Prof. dr hab. inż. Marek Hartman
profesor zwyczajny AM na WE
Akademia Morska w Gdyni

Gdańsk, 27.02.2017

WPŁYNĘŁO
dnia 1.03.17
podpis

Ocena rozprawy doktorskiej

mgr inż. Miłosza Szarek

pt ***„Wielopoziomowy falownik napięcia z poziomowaniem diodowym (NPC) zasilany z wyodrębnionych alternatywnych źródeł energii, pracujących przy różnych wartościach mocy maksymalnej (MPP)".***

Niniejszą recenzję napisałem na wniosek Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii biomedycznej AGH z dnia 26.01.2017. Pismo (L. Dz. WEAIiIB-b/510-2.2/15) Dziekana Wydziału Pana prof. Ryszarda Sroki z dnia 27.01.2017 roku.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Szarka przedstawiona jest na 221 stronach. Zawiera ona 8 rozdziałów zasadniczych (strony 7 – 174), dwa załączniki jakimi są: Dodatek A. Układy trójfazowe (strony 175 – 183), Dodatek B. Schematy elektroniczne. Ponadto w rozprawie znajdują się: Projekty obwodów drukowanych (PCB) (strony 187 – 193), Spis rysunków (strony 195 – 204) oraz Spis tabel (strony 205 - 206). Bibliografia (strony 207 – 221) zawiera 159 pozycji literatury i kart katalogowych. Wśród nich jest 7 (siedem) współautorskich publikacji Doktoranta, 4 zamieszczono w Przeglądzie Elektrotechnicznym zaś pozostałe są materiałami konferencyjnymi w tym jedna zagraniczna EPE-PEMC 2010

Oceniana rozprawa zawiera jasno określone cele badawcze i tak, w streszczeniu „ Abstract " Doktorant pisze „.....***the main objective*** *of this thesis is the input voltage balancing method development dedicated to the three-level voltage source NPC inverter topology."* oraz ".....***The final goal of this thesis*** *was the design and construction of power electronic prototype converter dedicated for photovoltaic applications."*
W Rozdziale 1 (strona 11, Tematyka oraz cel pracy) Doktorant obszernie opisuje następujące cele swoich badań:

- " *Głównym celem badawczym jest analiza potencjalnych przyczyn oraz skutków niezbalansowania napięć dzielnika kondensatorowego (udc1, udc2) oraz opracowanie algorytmu ich równoważenia, bazującego na7-segmentowej wektorowej metodzie modulacji szerokości impulsów. Zadaniem opracowanej*

metody ma być zapewnienie poprawnego działania trójfazowego falownika napięcia (doprowadzenie do równowagi napięciowej oraz generacja prądu sinusoidalnego), w sytuacji permanentnie występującej nierównowagi mocy źródeł (ΔPdc = Pdc1−Pdc2), zasilających każdą z sekcji obwodu stałonapięciowego (Cdc1, Cdc2) " (strona 15).

- " *Równie ważnym celem, jest wyznaczenie maksymalnego oraz dopuszczalnego poziomu ΔPdc max, który może zostać skompensowany przez odpowiednie sterowanie pracą falownika typu NPC* " (strona 15).
- " *Dodatkowym celem realizowanym w ramach pracy doktorskiej, jest projekt oraz konstrukcja energoelektronicznego systemu przekształcania energii elektrycznej, umożliwiającego przeprowadzenie badań laboratoryjnych, w celu praktycznej weryfikacji opracowanych zagadnień* " (strona 16).

Treść rozprawy doktorskiej zawarta została w ośmiu (8) głównych rozdziałach i tak:

Rozdział 1 to opis tematyki rozprawy doktorskiej oraz celów badawczych jakie zamierzał osiągnąć Doktorant.

