



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt. „Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY”

autorstwa mgr inż. **Krzysztofa Kóski**

wykonana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH w Krakowie z dnia 6.11.2017 r.

1. UMIEJSCOWIENIE TEMATU, AKTUALNOŚĆ I ZAKRES ROZPRAWY

W dobie coraz większych wymagań stawianych w obszarze przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej, coraz powszechniejsza staje się potrzeba zastosowania różnych dedykowanych do tego obszaru urządzeń energoelektronicznych. W szczególności otwierają się nowe perspektywy i rośnie znaczenie wielopoziomowych układów energoelektronicznych MV i HV, nie wymagających dopasowania poziomów napięć za pomocą transformatora sieciowego. **O wadze i znaczeniu powyższej problematyki świadczy przy tym stale rosnąca liczba naukowych publikacji tematycznych o dużej randze.**

Wśród różnych rozwiązań przekształtników wielopoziomowych, od ok. 15 lat coraz większa uwaga udzielana jest układom tzw. Modular Multi-Level Converter (MMC). Oprócz cech wspólnych dla topologii wielopoziomowych, układy MMC wyróżniają się pełną skalowalnością do wysokich poziomów napięć, brakiem wymogu zasilania poszczególnych modułów oraz dużą niezawodnością związaną możliwościami redundancji. Te właściwości w istotny sposób zaowocowały przede wszystkim licznymi badaniami i komercyjnymi zastosowaniami falowników MMC. Natomiast inne układy MMC, a w szczególności przekształtniki DC/DC, są ogólnie słabiej zbadane. Przyczyną tego stanu, co konstatuje Doktorant, jest jak dotychczas brak oczywistych i uzasadnionych obszarów aplikacyjnych. Ten fakt nie przeczy jednak potrzebie, celowości i aktualności pogłębionych badań układów MMC DC/DC, co wiąże się z perspektywami rozwoju sieci i sprzęgów HVDC oraz MVDC. Bez takich badań oraz opracowania i szczegółowej analizy odpowiednich układów przekształtników DC/DC HV i MV utrudnione będzie wprowadzanie sieci prądu stałego.

Uwzględniając powyższe należy stwierdzić, że opiniowana rozprawa ściśle mieści się w aktualnych trendach rozwojowych w obszarze energoelektroniki, a dotycząc złożonego bardzo ważnego i aktualnego zagadnienia projektowania oraz syntezy sterowania nowego układu MMC DC-DC zaproponowanego w 2014 r przez Centrum Badawczym ABB w Krakowie (miejsce pracy Doktoranta) dla perspektywicznych systemów MVDC i HVDC, stanowi istotny wkład w rozwój innowacyjnych technologii stosowanych w elektroenergetyce

Rozprawa liczy 165 str. wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisem treści, wykazem skrótów i oznaczeń, spisem tabel i rysunków oraz bibliografią zawierającą 106 pozycji, w tym 2 publikacje autora. Rozprawa składa się 10 rozdziałów, które rozpoczyna wprowadzenie (rozdział 1) a kończą wnioski końcowe i podsumowanie (rozdział 10).

Zasadniczą część rozprawy rozpoczyna rozdział 2, w którym przedstawiono topologię badanego układu MMC DC-DC typu YYY oraz opisano założenia i warunki dotyczące jego działania. Kolejne rozdziały 3 i 4 obejmują szczegółową analizę działania pojedynczej gałęzi z uwzględnieniem zasady stabilizacji napięć kondensatorów. Następny rozdział 5 dotyczy struktury układu sterowania podzielonej hierarchicznie na poziomy, począwszy od regulacji prądu wyjściowego na najwyższym poziomie do najniższego poziomu - układów generujących sygnały bramkowe.

W bardzo ważnym rozdziale 6, przedstawiono pełny model analityczny badanego przekształtnika. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom balansowania mocy w przypadku idealizowanego układu bezstratnego. Ponadto przeprowadzono ocenę możliwości regulacyjnych przekształtnika oraz wpływ kształtu okresowych przebiegów balansujących. Uzupełnieniem tego materiału stanowią opisany w rozdziale 7 opracowany układ sterowania mocą czynną gałęzi przekształtnika oraz procedura rozruchu przekształtnika (rozdział 8) umożliwiające naładowanie kondensatorów pośredniczących do wymaganego napięcia. Potwierdzeniem prawidłowości przeprowadzonych badań analitycznych są wyniki symulacji działania układu MMC DC-DC typu YY przedstawione w rozdziale 9, otrzymane zarówno w pakiecie programowym PLECS®, jak również za pomocą symulatora czasu rzeczywistego RTS dedykowanego dla układów MMC, zaprojektowanego i udostępnionego na potrzeby rozprawy przez firmę ABB

