

Gdynia, 16 października 2023 r.

prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki

ul. Małyncego Beniowskiego 5 m. 1

81-226 Gdynia

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

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

autorstwa

mgr inż. Radosława Sobieskiego

Niniejsza recenzja została przygotowana na pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 27 czerwca 2023 r, informującego mnie o uchwale RN, powołującą mnie na recenzenta przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

1. UMIEJSCOWIENIE, AKTUALNOŚĆ I CEL ROZPRAWY

Wyniki badań przedstawione w recenzowanej rozprawie są efektem działań doktoranta prowadzonych w ramach programu ministerialnego „Doktorat wdrożeniowy” przy współpracy Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej i firmy Markel Sp. z o. o. W rozprawie rozpatrzono zasadnicze problemy związane z aplikacją nowoczesnych energoelektronicznych przyrządów SiC w przekształtnikach DC/DC dużych mocy i podwyższonych napięć, od których wymaga się przede wszystkim: wysokiej sprawności, dużej gęstości mocy oraz wysokiej jakości przetwarzania energii. Coraz więcej uwagi udziela się również wypełnieniu zaleceń środowiskowych, w tym związanych z ekologią użytych technologii. Waga wszystkich tych problemów rośnie przy tym wraz z potrzebą przyspieszenia transformacji energetycznej, w tym rozwojem energetyki odnawialnej.

Wzrastająca lawinowo liczba różnych aplikacji przekształtników energoelektronicznych w systemach elektroenergetycznych (np. w bateryjnych magazynów energii, ładowarkach EV typu V2G, sieciach DC itp.) sprawia, że tematyka przekształtników dwukierunkowych DC/DC dużej mocy i sn stała się znów bardzo aktualna i jest silnie eksponowana w publikacjach specjalistycznych. Wśród różnych aspektów tej tematyki szczególnego znaczenia w ostatnim okresie nabierają zagadnienia technologiczne, związane z zastosowaniem szerokopasmowych łączników energoelektronicznych oraz wynikającymi stąd problemami konstrukcyjnymi dotyczącymi między innymi: połączeń podzespołów, układów chłodzenia, poprawy EMC. W tym kontekście poszukiwania i weryfikacja eksperymentalna praktycznych rozwiązań przekształtników DC/DC z możliwością szybkiego wdrożenia, cechujących się możliwie małymi gabarytami, granicznie wysoką sprawnością, małym poziomem generowanych zaburzeń przewodzonych i promieniowanych, oraz sprowadzaniem do możliwego minimum oddziaływaniem na środowisko stanowią bardzo istotny kierunek rozwoju energoelektroniki. **Tej aktualnej problematyki dotyczy również recenzowana rozprawa doktorska**, w której autor postawił sobie za cel **zaprojektowanie, budowę oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych przekształtnika prądu stałego średniego napięcia z elementami SiC**. Wybór przyrządów SiC w roli łączników energoelektronicznych spowodował przy tym konieczność szczegółowej analizy parametrów obwodu komutacyjnego oraz minimalizacji indukcyjności pasywnych.

Sformułowany i następnie zrealizowany przez Autora cel rozprawy uważam za bardzo ważny zarówno ze względów poznawczych jak i aplikacyjnych.

2. UKŁAD I ZAKRES ROZPRAWY

Układ rozprawy jest klasyczny i właściwie przedstawiający etapy i cel pracy badawczej prowadzonej w ramach doktoratu. Rozprawa licząca ogółem 132 strony zawiera 6 rozdziałów poprzedzonych podziękowaniami, streszczeniem w języku polskim i angielskim spisem treści oraz wstępem. Po rozdziale 6 - podsumowaniu przedstawiono bogatą i aktualną bibliografię zawierającą 95 pozycji, spis rysunków, spis tabel a także oświadczenie przedsiębiorcy, firmy Marel Sp. z o. o. o wdrożeniu dwukierunkowego przekształtnika DC/DC opracowanego w ramach doktoratu.

