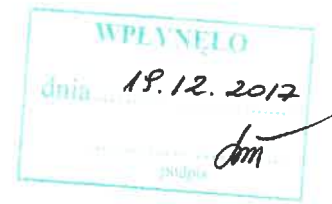


Warszawa, 01.12.2017

Dr hab. inż. Mariusz Malinowski, prof. PW
Politechnika Warszawska/ Wydział Elektryczny
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ,
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Tytuł rozprawy: Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY

Autor rozprawy: mgr inż. Krzysztof Kóska

1. Wstęp

Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr inż. Krzysztofa Kóskę poświęcona jest przekształtnikowi modułowemu MMC (ang. Modular Multilevel Converter), który może być wykorzystany w wysokonapięciowej elektroenergetyce prądu stałego HVDC, jako nieizolowany obniżająco-podwyższający przekształtnik DC/DC. Tematyka związana jest dynamicznym rozwojem modułowych układów energoelektronicznych stosowanych, przez duże koncerny tj. Siemens, ABB, Alstom/GE i CEPRI, w wielu zastosowaniach związanych z wytwarzaniem (OZE) i przesyłem energii (HVDC) oraz łączeniem podsystemów elektroenergetycznych o różnych poziomach napięć, czy innej częstotliwości lub fazie. Intensywny rozwój tego typu przekształtników rozpoczął się kilkanaście lat temu od publikacji Prof. R. Marquardt'a, a ich komercjalizacja stała się realna w chwili, gdy przekształtniki budowane na potrzeby energetyki typu FCC-VSC (Forced Commutated Converters – Voltage Source Converter), między innymi za sprawą topologii MMC, zaczęły osiągać sprawność porównywalną do technologii od wielu lat dostępnych na rynku tj. LCC-CSC (Line Commutated Converters – Current Source Converter) czy CCC-CSC (Capacitor Commutated Converters – Current Source Converter). Pomimo wielu ugruntowanych już rozwiązań dotyczących topologii modułów i sterowania w układach przekształtnikowych MMC, głównie stosowanych

jako przekształtniki AC/DC/AC, w ostatnich latach poszukuje się intensywnie rozwiązań dla wysokonapięciowego przetwarzania DC/DC, co pozwoli na dopasowywanie poziomu napięć w układach *multiterminal* DC. Pozwoli to zmniejszyć ilość stopni przetwarzania energii, a co za tym idzie, zwiększy sprawność całego systemu HVDC. Są to rozwiązania badane przez czołowe ośrodki uniwersyteckie, korporacyjne centra badawczo-rozwojowe i w przyszłości mogą być pożądane przez operatorów systemów elektroenergetycznych. Dlatego wybór tematu rozprawy uważam za oryginalny i niezwykle aktualny.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Celem rozprawy była szczegółowa analiza teoretyczna, opracowanie sterowania i wytycznych do projektowania układu oraz weryfikacja przy użyciu dwóch narzędzi do symulacji układów energoelektronicznych.

Licząca 165 stron rozprawa składa się z 10 rozdziałów i spisu literatury. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie na podstawie literatury do przekształtników MMC wraz z przedstawieniem wielu wariantów ich zastosowania. Ponadto opisano w nim przedmiot badań jakim jest przekształtnik MMC prądu stałego typu YY oraz przedstawiono motywację i cele badawcze. W rozdziale 2 omówiono podstawowe zasady działania przekształtnika YY i jego uproszczony opis matematycznego. Rozdział 3 analizuje działanie jednej gałęzi przekształtnika YY oraz zagadnienia związane z wyrównywaniem napięć na kondensatorach, co jest niezbędne do prawidłowej pracy układu. Omówiono problemy i metody balansowania napięć kondensatorów na poziomie gałęziowym oraz modułowym. Ponadto na podstawie literatury omówiono modulację napięcia metodą NLM (ang. Nearest Level Modulation), modulację szerokości impulsów PWM (ang. Pulse Width Modulation) oraz przedstawiono układ sterowania prądem gałęziowym. W rozdziale 4 przedstawiono badania symulacyjne i omówiono dokładność wyrównywania napięć na kondensatorach przy zastosowaniu balansowania na poziomie modułowym i gałęziowym. Rozdział 5 to krótkie przedstawienie sterowania wraz z wpisaniem go w hierarchiczną strukturę sterowania, która w przekształtnikach wielomodułowych stanowi jedyne rozwiązanie, które może być zaakceptowana przez przemysł. Rozdział 6 to najważniejsza część pracy, w której dokonano bardzo szczegółowej analizy matematycznej przekształtnika MMC YY, określono jego możliwości regulacyjne, opisano analitycznie prądy gałęziowe i wpływ funkcji okresowych

