jest cennie dobranym przedmiotem rozprawy w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Przekształtniki z tranzystorami SiC MOSFET są jednym z obszarów działań naukowo-badawczych prowadzonych od lat w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Warto w tym kontekście podkreślić, że recenzowana praca jest więc kontynuacją tematyki badawczej związanej z SiC MOSFET, ich modelowaniem, sterowaniem bramkowym, konstrukcją przekształtników.

2. Strona formalna rozprawy

Rozprawa została zawarta w 6 rozdziałach, zawiera streszczenie w językach polskim i angielskim, spis rysunków i tabel, nie zawiera wykazu oznaczeń. Rozdział 1 to wprowadzenie w którym określono cele pracy, założenia, podano cele szczegółowe, przedstawiono stan techniki i omówiono zakres pracy i metodologię. Kolejne rozdziały dotyczą modelowania komputerowego przekształtnika, projekt, opis układu sterowania i wyniki badań prototypu.

Szerzej omówiono je w dalszej części recenzji. Rozdział 6 to poprawne podsumowanie. Rozprawa zawiera 130 stron, około 78 rysunków, 11 tabel oraz wykaz literatury scharakteryzowany w dalszej części recenzji.

Praca ma istotne elementy rozprawy naukowej, a mianowicie:

- motywację, którą autor określa jako potrzebę opracowania nowoczesnego przekształtnika do współpracy z obwodami niskonapięciowymi do 800 V (np. sieć tramwajowa, metra, mikrosieć przemysłowa) oraz wysokonapięciowymi do 1800 V (np. bateryjny magazyn energii) np. do stabilizacji parametrów sieci komunikacyjnej, awaryjnego zasilania pojazdów szynowych, wspierania układów szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych lub poprawy parametrów energetycznych mikrosieci DC; motywacją są również plany rozwojowe firmy Markel, w której pracuje i która będzie wdrażała przekształtnik.
- cele badawcze, które przedstawiono w rozdz.1.1,
- zakres i metodologię, które przedstawiono w rozdz.1.3,
- obszerne wyniki własnych badań częściowo nowych, opracowanego w ramach rozprawy przekształtnika DC/DC z tranzystorami SiC MOSFET, o mocy ok. 260 kW, który autor analizował teoretycznie, numerycznie i badał laboratoryjnie, oraz
- wnioski.

Od strony formalnej nasuwają mi się zarówno uwagi krytyczne jak i pozytywne:

- nie ma zwyczajowego wykazu oznaczeń, ale wobec niewielkiej ilości stosowanych zależności/wzorów wystarczające są ich objaśnienia bezpośrednio pod zależnościami,
- w tytułach rozdziałów (2,3,4,5) przekształtnik będący przedmiotem pracy jest za każdym razem inaczej nazywany,
- w treści pracy co najmniej kilkunastokrotnie powtarza się pełna nazwa przekształtnika (w różnych wersjach) – można było zastosować skrót lub pisać „przedmiotowy przekształtnik”,
- w pracy praktycznie brak błędów edytorskich, jedynie w oznaczeniach niektórych wielkości indeksy dolne powinny być pisane czcionką prostą zamiast kursywą,
- niektóre wyniki pomiarów i obliczeń są niepotrzebnie podawane z dokładnością do 2 miejsc po przecinku - nie jest to uzasadnione niepewnością pomiaru/obliczenia (np. tab.2.3, tab.3.5), podobnie wyniki obliczeń sprawności wg. moich szacunków niepewności można podawać co najwyżej z dokładnością do 0,1% pomimo, że analizator wyświetla je do 3 cyfry po przecinku,
- część rysunków w początkowej części pracy, szczególnie te z ekranami z SABER i niektórych z PLECS (rys.2.3 – rys.2.11, 2.16, 2.21) są trudno czytelne, na rys.2.3 brak przepisanych wartości V_{GS} na charakterystykach, z kolei np. oscylogramy (rys.3.4, 5, 10, 11) są bardzo dobrze opisane i czytelne; inne rysunki własne i przebiegi są czytelne, opisy wykonane czcionką odpowiedniej wielkości,
- na podkreślenie zasługuje zwartość rozprawy (ok. 100 stron zasadniczej treści), bez rozwlekłych komentarzy, praktycznie bez błędów edytorskich a te które znalazłem wyszczególniłem w tabeli uwag szczegółowych.