Rozdział 2 to opis charakterystyk stosowanych modułów fotowoltaicznych oraz propozycja ich modeli matematycznego dla celów przeprowadzenia badań symulacyjnych. W rozdziale tym Doktorant opisuje idę algorytmu poszukiwania punktu mocy maksymalnej bazujący na znaku konduktancji inkrementalnej (IC-MPPT) i zastosowanie go w sterowaniu wybraną topologią przekształtników prądu stałego (DC-DC), podwyższających napięcie wyjściowe.

Rozdział 3 zawiera opisy topologii trójpoziomowego, trójfazowego falownika napięcia typu NPC oraz wyniki wyznaczenie wszystkich możliwych do wygenerowania napięć wyjściowych reprezentowanych w formie dyskretnych wektorów napięciowych.
W *Rozdziale 4* zawarto opis cech charakterystycznych wybranych metod modulacji szerokości impulsów stosowanych w falownikach wielopoziomowych. W Rozdziale tym Doktorant opisał algorytm modulacji wektorowej oraz wpływ realizowanych wektorów napięcia trójfazowego na wartość napięć dzielnika kondensatorowego. Rozdział ten zawiera również szczegółowy opis implementacji algorytmu SVM wraz z analizą symulacyjną sposobu jego działania.

Treść w *Rozdziale 5* dotyczy głównych przyczyn oraz skutków niezrównoważenia napięć dzielnika pojemnościowego oraz zawiera opis opracowanej metody ich balansowania za pomocą redundantnych wektorów napięcia. Doktorant opisał implementację algorytmu SVM z dodatkową modulacją wektorów alternatywnych (tożsamościowych), jak również przedstawia analizę efektywności jego działania w sposób analityczny oraz za pomocą badań symulacyjnych.

Rozdział 6 zawiera opis współpracy wielopoziomowego falownika napięcia typu NPC

z trójfazową linią zasilającą oraz własności zastosowanego algorytmu pętli synchronizacji fazowej (SRF–PLL). Zastosowanie przez Doktoranta zmiennej struktury układu sterowania przekształtnikami DC-DC podwyższającymi napięcie pozwoliło przeprowadzić badania symulacyjne całego systemu fotowoltaicznego.

Rozdział 7 dotyczy projektów poszczególnych komponentów zrealizowanego systemu energoelektronicznego przekształcania energii elektrycznej, pozyskiwanej z modułów fotowoltaicznych. W rozdziale tym Doktorant zaprezentował i przeanalizował wyniki otrzymane w trakcie przeprowadzonych eksperymentów I badań laboratoryjnych.

Rozdział 8 jest podsumowaniem przeprowadzonych badań na eksperymentalnym obiekcie rzeczywistym.

2. Ocena tematu, obszaru i sposobu prowadzonych badań.

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy fundamentalnych zagadnień związanych z praktycznym wykorzystaniem układów energoelektronicznych oraz fotowoltaiki do realizacji elektrowni solarnych. Przedstawiając w Rozdziale 1 bardzo szczegółowy opis współczesnych problemów i ograniczeń w wytwarzaniu energii elektrycznej Doktorant bardzo merytorycznie opisuje wybrany obszar tematyczny swoich dociekań naukowych i badań eksperymentalnych. Motywując bardzo przekonywująco, na podstawie cytowanej literatury, Doktorant proponuje temat swoje rozprawy jako układ w którym przekształtnik energoelektroniczny w postaci falownika zasilany będzie z linii napięcia stałego, do której równolegle dołączane są kolejne łańcuchy szeregowo łączonych modułów fotowoltaicznych za pośrednictwem przekształtników prądu stałego (DC/DC), podwyższających napięcie. Takie podejście charakteryzuje się wysoką modułowością i umożliwia sprzęganie ze sobą kaskad modułów o różnej długości i parametrach. Jest to niezwykle istotna cecha w przypadku np. rozbudowy instalacji, czy modernizacji istniejącej części przy użyciu paneli różniących się mocą szczytową (PMPP) lub napięciem pracy (UMPP). Ponadto, każdy przekształtnik DC/DC może realizować indywidualną funkcję poszukiwania punktu pracy o mocy maksymalnej (MPPT) pojedynczego łańcucha PV, co skutkuje maksymalizacją uzysku energetycznego [63]. Pomimo konieczności instalacji dodatkowego systemu sterowania i monitoringu pracy przekształtników DC/DC a tym samym podwyższenia kosztów takiego rozbudowanego układu, opisana konfiguracja jest obecnie najczęściej stosowanym standardem w elektrowniach fotowoltaicznych.