2. OCENA OGÓLNA ROZPRAWY

Uwzględniając kolejność i zakres omawianych zagadnień należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa zawiera wszystkie nieodzowne elementy rozpraw doktorskich. Jej koncepcja opiera się na trzech podstawach: ocenie problemu i aktualnego stanu wiedzy, i następnie wyborze badanego rozwiązania; analizie teoretycznej działania, uwarunkowań i właściwości wybranego układu; badaniach i weryfikacji symulacyjnej/eksperymentalnej. Rozprawa jest pierwszym dokładnym i głębokim analityczno-eksperymentalnym opracowaniem dotyczącym działania układu MMC DC-DC typu YY, w której jednocześnie pokazano możliwość stabilnego sterowania tym układem przy założonych zmianach obciążenia i napięcia zasilającego. Interesujące i rękujące wyniki przeprowadzonych badań, w tym również eksperymentów symulacyjnych, potwierdzają także celowość dalszych działań w kierunku wskazanym przez doktoranta.

Zapoznając się z rozprawą widać ogrom wykonanej pracy i wiedzy oraz duże zaangażowanie i bardzo dobre przygotowanie doktoranta, zarówno teoretyczne jak i praktyczne. Niestety, duża liczba i złożoność poruszanych zagadnień, a także liczba przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników przekłada się na niekiedy na przejrzystość przedstawionego materiału. W niczym nie ujemuje to jednak wysokiej oceny strony merytorycznej. Dysertacja zawiera zarówno bardzo wartościowe wyniki badań analitycznych jak również eksperymentu symulacyjnego. Za bardzo istotne uważam również samo postawienie problemu i podejście do jego rozwiązania. Ogólnie, autorowi udało się dobrać aparat matematyczno-analityczny odpowiedni do oceny i rozwiązania nietrywialnych zagadnień inżynierskich i projektowych.

W kontekście powyższego, do głównych osiągnięć autora rozprawy zaliczam:

- Określenie warunków balansowania napięć kondensatorów pośredniczących przekształtnika DC-DC typu YY z uwzględnieniem rozrzutu parametrów modułów

- Opracowanie modelu analitycznego układu MMC DC-DC typu YY, określenie możliwości regulacyjnych badanej topologii oraz wyznaczenie warunków pracy pod kątem minimalizacji wartości skutecznych prądów w gałęziach lub amplitudy tętnień napięcia kondensatorów pośredniczących
- Opracowanie dedykowanego stabilnego układu sterowania przekształtnika DC-DC typu YY zapewniającego kontrolę prądów wejściowego i wyjściowego oraz stabilizację napięć kondensatorów pośredniczących, a także procedury rozruchowej przekształtnika
- Propozycję metody projektowania oraz doboru parametrów pracy układu MMC DC-DC typu YY
- Weryfikację symulacyjną działania układu MMC DC-DC typu YY na bazie opracowanych sterowań, przeprowadzoną za pomocą pakietu programowego PLECS®, oraz z wykorzystaniem systemu RTS

Podsumowując stwierdzam, że wydzielone przez doktoranta cele badawcze zostały w pełni osiągnięte. Uzasadnione są także wnioski podane w zakończeniu oraz konkluzje formułowane na poszczególnych etapach. Rozprawa zawiera istotne wyniki badań teoretycznych i eksperymentu symulacyjnego, uzyskane odpowiednimi metodami badawczymi. Autor wykazał się bardzo dobrą i głęboką znajomością rozpatrywanej problematyki oraz zdolnościami analitycznymi. Na podkreślenie zasługuje zakres badań i kompleksowość podejścia do problemu.

3. UWAGI

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Krzysztofa Kóski pt. „Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY” nasuwają się następujące komentarze uwagi i zastrzeżenia:

1. Z mojego punktu widzenia rozprawa została „przematematyzowana”. Niektóre opisy matematyczne są dość podstawowe i dotyczą elementarnych zjawisk fizycznych. W olbrzymiej ilości szczegółowych wprowadzeń matematycznych gubią się przy tym najistotniejsza i bardzo cenna zawartość rozprawy oraz podstawowe właściwości badanego układu YY. Olbrzymia ilość wprowadzonych nietypowych oznaczeń z rozbudowanymi indeksami, niekiedy bardzo podobnych, choć w pełni usystematyzowana i zebrana znacząco utrudnia i spowalnia przyswojenie materiału.
2. Cele badawcze oraz struktura pracy zostały niepotrzebnie, prawie dosłownie, przedstawione w rozprawie aż dwa razy: na str. 5-6 (streszczenie) i str. 31-31 (podrozdziały 1.2 i 1.3).
3. W pracy, w tablicy 2 przedstawiono niektóre topologie wielopoziomowych przekształtników modułowych. Brakuje bardziej szczegółowego porównania parametrów różnych przekształtników DC/DC oraz zestawiania ich wad i zalet, co w rezultacie pozwoliłoby na lepsze umiejscowienie badanego układu wśród innych rozwiązań.
4. Rozpatrywany przekształtnik MMC DC/DC typu YY, składa z 6-ciu gałęzi o jednakowej liczbie N identycznych modułów HB. Wskazana byłaby choćby szacunkowa ocena właściwości topologii YY, w tym prądów balansujących i zakresu regulacji w przypadku różnej liczby modułów HB w gałęziach, w szczególności gdy $N_1=N_2 \neq N_0$ oraz $N_1+N_0=N_2+N_0=2N$
5. Ponieważ w badanym układzie przekształtnika MMC DC/DC typu YY istnieje także możliwość zastosowania 4 dławików niezależnych lub 2 dławików o 3 lub 2 uzwojeniach sprzężonych,