3. Jakie zagadnienie naukowe / badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Zagadnienie naukowe / badawcze rozpatrywane w pracy zostało dobrze sformułowane przez autora. Recenzowana praca doktorska nie ma zwyczajowo sformułowanej tezy. Nie jest to konieczne, ponieważ podano cele badawcze, a na końcu pracy potwierdzono ich realizację.



Przedmiotem rozprawy jest dwugałęziowy, dwukierunkowy przekształtnik DC/DC średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET, o mocy ok. 260 kW, pracujący z częstotliwością przełączania do ok. 25 kHz. W przekształtniku zastosowano nowoczesne moduły SiC MOSFET firmy Hitachi, w układzie półmostka, klasie napięciowej/prądowej 3300 V/450 A i niskoindukcyjnej obudowie. Przekształtnik taki ma wszechstronne zastosowania np. do stabilizacji parametrów sieci komunikacyjnej, awaryjnego zasilania pojazdów szynowych, wspierania układów szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych lub poprawy parametrów energetycznych mikrosieci DC. Na przedmiot rozprawy składają się również najważniejsze podzespoły przekształtnika, które zaprojektowano, opisano i przebadano:

- moduł SiC MOSFET i jego model komputerowy,
- dedykowany kondensator w obwodzie DC, szynoprzewody obwodu DC,
- układ chłodzenia oraz dedykowany sterownik bramkowy.

Cały przekształtnik w skład którego wchodzi ww. podzespoły a w szczególności najnowszy moduł SiC MOSFET typu MSM450FS33A jest celnie dobranym przedmiotem rozprawy w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Celem rozprawy był dobór topologii, zaprojektowanie, budowa oraz badania eksperymentalne dwukierunkowego przekształtnik DC/DC średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET, o mocy ok. 260 kW. Należało w pełni wykorzystać bardzo dobre parametry wyselekcjonowanego tranzystora SiC 3300 V/450 A i zbudować przekształtnik o dobrych parametрах środowiskowych (np. niski poziom zakłóceń) i wysokosprawny energetycznie.

Metodologia badań. Autor trafnie sformułował metodologię badań w rozdz.1.3 rozprawy, którą streściłem w rozdz.6. recenzji.

4. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozdz. 1 - Wprowadzenie

Rozdział jest zwięzły, ma 11 stron i w początkowej części zawiera cel pracy, którym było zaprojektowanie, zbudowanie oraz badania eksperymentalne przekształtnik DC/DC średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET o mocy ok. 260 kW. Założeniem było zastosowanie nowoczesnych tranzystorów SiC MOSFET o klasie napięciowej 3300 V oraz klasie prądowej 450 A i niskoindukcyjnej obudowie. Podano cele szczegółowe, których spełnienie pozwalało na ekonomicznie uzasadnione wdrożenie takiego rozwiązania.

Przedstawiono stan techniki co szerzej skomentowałem w rozdz.5 recenzji. W ostatniej części rozdziału omówiono zakres i metodologię, która uważam za poprawną.

Rozdział ten jest wystarczającym wprowadzeniem do tematyki pracy.

Rozdz. 2. Modelowanie przekształtnika energoelektronicznego średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET

W rozdziale tym doktorant opisał trój etapowe modelowanie przekształtnika:

W pierwszej kolejności wykorzystano oprogramowanie SABER w celu zamodelowania tranzystora SiC tak, aby odzwierciedlić jego parametry statyczne oraz dynamiczne. Jak wynika z opisu, finalny model uzyskano iteracyjnie, wprowadzając dostępne parametry katalogowe i dane pomiarowe. Następnie wielokrotnie weryfikowano symulując komputerowo test dwupulsowy a wyniki „porównywano z przebiegami przedstawionymi w publikacjach producenta (str.36)”. Wg mnie, wyniki symulacji mogły być porównane z rzeczywistym wynikiem testu dwupulsowego, które doktorant w dalszej części pracy realizował testując sterownik bramkowy.

W drugiej kolejności modelowano przekształtnik wykorzystując oprogramowanie PLECS w celu wyznaczenia parametrów napięciowych i prądowych przekształtnika oraz parametrów sterowania.

W trzeciej kolejności symulowano już kompletny przekształtnik w oprogramowaniu SABER z wykorzystaniem zweryfikowanego modelu tranzystora SiC.