opisujących składową zmienną prądów gałęziowych na wartość skuteczną prądów. Ponadto opisano matematycznie tętnienia napięć w kondensatorach, wpływ na nie wyżej wspomnianych funkcji okresowych oraz zależność modulacji napięcia na tętnienia prądów przekształtnika MMC YY. Rozdział 7 to kolejny ważny rozdział, w którym wyprowadzono matematyczne zależności związane z balansowaniem mocy gałęzi przekształtnika. Rozdział 8 to przedstawienie procedury rozruchu układu, która dla przekształtnika z połączonymi szeregowo modułami nie jest trywialna i źle przeprowadzona może doprowadzić do uszkodzenia wielu kosztownych elementów półprzewodnikowych. W tym wypadku zastosowano hybrydowe rozwiązanie uwzględniające pasywne ładowanie kondensatorów, które jest dobrze znane, wraz z aktywnym kontrolowanym ładowaniem. Bardzo ciekawie rozwiązano ładowanie gałęzi 2a i 2b poprzez wprowadzenie małej różnicy potencjałów pomiędzy gałęziami 0a i 0b. W rozdziale 9 poświęcono się weryfikacji działania przekształtnika MMC YY w programie symulacyjnym PLECS oraz w systemie czasu rzeczywistego HIL firmy OPAL-RT. Pierwszym krokiem było przedstawienie założeń projektowych i projekt przekształtnika tj. dobór: wartości maksymalnego napięcia gałęziowego, liczby poziomów, pojemności i napięcia kondensatorów, częstotliwości łączeń, częstotliwości próbkowania, częstotliwości funkcji okresowej, indukcyjności dławików gałęziowych i parametrów układu regulacji. Prawdłowo w modelu symulacyjnym założono pewien rozrzut parametrów tj. indukcyjność dławików i pojemność kondensatorów oraz ich parametrów pasożytniczych, co w układzie praktycznym jest rzeczą naturalną. Następnie przedstawiono, rozruch, stany statyczne i dynamiczne pokazujące prawidłowe działanie układu w wszystkich tych stanach i prawidłowe wyrównywanie napięć na kondensatorach. Kolejnym krokiem było przeprowadzenie symulacji HIL, w których potwierdzono wcześniejsze prawidłowe wyniki symulacyjne z programu PLECS. Rozprawę kończy rozdział 10 stanowiący podsumowanie, definiujący oryginalny wkład własny Autora oraz pokazujący kolejne kierunki badań. Ponadto dołączono spis literatury obejmujący 106 pozycji.

3. Uwagi ogólne

Zagadnienia związane z analizą teoretyczną jak również ze sterowaniem i modulacją przekształtników MMC nie są łatwe i stanowią aktualnie przedmiot intensywnych badań prowadzonych zarówno w kraju jak i za granicą. Dlatego godnym podkreślenia jest, że Autor opiniowanej rozprawy podjął się tej złożonej i trudnej tematyki.

Do uwag dyskusyjnych natury ogólnej, jakie nasunęły się w czasie studiowania rozprawy należą:

1. Proszę o wyjaśnienie na ile możliwe było modelowanie układu MMC YY z zastosowaniem dokładniejszych modeli elementów półprzewodnikowych w symulatorze czasu rzeczywistego OPAL RT. Czy podjęto taką próbę?
2. Proszę o przybliżenie jak duży wpływ na całkowite straty przekształtnika (sprawność) może mieć wpływ prądów cyrkulujących pomiędzy gałęziami?
3. W jaki sposób można by zmniejszyć pojemności w modułach, bez pogorszenia parametrów regulacyjnych, w celu zwiększenia atrakcyjności MMC YY dla zastosowań aplikacyjnych?

