

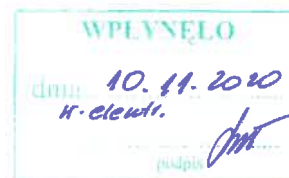
Warszawa, 06.11.2020

Prof. dr hab. inż. Mariusz Malinowski

Politechnika Warszawska/ Wydział Elektryczny

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**DLA RADY NAUKOWEJ DISCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA,
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Tytuł rozprawy: **Hex-Y – a modular multilevel converter topology. Feasibility study for direct-drive low frequency application.**

Autor rozprawy: **mgr inż. Paweł Błaszczyk**

1. Wstęp

Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Pawła Błaszczyka poświęcona jest przekształtnikowi modułowemu MMC (ang. Modular Multilevel Converter), który jest najczęściej analizowany w zastosowaniu dla wysokonapięciowej elektroenergetyki prądu stałego HVDC. Tematyka rozprawy doktorskiej inspirowana jest dynamicznym rozwojem modułowych układów energoelektronicznych stosowanych przez firmy w nowych zastosowaniach związanych z wytwarzaniem energii z odnawialnych źródeł energii np. morska energetyka wiatrowa, łączeniem podsystemów elektroenergetycznych o różnych częstotliwościach czy fazach oraz nowych aplikacjach średniego napięcia (SN) takich jak napędy elektryczne czy transformatory energoelektroniczne. Pomimo wielu ugruntowanych już rozwiązań dotyczących topologii pojedynczych modułów i metod sterowania przekształtnikami MMC w układach HVDC, poszukuje się wciąż nowych rozwiązań dla pozostałych zastosowań, głównie do sterowania wolnoobrotowymi maszynami elektrycznymi o dużej mocy np. bezpośrednie napędy stosowane w młynach kulowych czy generatory w elektrowniach wiatrowych. Takie rozwiązanie zwiększa sprawność całego systemu w związku z brakiem przekładni mechanicznej, a ponadto możliwe jest bezpośrednie dołączenie

przekształtnika MMC do sieci SN bez użycia transformatora, co nie tylko poprawia sprawność, ale również dodatkowo obniża koszt całej inwestycji. Dlatego są to rozwiązania badane przez czołowe ośrodki uniwersyteckie, korporacyjne centra badawczo-rozwojowe i są pożądane przez przemysł. W związku z tym wybór tematu rozprawy uważam za oryginalny i aktualny.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Celem rozprawy było opracowanie nowej konfiguracji przekształtnika MMC, jej szczegółowa analiza teoretyczna, opracowanie sterowania oraz weryfikacja symulacyjna między innymi przy użyciu RTS (Real Time Simulation).

Licząca 206 stron rozprawa składa się z 10 rozdziałów i spisu literatury. Rozdział 1 stanowi bardzo krótkie wprowadzenie przedstawiające podstawowe cele pracy oraz zawartość poszczególnych rozdziałów. Rozdział 2 opisuje na podstawie literatury w sposób ogólny przekształtniki MMC wraz z przedstawieniem podstawowych topologii pojedynczych modułów, przedstawia PEBB (Power Electronics Building Block) firmy ABB oraz wiele konfiguracji przekształtników MMC m.in. indirect MMC, M3C, hexverter, opracowaną Hex-Y, Hex-D oraz szereg konfiguracji MMC stosowanych w przekształcaniu energii DC-DC. W rozdziale 3 i 4 dokonano wnikliwej analizy opracowanego przekształtnika Hex-Y MMC uwzględniając również istotne zjawisko cyrkulujących prądów pomiędzy gałęziami przekształtnika i ich wpływ na działanie układu. W rozdziale 5 przedstawiono szczegółowo hierarchiczną strukturę sterowania oraz rozbudowaną przemysłową platformę mikroprocesorową/FPGA, na której zrealizowano w dalszej części pracy weryfikację RTS. Rozdział 6 to opis sposobu modelowania poszczególnych elementów układu Hex-Y oraz przedstawiono w nim częściowo wyniki symulacyjne. W rozdziale 7 zawarto symulacje RTS przekształtnika Hex-Y dla wybranego przykładu tj. bezprzekładniowej elektrowni wiatrowej z wolnoobrotowym generatorem PMSG. Symulacje wykonano dla niskich częstotliwości napięcia generatora do 9Hz, co jest ważne dla weryfikacji podstawowego celu pracy, jakim jest zastosowanie przekształtnika Hex-Y do układów maszynowych o niskiej częstotliwości. Rozdział jest ciekawy, jednak pewien niedosyt powoduje skrótowe omówienie niektórych wyników np. przedstawionych na rys.7.9. Ponadto utrudnieniem w weryfikacji wyników jest podawanie w podpisie rysunku tylko identyfikatora testu zamiast podstawowych parametrów.