Kolejność postępowania jest poprawna, uzasadniona złożonością modelu tranzystora SiC i skróceniem czasu potrzebnego na symulację. Do części tej nasuwa się kilka uwag, które zamieściłem w części „uwagi dyskusyjne”.

Rozdz. 3. Projekt przekształtnika prądu stałego o mocy 260 kW ze średnionapięciowymi elementami węgla krzemu

W rozdziale opisano najważniejsze podukłady przekształtnika i rozważano ich wpływ na właściwości przekształtnika.

Na początku omówiono wpływ indukcyjności pasożytniczych na właściwości przekształtnika, takie jak poziom zakłóceń elektromagnetycznych, zwiększone straty mocy w przypadku konieczności spowalniania przełączania tranzystorów czy ograniczenie częstotliwości przełączania ze względu na dopuszczalne straty mocy. Są to uzależnienia znane ale autor wyjaśnił je w sposób czytelny. Nie podał natomiast ile wynosi minimalna wartość indukcyjności pasożytniczych „zapewniająca spełnienie wymagań normatywnych” (str.50).

W części dotyczącej sterownika bramkowego skupiono się na rozwiązaniu z przyspieszonym załączaniem tranzystora. Przeprowadzono testy dwupulsowe sterownika podstawowego i zmodyfikowanego uzyskując dwukrotne zmniejszenie wartości energii załączania (z 288 mJ do 140 mJ). Opis sterownika jest zwięzły ale nie padano chociażby jaki sterownik scalony wykorzystano (jeśli wykorzystano). W części tej kilka razy mylono wyłączanie i załączanie, np. w akapicie pod tabelą 3.1.

W części dotyczącej szynoprzewodu (rozdz.3.3) wyznaczono jego parametry R i L wykorzystując gotowe zależności. Stosowano przy tym oznaczenia jak $L+$, $L-$, LC , LM , które trudno jest skorelować z schematem na rys.3.12. Wyniki obliczeń zweryfikowano symulując zaprojektowany szynoprzewód w MES/Ansys uzyskując wartość indukcyjności o ok.30% większą niż obliczona, co jest akceptowalne ze względu na jego złożoną geometrię.

Na uwagę zasługuje projekt dedykowanego kondensatora obwodu DC, którego parametry wyznaczono dla pełnej mocy przekształtnika 260 kW, analizując widmo harmonicznych oraz podając wytyczne do konstrukcji, jak np. sposób przyłączenia do modułu SiC. Założono maksymalną wartość rezystancji szeregową 1,2 m Ω ale nie podano na jakiej podstawie. Dysponując gotowym kondensatorem (100 μ F, 1800 V, niskoprofilowy) metodą rezonansu własnego (75,8 kHz) wyznaczono indukcyjność pasożytniczą zestawu kondensator – szynoprzewód, uzyskując wartość 44 nH co jest wartością korzystnie małą. Można by rozważyć, czy nie wystąpi szkodliwy rezonans harmonicznej 80 kHz w ww. obwodzie, którego częstotliwość rezonansu własnego wynosi 75,8 kHz.

Przeanalizowano układ chłodzenia rozpoczynając od określenia cyklu pracy przekształtnika i symulacyjnym wyznaczeniu wartości strat mocy – wyniki zamieszczono w tabeli 3.5 i dla mocy dla 260 kW są one identyczne jak w tabeli 2.3. Wg mnie, przyjęta do obliczeń wartość mocy strat powinna być już niższa w związku z zastosowaniem zmodyfikowanego sterownika bramkowego. W dalszej kolejności dokonano obliczeń dla dwóch radiatorów chłodzonych powietrzem oraz radiatora cieczowego. Analiza dla radiatora RA200-84 dla mocy strat 2,2 kW w zasadzie mogła zostać pominięta już po prostych obliczeniach. Radiator RA-200-117A mógłby być warunkowo zastosowany ale stwarzałaby ograniczenia konstrukcyjne a wydajny wentylator byłby źródłem hałasu. Słusznie zastosowano radiator cieczowy i dokonano symulacji termicznej w MES/Flow-SolidWorks uzyskując przebieg temperatury radiatora dla cyklu obciążenia. W opisie tego radiatora brakuje pewnych informacji, np. czy/jak dobierano średnicę i długość kanałów miedzianych



i ich układ, przepływ cieczy w l/min. , temperaturę cieczy 25°C (uzyskanie takiej w okresie letnim wymaga chłodnicy aktywnej). Czy model MES to wszystko uwzględnił? W podsumowaniu zamieszczono rysunek 3.30, który obrazuje temperaturę złącza tranzystora w funkcji objętości radiatora – wg mnie jest zbędny, nie potwierdza żadnej reguły typu: mniejsza objętość to niższa temperatura złącza. Przykładowo, gdyby przez radiator RA-200-117A przepuścić ciecz, to jestem przekonany, że uzyskano by najniższą temperaturę złącza.