4. Uwagi szczegółowe

Praca napisana jest z dużą starannością. Do nielicznych uwag szczegółowych można tylko zaliczyć:

1. Czy na stronie 31 (ostatni wiersz) na pewno chodzi o publikacje [68]?
2. Tab. 5 na stronie 39 jest dużym uproszczeniem w prezentacji przez które elementy płynie prąd w pojedynczym module w zależności od stanów załączeń, który jest prawdziwy tylko dla założenia, że łącznik faktycznie jest dwukierunkowy
3. Proszę o zweryfikowanie czy oznaczenia na Rys. 40 są prawidłowe.

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter analityczno-symulacyjny. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki, sterowania i technik symulacji komputerowej. Osiągnął sformułowany przez siebie cel, posługując się metodami analitycznymi, symulacji komputerowej oraz symulacji czasu rzeczywistego. Rozprawa napisana jest bardzo starannie, a stosowana terminologia jest również prawidłowa. Praca w stosunku do stanu wiedzy z tej dziedziny wnosi szereg nowych sformułowań i wartościowych wyników stanowiących osobisty dorobek Autora.

Za osiągnięcia własne Autora uznaję:

- opracowanie modelu analitycznego przekształtnika MMC YY pozwalającego na określenie szczegółowych parametrów układu, jego możliwości regulacyjnych oraz określenie warunków balansowania napięć na kondensatorach;
- opracowanie układu sterowania zapewniającego również wyrównywanie napięć na kondensatorach w modułach przekształtnika MMC;
- opracowanie procedury rozruchowej uwzględniającej częściowe aktywne ładowanie kondensatorów w modułach przekształtnika MMC YY;
- weryfikacja koncepcji, przedstawionych w pracy, dla przekształtnika MMC YY przy pomocy pakietu symulacyjnego PLECS oraz symulacji HIL przy wykorzystaniu symulatora czasu rzeczywistego OPAL-RT .

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Krzysztofa Kóskę pt. „**Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY**”, stanowi poważny i samodzielny wkład doktoranta w obszarze analizy wielopoziomowych przekształtników MMC i ich sterowania w dyscyplinie Elektrotechnika.

Na tej podstawie stwierdzam, że **przedstawiona rozprawa doktorska odpowiada wszystkim warunkom określonym przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Mariusz Malinowski

Warszawa, 01.12.2017

Dr hab. inż. Mariusz Malinowski, prof. PW

Politechnika Warszawska/ Wydział Elektryczny

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

WNIOSEK

o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kóska pt. „ Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY ”

Niniejszym wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kóska pt. „Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY ”. Stwierdzam, że rozprawa doktorska zawiera oryginalne rozwiązania szeregu zagadnień naukowych, a wyniki w niej zawarte były prezentowane zarówno w artykułach opublikowanych przez Autora rozprawy w renomowanych czasopismach (5 publikacji) i materiałach konferencji zagranicznych (5 publikacji) znajdując akceptację środowiska naukowego.

Wykaz ważniejszych publikacji i konferencji zagranicznych:

- [1] Błaszczak P., Kóska K., Klimczak P., *“Energy balancing in modular multilevel converter systems”* Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 65, No. 5, 2017
- [2] Kóska K., Błaszczak P., Klimczak P., Hałat P., Jeż R. *“Branch Energy Balancing of Double Wye DC-DC Modular Multilevel Converter”*, European Conference on Power Electronics and Applications EPE'17, Warszawa, 2017.
- [3] Klimczak P., Błaszczak P., Jeż R., Kóska K. *“Double Wye Modular Multilevel Converter - direct DC-DC topology”*, 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, 2016, pp. 1-6.



Mariusz Malinowski