Wybór tematu badawczego jest moim zdaniem bardzo trafnym, współczesnym wyzwaniem wynikającym z poszukiwaniu efektywnych poza kopalnianych źródeł wytwarzania energii elektrycznej. Stwierdzam ważność podjętej tematyki badawczej i jej bardzo wysoką rangę szczególnie w obszarach poznawczym i aplikacyjnym. Moim zdaniem istnieje realna możliwość zastosowania otrzymanych wyników badań do zaprojektowania i podjęcia produkcji przemysłowej zespołu elektrowni solarnej.

Do realizacji oraz weryfikacji celów badawczych przedstawionych w Rozdziale 1 rozprawy Doktorant zastosował wszystkie najnowsze metody badań w tym analizę matematyczna, badania symulacyjne z wykorzystaniem technik komputerowych, testowanie algorytmów sterowania w oparciu o modele czasu rzeczywistego zaimplementowane do układów FPGA oraz badanie układów laboratoryjnego. Porównanie wyników analiz teoretycznych z wynikami badań laboratoryjnego stanowi podstawę

potwierdzenia słuszności stawianych hipotez badawczych czy otrzymanych wyników badań symulacyjnych.

3. Główne osiągnięcia Doktoranta

O ile bardzo ciekawe i precyzyjnie opisane zagadnienia w Rozdziałach 2 oraz 3 nie zawierają istotnej nowości naukowej to Rozdziały 4 (od.4.2), 5, 6 oraz 7 dysertacji zawierają oryginalne wyniki badań i są niekwestionowanymi osiągnięciami Doktoranta. Do szczególnych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

a) Analizę możliwych sekwencji przełączeń (3, 5, 7-segmentowych) wyznaczonych wektorów dyskretnych, w celu odwzorowania referencyjnego wektora napięcia trójfazowego, zgodnie z przyjętymi w Rozdziale 4.2.4 zasadami projektowania efektywnej sekwencji przełączeń.

b) Implementację algorytmu 7-segmentowej modulacji wektorowej oraz przeprowadzenie analizy symulacyjnej jego działania (Rozdział 4.3.2).

c) Wyznaczenie zmienności amplitud wybranych harmonicznych, występujących w napięciu fazowym i międzyfazowym falownika w zależności od aktualnej wartości amplitudowego indeksu modulacji, jak również zmienności przebiegów napięć fazowych.

d) Określenie potencjalnych przyczyn oraz skutków niezrównoważenia napięć zasilających falownik typu NPC.

e) Opis analityczny dyskretnych wektorów napięć falownika w zależności od stopnia niezbalansowania napięć stałych dzielnika kondensatorowego oraz przedstawienie zmienności rozkładu składowych na płaszczyźnie heksagonalnej w zależności od stopnia niezrównoważenia.

f) Przeprowadzenie badań symulacyjnych obrazujących powstałe odkształcenia przebiegów napięć oraz prądów generowanych przez falownik.

g) Zastosowanie metody równoważenia napięć (z wykorzystaniem zmodyfikowanego algorytmu 7-segmentowego modulatora wektorowego), wraz z dodatkową modulację czasów trwania krótkich wektorów redundantnych, występujących w danej sekwencji przełączeń.

h) Określenie wpływu stopnia modulacji na rozkład wektorów napięciowych oraz wartość chwilową i średnią prądu węzła środkowego dzielnika pojemnościowego.