We wstępie autor umiejscowił rozważany temat w kontekście aktualnych potrzeb gospodarki, przedstawiając jednocześnie najważniejsze wymagania stawiane nowoczesnym przekształtnikom. Na tej podstawie, w rozdziale 1 – wprowadzeniu sformułowano cel rozprawy oraz zakres planowanego wdrożenia. W rozdziale omówiono również aktualny stan techniki i istniejące rozwiązania przetwornic DC dużej mocy i sn z elementami SiC, zwracając uwagę na ich brak (z jednym wyjątkiem) na rynku polskim. Rozdział kończy omówienie zakresu i przyjętej metodologii badań. W rozdziale 2 omówiono przesłanki i rezultaty modelowania przekształtnika DC/DC sn z wybranym modułem SiC MOSFET za pomocą pakietów symulacyjnych Sabar (w zakresie modelowania samego modułu) oraz PLECS (w zakresie modelowania pełnego układu przekształtnika 2-gałęziowego). Wyniki modelowania posłużyły następnie w rozdziale 3 do opracowania projektu przekształtnika o maksymalnej mocy 260kW. W ramach tego projektu główna uwaga została skupiona na syntezie i badaniach oryginalnego układu sterowania bramkowego przyspieszającego załączanie (§3.2), niskoindukcyjnym połączeniu obwodu mocy ze specjalnie wykonanym kondensatorem DC z bezpośrednim wyprowadzeniem okładek zamiast zacisków (§3.3 i §3.4) oraz cieczowym układzie chłodzenia z wykorzystaniem roztworu glikol/woda 50% /50%. W rozdziale 4 dotyczącym sterowania poza omówieniem ogólnego schematu regulacji skupiono się na problemie symetryzacji prądów gałęzi przekształtnika. Po rozpatrzeniu trzech metod pomiaru prądów: z uśrednianiem na podstawie próbek, wartości szczytowych, uśredniania analogowego na drodze praktycznej realizacji zaproponowano połączenie 2 ostatnich metod co pozwoliło osiągnąć wymaganą dokładność zarówno w statycznych jak i dynamicznych. Z kolei rozdział 5 zawiera wyniki badań eksperymentalnych opracowanego prototypu przekształtnika w reprezentatywnych punktach i trybach pracy, co stanowi zdaniem recenzenta stanowiącym „clou” rozprawy (ze względu na jej wdrożeniowy charakter). Ostatni rozdział 6 obejmuje syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych prac i działań oraz uzyskanych wyników.

Całą rozprawę można podsumować jako ciekawą i wartościową próbę całościowego praktycznego podejścia do problemów projektowania i budowy dwukierunkowych przekształtników DC/DC na bazie najnowszych elementów SiC dużej mocy i sn.

3. OCENA OGÓLNA ROZPRAWY

Rozprawa zawiera bardzo wartościowe wyniki badań przemysłowo-rozwojowych dotyczących opracowania i budowy dwukierunkowego przekształtnika DC/DC dużej mocy i sn, o 2 gałęziach sterowanych w technice „interleaved”. Wyniki obejmują zarówno analizę symulacyjną procesów łączeniowych, stanów przejściowych i ustalonych oraz strat w układzie, jak również projekt i badania prototypu wdrożeniowego. Do jej najważniejszych rezultatów oraz istotnych osiągnięć jej autora zaliczam przy tym:

- Opracowanie adekwatnego modelu symulacyjnego wybranego modułu SiC MOSFET 450A/3300V (na podstawie danych katalogowych uzupełnionych informacjami od producenta) stanowiącego bazę dla oceny procesów łączeniowych, statycznych oraz strat, w tym doboru pasywnych elementów elementów układu przekształtnika DC/DC
- Opracowanie dedykowanego, oryginalnego rozwiązania sterownika bramkowego z funkcją przyspieszania załączania tranzystora SiC, zmniejszającego czas załączania oraz energię strat przy ok. 2-razy;