W końcowej części opisano projekt całego obwodu mocy przekształtnika, na który składają się m.in. dwa uniwersalne bloki (półmostek SiC MOSFET ze sterownikiem bramkowym i kondensator DC umieszczone na wspólnym radiatorze chłodzonym cieczą) stanowiące bazę energoelektroniczną przekształtnika. Opisano i podano schematy układu pośredniczącego wyższego napięcia i niższego napięcia, połączenia z układem sterowania oraz zestawiono tabelarycznie aparaturę łączeniową oraz inne elementy. Na końcu rozdziału zamieszczono model 3D konstrukcji przekształtnika (rys.3.55) ale nie oznaczono symbolami poszczególnych podzespołów.

Pomimo pewnych uwag uważam, że rozdział ten jest poprawnie napisany a zawartość jest cenna pod względem inżynierskim i naukowym oraz odzwierciedla tytuł rozdziału. Do części tej nasuwa się kilka uwag, które zamieściłem w części „uwagi dyskusyjne”.

Rozdz. 4. Sterowanie łącznikami dwugałęziowego przekształtnika DC/DC średniego napięcia

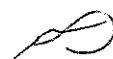
Przekształtnik zaprojektowano jako dwugałęziowy pracujący z przesunięciem fazowym (*ang. interleaved*) co pozwala na zwiększenie mocy poprzez podział prądów obciążenia. Ponadto układ posiada inne zalety, które doktorant wymienił, jak np. zwiększenie niezawodności. Głównym wyzwaniem było opracowanie sterowania, które zapewni wyrównywanie wartości średnich prądów dławików przy 20 kHz i trybie CrCM wobec wielu opóźnień w torach pomiarowych i sterowania, które muszą być odpowiednio kompensowane. Drugim wyzwaniem była możliwość pracy przy dwóch kierunkach przepływu energii poprzez wykorzystanie jednej z dwóch dostępnych gałęzi oraz podniesienie częstotliwości do wartości zapewniającej CrCM. Ostatecznie zaproponowano schemat regulacji przedstawiony na rysunku 4.2. Zagadnieniu symetryzacji prądów gałęzi przekształtnika poświęcono podrozdział 4.2 i zaproponowano 3 metody pomiarów prądu dławików, zilustrowano je rysunkami 4.3-4.5 oraz przeanalizowano możliwości ich realizacji sprzętowej. Ostatecznie zastosowano połączenie dwóch metod: wartość średnia mierzona jest na podstawie analogowego sygnału z filtra natomiast w stanach dynamicznych i do zabezpieczeń wykorzystuje się pomiar wartości szczytowej. Finalny schemat zamieszczono na rys. 4.6. Uważam, że opis układ sterowania jest wystarczający.

Rozdz. 5. Badania prototypowego przekształtnika prądu stałego z tranzystorami SiC MOSFET

W początkowej części rozdziału opisano rozbudowane stanowisko pomiarowe zawierające przedmiotowy przekształtnik z układem sterowania, sterownikiem PLC, magazynem energii, obciążeniem i analizatorem mocy. W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki pomiarów przekształtnika w trybie obniżania napięcia, przy mocy 260 kW, dla dwóch wartości indukcyjności dławików: 60 μ H w trybie CrCM i 120 μ H w trybie CCM. Zobrazowano to oscylogramami, wynikami z analizatora mocy oraz wykresem sprawności w zakresie mocy (50-260) kW. Uzyskano sprawności w zakresie (96,3-98,7)%.

Pomiary w trybie podwyższania napięcia przeprowadzono przy mocy (20-40) kW i częstotliwości w zakresie (18-25) kHz tylko w trybie DCM. Zobrazowano je oscylogramami, a wyniki pomiarów sprawności zamieszczono na wykresie rys.5.14. Uzyskano sprawności w zakresie (94,7-96,8)%. Rozdział zakończono poprawnym podsumowaniem.