Niestety ta niedogodność powoduje konieczność ciągłego cofania się do tabeli ze zdefiniowanymi wcześniej parametrami poszczególnych testów. Dodatkowo w podsumowaniu rozdziału brakuje wyników zestawiających w jednym miejscu napięcia i prądy wejściowe i wyjściowe przekształtnika Hex-Y, co byłoby dobrym podsumowaniem tej części pracy. Rozdział 8 to istotna część rozprawy doktorskiej zawierająca porównanie zaproponowanej konfiguracji Hex-Y MMC ze znaną wcześniej z literatury i konkurencyjną konfiguracją M3C. Wykazano, że zaproponowane rozwiązanie przekształtnika modułowego Hex-Y posiada nieznacznie lepsze parametry w porównaniu do M3C. W tym rozdziale pewną niedogodnością w analizie i ocenie wyników jest dobór skali czasowej, co dodatkowo przy małych rozmiarach rysunków powoduje duże trudności w odczycie detali na przebiegach np. rys. 8.15 czy 8.16. Rozdział 9 to krótki opis regulacji w zakresie zachowania przekształtnika w czasie zapadów napięcia LVRT (Low Voltage Ride Through), co jest bardzo istotne z punktu widzenia układu przemysłowego. Prawidłowe działanie układu Hex-Y MMC w przedstawionej sytuacji zostało potwierdzone badaniami symulacyjnymi. Rozprawę kończy rozdział 10 podsumowujący oryginalny wkład własny Autora oraz dodatki z analizą matematyczną nawiązującą do głównej części pracy. Ponadto dołączono do rozprawy spis literatury obejmujący 100 pozycji w tym 11 publikacji, w których współautorem był mgr inż. Paweł Błaszczuk.

Niestety w pracy można znaleźć szereg błędów redakcyjnych m.in. przy prezentacji wyników symulacyjnych, powodując przez to trudności w analizie ich poprawności. Jako przykłady można podać:

- rysunki 2.14 i 2.15 nie korespondują ze sobą;
- na stronie 67 jest odwołanie do prądu o symbolu I_t zamiast i_0 (symbolu I_t nie można znaleźć w całej pracy łącznie ze spisem symboli zamieszczonym na początku rozprawy);
- wszystkie wyniki symulacyjne w rozdziale 4 tj. rysunki od 4.1 aż do 4.12 są przedstawione w jednostkach bezwzględnych zamiast względnych dając w pierwszej chwili błędne wyobrażenie o poprawności działania modelu symulacyjnego;
- zastosowane podpisy pod rysunkami nie zawsze są prawidłowe np. umieszczono podpis pod rysunkiem 4.7 „power” a pokazane jest napięcie lub umieszczono „energy” a pokazany jest prąd;
- powyższy błąd redakcyjny powielony jest ponownie na rysunkach 4.9 i 4.10;

3. Uwagi ogólne

Zagadnienia związane z analizą teoretyczną jak również ze sterowaniem i modulacją przekształtników MMC, w tym szczególnym przypadku konfiguracji Hex-Y, 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 trudnej tematyki.

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

1. Proszę o przybliżenie jak duży wpływ na całkowite straty (sprawność) przekształtnika Hex-Y mają prądy cyrkulujące pomiędzy gałęziami, szczególnie dla niskich częstotliwości napięcia wyjściowego? Jak to porównanie sprawności wygląda w porównaniu do konkurencyjnego przekształtnika M3C?
2. Proszę o przybliżenie jak zostały zrealizowane bloki sterowania „Branch current controller” i „Scale to modulation index” (Rysunek 5.8), które są zaimplementowane częściowo w *slave controller* oraz *DSP controller*. Dlaczego takie rozwiązanie zaproponowano? Jakie zalety posiada częściowe umieszczenie jednego bloku sterowania na dwóch platformach sterowania? Jakie zmienne algorytmu sterowania i z jaką częstotliwością były wymieniane pomiędzy platformą sterowania *slave controller* i *DSP controller*?
3. Czy w badaniach symulacyjnych uwzględniano zjawiska, które mogą mieć wpływ na dokładność odwzorowania w stosunku do układu rzeczywistego tj. szumy pomiarowe, nieliniowości czy elementy pasożytnicze?

4. 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. Praca w stosunku do stanu wiedzy z tej dziedziny wnosi szereg nowych sformułowań i wartościowych wyników stanowiących dorobek Autora.

Za osiągnięcia własne Autora uznają:

- opracowanie nowej konfiguracji przekształtnika MMC nazwanej Hex-Y;
- opracowanie modelu analitycznego Hex-Y pozwalającego na określenie szczegółowych parametrów układu przekształtnikowego;
- opracowanie układu sterowania dla konfiguracji Hex-Y oraz implementacja hierarchicznej struktury sterowania w rozproszonym systemie mikroprocesorowym;
- porównanie układu Hex-Y z przekształtnikiem matrycowym M3C.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Pawła Błaszczaka pt. „**Hex-Y – a modular multilevel converter topology. Feasibility study for direct-drive low frequency application**”, stanowi samodzielny wkład doktoranta w obszarze energoelektroniki należącej do dyscypliny elektrotechnika (nowa dyscyplina automatyka, elektronika i elektrotechnika), a w szczególności przyczynia się do poszerzenia wiedzy związanej z analizą wielopoziomowych przekształtników MMC i ich sterowania.

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