- Opracowanie założeń konstrukcyjnych dla dedykowanego kondensatora DC łączonego bezpośrednio okładkami z niskiindukcyjnym busbar'em, znacząco redukującego indukcyjności pasożytnicze.
- Projekt kompaktowego układu chłodzenia cieczowego, stanowiącego główny element konstrukcyjny bloku mocy przekształtnika dwugałęziowego z dwoma modułami SIC MOSFET 450A/3300V
- Projekt, budowa i badania eksperymentalne prototypu dwukierunkowego dwugałęziowego przekształtnika DC/DC o mocy maksymalnej 260kW i zakładanym maksymalnym napięciu 1600V/800V, planowanego do zainstalowania w połączeniu magazynu energii sn z siecią tramwajową.
- Wdrożenie opracowanego układu potwierdzone oświadczeniem firmy wdrażającej.

Mimo wysokiej oceny merytorycznej, należy też zaznaczyć, że rozprawa gdzieś jest trochę nieuporządkowana. Niektóre informacje są mało istotne. Niekiedy występują też powtórzenia omawianych problemów. Te drobne zastrzeżenia, łącznie z uwagami krytycznymi przedstawionymi w kolejnym punkcie recenzji, w żaden sposób nie deprecjonują jednak wartości rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Sobieskiego, wnoszącej cenny wkład naukowy w rozwój praktyki współczesnej energoelektroniki.

Podsumowując stwierdzam, że założony cel rozprawy został w pełni zrealizowany. Uzasadnione są również wnioski z badań. Autor wykazał się przy tym dogłębną znajomością problematyki, w szczególności w aspekcie praktycznym. Rozprawa została zredagowana w sposób dojrzały i poprawny oraz zawiera istotne i znaczące wyniki badań a także osiągnięcia aplikacyjne uzyskane właściwymi metodami i narzędziami badawczymi.

4. UWAGI KRYTYCZNE

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. **Radosława Sobieskiego pt. „Projektowanie przekształtników mocy z elementami z węgla krzemu w obszarze średnich napięć”** nasuwają się następujące uwagi krytyczne, ogólne i szczegółowe:

Uwagi ogólne

1. Opracowany przez doktoranta przekształtnik DC/DC może być zastosowany, w szczególności, do połączenia BES z trakcją miejską 600Vdc. Jednakże, że w przypadku hamowania odzyskowego napięcie trakcji wzrasta niekiedy nawet do wartości ok. 1000Vdc. W związku z powyższym wskazanym byłoby przeprowadzenie chociażby symulacyjnej oceny działania przekształtnika podczas skoków napięcia w całym możliwym zakresie.
2. Ze względu aspekt wdrożeniowy, a także ze względu na oczekiwany gwałtowny wzrost elektrośmieci za ok.15 lat, brakuje chociażby szacunkowej oceny niezawodności opracowanego przekształtnika.
3. W rozprawie nie zostało wytłumaczone, dlaczego w badanym przekształtniku dwugałęziowym DC/DC (rys. 1.1) nie zastosowano dławików sprzężonych. Należy też załować, że w rozprawie nie rozważono równoległego połączenia paru przekształtników dwugałęziowych, w celu poszerzenia możliwości aplikacyjnych.
4. Autor rozprawy parokrotnie podkreśla, że zastosowanie kompaktowego układu chłodzenia cieczowego wiąże się z minimalizacją gabarytów przekształtnika. Niejasne jednak, czy doktorant uwzględnił przy tym gabaryty hydraulicznej instalacji chłodzącej, lub ocenił o ile wzrosną gabaryty przekształtnika z uwzględnieniem gabarytów instalacji.
5. Na rys.3.11 prąd drenu i straty wyłączanego tranzystora są ujemne. Proszę o wyjaśnienie tego przypadku.
6. Na stanowisku pomiarowym do obciążenia przekształtnika (rys.5.1) zastosowano rezystor. Zrozumiałe są organizacyjne przyczyny zastosowania takiego rozwiązania, aczkolwiek, zdaniem recenzenta, bardziej miarodajne (z uwagi na potencjalne zastosowania) byłyby badania przy obniżonych napięciach (np. nn 500Vdc i sn 1000Vdc) z wykorzystaniem 2 rozdzielnych łańcuchów bateryjnych.