i) Zaimplementowanie w programie Matlab algorytmu SVM i przeprowadzenie analizy numerycznej czasów trwania zdefiniowanych grup wektorów napięcia w funkcji amplitudowego indeksu modulacji.

j) Określenie maksymalnego poziomu niezbalansowania mocy źródeł np. fotowoltaicznych, zasilających falownik znajdujący się w danym punkcie pracy, który umożliwi jeszcze poprawne i bezpieczne działanie systemu przekształcania energii elektrycznej.

k) Zastosowanie układu sterowania (bazującego na zmodyfikowanym modulatorze SVM z niezależną kontrolę napięć dzielnika pojemnościowego) umożliwiającego stabilizację przez falownik całkowitego napięcia zasilania na referencyjnym poziomie oraz generację zadanej wartości mocy czynnej.

l) Przeprowadzenie badań symulacyjnych całego zamodelowanego systemu fotowoltaicznego.

ł) Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska laboratoryjne w postaci energoelektronicznego systemu przekształcania energii elektrycznej. Stanowisko to składało się on z dwóch przekształtników DC-DC podwyższających napięcie i zasilających osobne części dzielnika kondensatorowego, podłączonego do trójfazowego falownika napięcia typu NPC.

m) Zaimplementowanie algorytmów sterowania przekształtnikami do układów logiki programowalnej FPGA za pomocą języka opisu sprzętu VHDL.

n) Praktyczną weryfikację opracowanych algorytmów sterowania zamodelowanego systemu fotowoltaicznego.

4. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawioną do oceny rozprawę Pana mgr inż. Miłosza Szarka oceniam bardzo wysoko. Dysertację cechuje ogrom zagadnień badawczych znacznie przekraczający przyjęty zwyczajowo obszar badań w rozprawie doktorskiej. Stwierdzam, że Doktorant znacznie przekroczył wymagania Art. 13. 1. Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym ..." *Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego....".*

Moim zdaniem rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Szarka wnosi znaczący wkład do teorii i projektowania trójfazowych przekształtników energoelektronicznych zasilanych napięciem stałym (np. z ogniw fotowoltaicznych) a współpracujących z siecią trójfazową.

Wymienione w p. 5 moje drobne uwagi krytyczne nie rzutują na moją ocenę merytoryczną recenzowanej rozprawy doktorskiej. Są jedynie sugestiami poprawiającymi w przyszłości jakość raportów badawczych Doktoranta.

Oceniana rozprawa doktorska wykazała w stopniu bardzo wysokim profesjonalną wiedzę techniczną i umiejętności Doktoranta. Doktorant potwierdziła umiejętność sformułowania zagadnienia naukowego oraz umiejętność samodzielnego rozwiązanie tego zagadnienia współczesnymi metodami naukowymi.

Ponadto należy odnotować, że Doktorant dotychczas publikował 6 (sześć) publikacji w czasopiśmie recenzowanym (Przegląd Elektrotechniczny) oraz 4 (cztery) publikacje i referaty na konferencjach krajowych i międzynarodowych. We wszystkich wymienionych publikacjach Doktorant był współautorem danej pracy.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Oceniana rozprawa doktorska oprócz walorów poznawczych będących osobisty osiągnięciem Doktoranta nasuwa pewne drugorzędne uwagi krytyczne będące subiektywnym odczuciem recenzenta które należy traktować jako głos w publicznej dyskusji. I tak:

a) Mam odmienne zdanie niż Doktorant na temat liczby wektorów zerowych. Moim zdaniem jest jeden (1) wektor zerowy (a nie „trzy" jak obliczył Doktorant) powstający za pomocą trzech kombinacji łączników analizowanego falownika. Ten bezsporny fakt potwierdził mimowolnie Doktorant w Tabeli 3.2 (str. 46) gdzie dla kombinacji n = 1, 2, 3 jest jeden (1) wektor zerowy u(alfa-beta). W ten sposób w kształtowaniu napięć biegunowych falownika NPC dysponuje się zbiorem składającym się z 27 położeń wektora napięcia w tym 18 niepowtarzalnych położeń aktywnych wektora, 1 wektora zerowego oraz z 8 położeń tożsamościowych (redundantnych/tożsamościowych).