Chociaż wyniki przedstawione w tym rozdziale są poprawne, to czytelnik oczekiwał również innych istotnych informacji. Wg mnie brakuje np. przebiegów czasowych



przynajmniej napięcia tranzystora przy podstawie czasu np. 500ns/dz aby potwierdzić skuteczność minimalizacji indukcyjności rozproszenia i oczekiwanych niewielkich oscylacji przy przełączeniach. Do części tej nasuwa się kilka uwag, które zamieściłem w części „uwagi dyskusyjne”.

Rozdz. 6. Podsumowanie

W rozdziale autor przypomniał o zapotrzebowaniu rynkowym na przedmiotowe przekształtniki, podkreślił ich walory użytkowe i parametry środowiskowe jak małe gabaryty i masa oraz inne. Następnie kolejno przypomniał etapy realizacji pracy doktorskiej, w tym zbudowanie przekształtnika i stanowiska badawczego. Autor przetoczył najkorzystniejszy wynik pomiaru sprawności przekształtnika powyżej 98,5%, który osiągany jest tylko w wąskim przedziale mocy, tj. (220-260) kW dla dławików 120 μ H zamiast planowanych 60 μ H. W szerszym zakresie mocy i obu trybach pracy sprawności są wyższe od 95%. Podsumowanie to jest wystarczające, ponieważ dokładniejsze podsumowanie „techniczne” zamieszczono w rozdz.4.

5. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań?

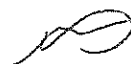
Tak. Praca zawiera wykaz literatury obejmujący 95 pozycji, w tym 13 adresów stron internetowych, ułożonych według kolejności powoływania się w tekście rozprawy. Wykaz literatury jest reprezentatywny dla tematu rozprawy, a recenzentowi nie jest znane opracowanie takie, jakie stanowi rozprawa. Przedstawiono stan techniki, w tym rozwój technologii tranzystorów SiC oraz rozwiązania/wdrożenia przekształtników z SiC o mocach dochodzących do MW. Przytoczono konkretne rozwiązania i nazwy firm, zastosowane typy tranzystorów, uzyskane wskaźniki energetyczne (wzrost sprawności, procentowe zmniejszenie strat mocy), konstrukcyjne (zmniejszenie gabarytów) czy redukcję hałasu dzięki zwiększeniu częstotliwości przełączania. Powołano się na ok.60 pozycji literatury.

6. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Tak. Autor trafnie sformułował metodologię badań (rozd.1.3), która doprowadziła do realizacji postawionego celu rozprawy. Było to kolejno:

- analiza literatury i stanu techniki,
- wytypowanie tranzystora SiC, opracowanie jego modelu symulacyjnego, weryfikacja modelu,
- zaprojektowanie szynoprzewodu i kondensatora obwodu DC, zamodelowanie i zasymulowanie takiego układu, weryfikacja laboratoryjna,
- projekt nowatorskiego sterownika bramkowego z przyspieszonym procesem załączania tranzystora,
- analiza możliwych rozwiązań układu chłodzenia,
- badania laboratoryjne weryfikujące uzyskanie założonych poziomów mocy, sprawności energetyczne, procesy przełączania tranzystora,
- dyskusja wyników.

Autor osiągnął postawione cele postępując zgodnie z zaproponowaną metodologią badań, zweryfikował eksperymentalnie obliczenia i symulacje numeryczne i przedyskutował wyniki.



7. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora?

Do oryginalnych i najważniejszych rezultatów rozprawy zaliczam:

- opracowanie poprawnego komputerowego modelu symulacyjnego tranzystora SiC MOSFET typu MSM450FS33A w programie SABER na bazie ograniczonych danych pomiarowych; należy nadmienić, że producent prawdopodobnie jeszcze nie oferuje takiego modelu dla popularnych symulatorów obwodowych typu np. Spice,
- opracowanie nowatorskiego sterownika bramkowego tranzystora SiC MOSFET z przyspieszonym procesem załączania tranzystora,
- przeprowadzenie testów dwupulsowych z klasycznym i nowym sterownikiem bramkowym i analiza wartości strat przełączania potwierdzająca skuteczność nowego sterownika,
- projekt, zbadanie i implementacja dedykowanego kondensatora DC z wyprowadzeniem w postaci szynoprzewodu dopasowanego do wyprowadzeń SiC MOSFET i łącznej indukcyjności pasożytniczej zaledwie ok. 44 nH.

8. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników?

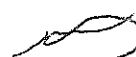
Tak. Stwierdzam, że doktorant działając w sposób metodyczny (analiza stanu techniki, modelowanie, symulacja komputerowa, eksperyment, dyskusja wyników):

- opracował model symulacyjny nowego tranzystora SiC MOSFET 3300 V/450 A,
- zaimplementował ww. tranzystor w przekształtniku DC/DC o mocy 260 kW,
- przebadął najpierw symulacyjnie ww. przekształtnik oraz opisał jakościowo i ilościowo jego wybrane właściwości,
- przeanalizował zagadnienia strat energii w tranzystorach oraz eksperymentalnie wykazał wysoką sprawność energetyczną wynoszącą (96,3-98,7)%,
- przeprowadził badania eksperymentalne przedmiotowego przekształtnika doprowadzając do jego wdrożenia,

a przez to potwierdził zrealizowanie celu pracy.

9. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko-technicznych?

Recenzowana rozprawa doktorska ma istotne znaczenie dla nauk inżyniersko-technicznych. Tematyka rozprawy jest ściśle wbudowana we współczesne badania prowadzone w energoelektronice a zwłaszcza w obszarze zaawansowanych przekształtników DC/DC, np. w sieciach DC niskiego i wysokiego napięcia współpracującymi z bateryjnymi magazynami energii. W ujęciu ogólnym uznaje się, że rozprawa obejmuje przede wszystkim opis znaczących osiągnięć konstrukcyjnych dotyczących nowych przekształtników DC/DC dużej mocy, z najnowocześniejszymi tranzystorami SiC MOSFET, które charakteryzują się sprawnością w od ok. 95% do 98,7% w zakresie mocy (20-260) kW i trybach obniżania i podwyższania napięcia. Rozprawa obejmuje rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowania metodologii i wyników badań ww. wymienionych przekształtników z SiC MOSFET. Układ przeanalizowano zgodnie z metodologią (rozdz. 1.3), którą przytoczyłem w rozdziale 6 recenzji. Ponadto, przedstawione rezultaty i wyniki badań mają bardzo istotne



znaczenie przy realizacjach praktycznych podobnej klasy przekształtników, np. w kontekście zastosowania w układach odnawialnych źródeł energii. W pracy doceniam również to, że do wdrożenia śmiało wybrano stosunkowo dobrze znaną topologię przekształtnika i można się było skupić na zaimplantowaniu w niej nowoczesnego tranzystora SiC MOSFET, dedykowanego kondensatora DC i szynoprzewodu, co finalnie podkreśliło zalety i skuteczność przekształtnika a w efekcie jego wdrożenie.

10. Ważniejsze uwagi dyskusyjne

Uwagi i pytania do doktoranta:

1. Opisany przez doktoranta proces opracowywania modelu SiC MOSFET w programie SABER wydaje się być „trudny” wobec niekompletnych danych producenta. Czytelnik odnosi wrażenie, że model mógł być parametryzowany metodą prób i błędów w celu dopasowania parametrów pomiar vs. symulacja. Czy producent nie dostarcza gotowych modeli dla popularnych programów np. typu Spice? Karta katalogowa modułu MSM450FS33A nie jest dostępna na stronie www Hitachi – proszę krótko wyjaśnić więcej szczegółów odnośnie wykorzystanych danych, co było dostępne a co nie.
2. W rozdziale 2 weryfikowano model tranzystora symulując test dwupulsowy w SABER (rys.2.9-10), a wyniki symulacji porównywano z wynikami podawanymi przez producenta (tab.2.2). Dlaczego wyników symulacji w SABER nie porównano wprost z wynikami pomiarów na stanowisku do badań testu dwupulsowego, którym doktorat dysponował i wykonywał testując dwie wersje sterownika bramkowego (rys.3.4-5, rys.3.10-11)? Jeśli doktorant posiada takie gotowe wyniki to proszę o porównanie.
3. W rozdz.2.3 numerycznie wyznaczono straty mocy w module tranzystorowym a wyniki zamieszczono w tabeli 2.3. Czy doktorant może oszacować jaki był udział strat przewodzenia i przełączania w całkowitej mocy strat?
4. W opisie radiatora chłodzonego cieczą brakuje pewnych informacji, np. czy/jak dobierano średnicę, długość kanałów i ich układ, przepływ cieczy w l/min i jej temperaturę 25°C. Czy model w Flow-SolidWorks to wszystko uwzględnił? Może zastosowano inny prosty model na co wskazywałby brak chłodniejszych cieni nad kanałami wodnymi. Może po prostu doktorant zastosował gotowe i sprawdzone rozwiązanie stosowane w firmie Markel? Proszę natomiast prosto obliczyć wartość zastępczej rezystancji cieplnej radiatora cieczowego przy założonym przepływie 10 l/min, zakładając, że temperatura otoczenia to temperatura wlotowa cieczy (25°C) i porównać z rezystancjami dwóch radiatorów chłodzonych powietrzem.
5. W rozdziale 5 czytelnik oczekiwał przebiegów czasowych przynajmniej napięcia tranzystora przy podstawie czasu np. 500ns/dz aby potwierdzić skuteczność minimalizacji indukcyjności rozproszenia i oczekiwanych niewielkich oscylacji przy przełączeniach. Jeśli doktorant posiada takie gotowe oscylogramy to proszę przedstawić.
6. Proszę wyjaśnić, w czym doktorant upatruje niżą o ok.2% sprawność przekształtnika pracującego w trybie podwyższania napięcia w porównaniu do trybu obniżania napięcia. Na stronie 115/środek doktorant argumentuje: „Jest to głównie spowodowane stałymi stratami urządzenia zaprojektowanego na moc 260 kW odniesionymi do mocy 40 kW”. Jakie straty stałe ma doktorant na myśli, skoro jak rozumiem, pomiar analizatorem mocy obejmował tylko obwody główne i nie obejmował układu sterowania, zasilania sterowników bramkowych i innych układów pomocniczych?



Uwagi szczegółowe (w kolejności występowania w rozprawie):

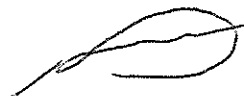
Nr strony	Nr wiersza lub rysunku	Uwagi
7	w.13 od dołu	„dokładny model” - co decyduje, że jest dokładny, jak dokładny?
18	w.6 od góry	Superpozycja powyższych aspektów - ...
30	w.2 od dołu	jest: modulowania – powinno być: modelowania
40	w.4 od dołu	jest: ...w początkowym momencie.. – w początkowej chwili
41	w.1 od góry	jest: ...”wielkości” – powinno być „wartości”
62	w.4 od góry	jest strat „wyłączania” – powinno być „załączania”
71	w.5 od dołu	...dla pierwszych 333 harmonicznnych – na pewno 333?
103	w.9 od dołu	jest:...komputera „przesyłowego” – powinno być „przemysłowego”
105	w.1 od góry	jest: ...stycznika K1. – powinno być K3? jako jedyny na rys.5.1
111	w.9 od dołu	jest: 5.11-7.14 – powinno być 5.11-5.14
117	w.4 od dołu	jest: W momencie końcowym prac...Już podczas prac końcowych nad...
		SABER pisane różną czcionką: SABER, <i>Saber</i> , ...raczej dużymi, jak PLECS, podobnie powinien być pisany ANSYS...

11. Podsumowanie

Pan magister inżynier Radosław Sobieski w rozprawie pt. „Projektowanie przekształtników mocy z elementami z węgla krzemu w obszarze średnich napięć” zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, proponując, analizując teoretycznie i symulacyjnie oraz badając laboratoryjnie przekształtnik napięcia stałego z tranzystorami SiC MOSFET. Wykazał się samodzielnością w prowadzeniu badań naukowych oraz wiedzą teoretyczną i kompetencjami w zakresie tematyki rozprawy, zawierającej się w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Zamieszczone w recenzji uwagi szczegółowe i ogólne nie mają istotnego wpływu na wartość naukową rozprawy. Moja ocena rozprawy doktorskiej jest w pełni pozytywna. Wszystkie cele zostały zrealizowane. Rozprawa jest kompletna i nie wymaga uzupełnień a przekształtnik został wdrożony.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z warunkami określonymi w artykule 187 ust.1 i ust.2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Marcin Kasprzak