7. W dysertacji brakuje przesłanek na podstawie których wyznaczono parametry filtrów LC po stronie nn 800V i sn 1500V (rys.2.11). Wskazane byłoby także zamieścić zbiorcze zestawienie parametrów głównych elementów wdrożonego przekształtnika.
8. Na rys. 3.12 pokazano schemat zastępczy szynoprzewodów, który najprawdopodobniej został zapożyczony z literatury. W tym przypadku należałoby wskazać źródło literaturowe. Celowym byłoby także wyjaśnić, dlaczego nie uwzględniono podziału indukcyjności na szynoprzewód dolny i górny. Niejasnym w kontekście wzoru (3.6) jest również stwierdzenie (str.65) , że indukcyjność zewnętrzna zależy od odległości od innych elementów (we wzorze 3.6 nie jest to uwzględniane). Zastrzeżenie budzi także podpis pod rys.3.13, na którym zasadniczo pokazano szynoprzewód oraz jego model 3D. Przytoczoną tam wartość indukcyjności stanowiącej wynik symulacji z powodzeniem można byłoby umieścić w tekście. Nie jestem też przekonany co do nazwania szynoprzewodu połączeniami obwodu komutacyjnego.
9. Rys.1.2 oraz rys.3.31 są identyczne i przedstawiają tylko projekt CAD 3D opracowanego bloku mocy. Projekt 3D przedstawia również rys.3.35. W rozprawie brakuje fotografii rzeczywistej konstrukcji przekształtnika DC/DC lub chociażby pojedynczego bloku mocy wdrożonych w firmie Markel. Tych konstrukcji trudno się także dopatrzeć na fotografii stanowiska badawczego przedstawionej na rys.5.2. W związku z powyższym, proszę o przedstawienie w trakcie obrony rozprawy odpowiednich fotografii wykonanego modelu przekształtnika na bazie opracowanego modułu.
10. Zgodnie z podpisami rys.3.6 i 3.7 wprowadzona modyfikacja driver'a przyspiesza proces wyłączenia, co nie jest zgodne przedstawionymi przebiegami, schematem i opisem. Wprowadzona modyfikacja, co w tekście zaznacza również autor, przyspiesza załączanie i praktycznie nie wpływa na proces wyłączenia. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że rys.3.4 i 3.11 są identyczne (z wyjątkiem przesunięcia osi X na rys.3.11) . Jeśli wprowadzona modyfikacja sterownika przyspiesza wyłączenie, to proszę o wyjaśnienie tego procesu
11. Doktorant, kierując się wartością strat dynamicznych tranzystora, w warunkach mocy szczytowej przyjął tryb pracy przekształtnika na granicy pomiędzy ciągłym (CCM) i nieciągłym (DCM) prądem dławika. Zasadność takiego wyboru wymaga szczegółowego wyjaśnienia, tym bardziej, że (jak wynika z rys.5.4 i rys.5.5, rys.5.7 i rys.5.8, charakterystyk sprawności przedstawionych na rys.5.9 oraz podsumowania badań eksperymentalnych na str.114) przekształtnik pracujący w trybie CCM generuje mniejsze straty. Czy w takim przypadku nie należało pomierzyć sprawności samego modułu SiC ? Czy były podejmowane próby zmniejszenia strat w dławikach w trybie DCM poprzez zmiany konstrukcji ?
12. Charakterystyka wyjściowa przekształtnika $U=f(I)$ pracującego w trybie DCM ma charakter nieliniowy. Z materiału rozdz.4 dotyczącego sterowania nie wynika czy nieliniowa część charakterystyki wyjściowej została w jakiś sposób uwzględniona w układzie regulacji, np. w przypadku końcowego ładowania zasobnika bateryjnego (Li-ion) i przejściu z trybu CC do CV .
13. Nie jest całkowicie jasne dlaczego jako czynnik chłodzący zastosowano mieszaninę wody i glikolu w proporcji 50%/50% (temperatura zamarzania ok -35°C), chociaż przekształtnik przewidziany jest przede wszystkim do instalacji w kontenerach z zasobnikami bateryjnymi
14. Rozprawa sprawia wrażenie napisanej nieco pośpiesznie, co, zdaniem recenzenta przejawia się np. w ograniczeniu do minimum przedstawionych wyników badań eksperymentalnych i ich interpretacji. W szczególności przedstawione wyniki badań eksperymentalnych pomijają zagadnienia termiczne, choć układowi chłodzenia poświęcony jest cały podrozdział 3.5