b) W Rozdziale 7.5 zawarte są wyniki pomiarów dokonanych w eksperymentalnym układzie przekształcania energii elektrycznej. Ilustracją tych wyników są oscylogramy przedstawione na Rys. 7.13, 7.14 oraz 7.16. Recenzent nie odnalazł informacji jaki oscyloskop cyfrowy został użyty do pomiarów, czy był on kalibrowany przed pomiarami lub czy posiada on świadectwo kalibracji.

Podobną uwagę wnoszę do Rys. 7.15 który ilustruje widmo harmonicznych prądu fazowego. W tekście rozprawy nie ma informacji jaka FFT została użyta w oscyloskopie i czy jest ona zgodna z obowiązującą normą określającą warunki pomiarów harmonicznych danego przebiegu okresowego.

6. Oceny strony redakcyjnej pracy

Strona redakcyjna i edytorska recenzowanej rozprawy zyskała jednoznacznie moją pozytywną ocenę. Zamieszczone kolorowe rysunki są bardzo dobrej jakości. Wnioskowanie jest logiczne, poparte rzeczywistymi wynikami a nie wynikami oczekiwanymi. Styl i edycja rozprawy jest wręcz wzorowa, godna naśladowania chociaż wnoszę następujące uwagi krytyczne:

a) Brak należytej staranności cytowań źródeł informacji oraz auto cytowań wcześniejszych prac w których Doktorant był autorem lub współautorem. Przykład braku cytowania innych autorów jest np. równanie (2.1) w Rozdziale 2 gdzie brak cytowania sugeruje, że to Doktorant obliczył wartość bezpośredniego promieniowania słonecznego, które dociera do górnych warstw ziemskiej atmosfery Gsn (2.1).

Przykład braku staranności auto cytowania znajduje się na stronie 132 gdzie Doktorant pisze „...*szczegółowy opis oraz wyniki testów zawarte zostały w autorskiej publikacji* [133] „ Doktorant był jednym z współautorów publikacji [133] stąd, moim zdaniem, publikacja ta nie może być uznana za autorską pracę Doktoranta.

b) Doktorant bardzo często używa słów „ *omówiono, omówienie* itd." zamiast „opisano, opis itd.". Dysertację czytam jako opis pracy twórczej a nie słucham Doktoranta co zrobił.

c) Na stronie 45 jest „ ...zrealizowano poprzez podłączenie wyjścia każdej *nogi* fazowej do tego samego węzła wyjściowego dzielnika napięciowego.„ Recenzentowi wydaje się, że faza nie ma „nogi" i proponuje użyć zwrotu „ gałęzi falownika".
d) Na stronie 75 jest „ *Jak widać*, podczas pełnego obrotu wektora wzorcowego....". Moim zdaniem „nic nie widać". Rysunek ilustruje sytuację z której wynika, że.....

7. Wniosek końcowy

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Szarek *pt „ Wielopoziomowy falownik napięcia z poziomowaniem diodowym (NPC) zasilany z wyodrębnionych alternatywnych źródeł energii, pracujących przy różnych wartościach mocy maksymalnej (MPP)* spełnia z nadmiarem wymagania art. 13. Ustawy z 14 marca 2003, Dz. U nr 65, poz.595 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z 15 października 2014 r., poz.1383) w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim i habilitacyjnym.
Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Biorąc pod uwagę obszerny zakres badań naukowych, niemal wzorową prezentację otrzymanych wyników badań oraz dotychczasowe publikacje Doktoranta wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Marek Hartman