Uwagi szczegółowe (wybrane)

1. Ponieważ rys.3.1 jest kopią, uważam, że poza wskazaniem pozycji literatury z której został zaczerpnięty należało również uzyskać zgodę właściciela praw autorskich.

2. W tekście rozprawy (w tym również w literaturze) nie ukazano nr zgłoszenia patentowego lub patentu dotyczącego sterownika przyspieszającego załączenie tranzystora SiC MOSFET o którym pisze autor na str 117.
3. Użycie nazw „układ pośredniczący...” do obwodów wejściowego i wyjściowego przekształtnika (§3.6) nie wydaje się najwłaściwsze.
4. Na str 103 omyłkowo zaznaczono, że projekt przekształtnika opisano w rozdziale 4 (projekt ten przedstawiono w rozdziale 3) .
5. W tablicy 3.2 wydzielono symbole B1, B2, B4, A6, A7. Nie jest jasne skąd wzięto się oznaczenie tych symboli
6. Podłączenia filtra EMI w obwodzie wejściowym przedstawione rys.3.33 wymagałoby szerszego komentarza
7. Wartości/skala przebiegów prądów i napięć na oscylogramach w rozdziale 5 jest prawie nieczytelna (bardzo mała i niewyraźna czcionka), co utrudnia ich szczegółową analizę
8. Rozprawa zawiera szereg drobnych błędów edytorskich, np.: str.61 – „... badania w trybie dwupusowym”; str 57 (rys.3.6) – „...przyspieszania procesu wyłączenia...”
9. W rozprawie zauważono również inne drobne potknięcia natury edycyjnej, stylistycznej i językowej, na tyle jednak nieistotne i niewpływające na zrozumienie i ocenę pracy, że ich wyszczególnienie jest zbędne.

WNIOSEK KOŃCOWY

- Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem merytorycznym oraz odpowiednimi umiejętnościami analitycznymi i eksperymentalnymi do pracy badawczo-wdrożeniowej .
- Rozprawa charakteryzuje się właściwym poziomem przedmiotowym i należyтым poziomem edytorskim.
- Uzyskane i zweryfikowane eksperymentalnie wyniki rozprawy mają dużą wartość praktyczną i konstrukcyjną, oraz stanowią podstawę do zastosowania dwugałęziowego przekształtnika DC/DC wdrożonego w firmie Markel Sp. z o. o. w różnych aplikacjach przemysłowych, w tym w szczególności do aplikacji z baterijnymi zasobnikami energii
- Uwagi krytyczne wyszczególnione w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku i pozytywnej oceny recenzowanej wdrożeniowej rozprawy doktorskiej.

Uważam, że rozprawa doktorska magistra inżyniera mgr inż. Radosława Sobieskiego pt. „Projektowanie przekształtników mocy z elementami z węgla krzemu w obszarze średnich napięć ” spełnia warunki określone w artykule 187 ust.1 i ust.2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 poz. 1668 ze zmianami, w związku z czym wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