wskazane byłoby szersze uzasadnienie przyjętego rozwiązania symetrycznego (rys.6) z 6-ma niezależnymi dławikami gałęziowymi.

6. W związku z zależnością dynamiki układu regulacji napięcia kondensatora (rys.20) wskazane byłoby zastosowanie odpowiedniego układu adaptacyjnego, tj. przede wszystkim uzależnienie współczynnika wzmocnienia K_{pc} od wartości prądu gałęziowego i_{br} .
7. Na str. 34 (3 akapit od dołu), na str. 39 (nadpis tab. 4), str. 40 oraz w innych licznych miejscach rozprawy moduł HB przekształtnika nazywany jest „falownikiem”. Taka nazwa komórki/modułu HB jest niepoprawna.
8. We wzorze (3.61) i dalej wystąpił błąd, wynikły z przyjętej wartości modułu transmitancji pętli regulacji G_i .
9. Wydzielone tryby pracy A1 i B3 modułu HB (tab. 4) nie występują w praktyce i niczym się nie różnią się od rzeczywistych trybów A2 i B2. Ponadto, w dalszej części pracy używane są określenia tryb „1” oraz tryb „0”.
10. W podrozdziale 6.6, zdaniem recenzenta, zabrakło oceny wpływu trapezoidalnych funkcji f_i i f_r , choć autor wskazuje na możliwość ich zastosowania. Nie zawsze racjonalne jest zastosowanie podejście matematyczne. Np. wartość współczynnika k_f obliczanego wg. zależności (6.183) można łatwiej wyznaczyć bez zastosowania szeregu Fouriera. Również rozpatrując wariant 3, dla wyznaczenia amplitud pierwszej i trzeciej harmonicznej wystarczyło przenieść rezultaty znane z modulacji THIPWM.
11. Dodatkowej analizy wymagałby wpływ odrzuconych iloczynów składników balansujących w równaniach (7.294)-(7.299) na wartość wyznacznika (7.308) i warunki istnienia rozwiązania
12. Ze stwierdzenia autora w pierwszym akapicie na str. 101 wynika pośrednio, że wspólny obwód kondensatora pośredniczącego występuje tylko w przypadku klasycznych dwu- lub trójpoziomowych falowników napięcia. Taki obwód występuje dla wszystkich falowników z rodziny „Diode Clamped”
13. Wniosek wyprowadzony na podstawie (6.129)-(6.134) i opisany wzorami (6.135) i (6.136) jest trywialny, w tym w szczególności wynika z przyjętych założeń (6.117) i (6.118)
14. Na str. 80 brakuje odniesienia do przestrzeni funkcyjnej $L^2[0,2\pi]$, której dotyczy ortogonalność funkcji f_i i f_r . Jednocześnie, ponieważ warunek (6.145) dotyczy tylko dwóch funkcji, to właściwiej było mówić o iloczynie skalarnym w przestrzeni funkcyjnej $L^2[0,2\pi]$.
15. Brakuje chociażby pobieżnej analizy zachowania się układu w przypadku przesunięć fazowych składowych zmiennych napięć i prądów gałęziowych.

Rozprawa zawiera też drobne błędy natury edycyjnej, takie np. jak:

16. Na str. 96, w przedostatnim akapicie zamiast (6.111) powinno być (6.208)
17. Na końcu str. 31, zamiast [68] najprawdopodobniej powinno być [46]
18. Mimo, że wzmocnienie K_{pc} jest definiowane jako iloraz odpowiednich wartości bezwzględnych, zapis wzoru (3.56), w którego liczniku i mianowniku występuje napięcie V_C , nie jest udany.

Ich znaczenie jest nieistotne dla meritum rozprawy.

Wyszczególnione w recenzji uwagi, w części merytorycznej dyskusyjne, w niczym nie pomniejszają znaczenia i nie podważają ogólnej bardzo wysokiej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

WNIOSEK KOŃCOWY

- 1) Doktorant wykazał się obszerną i głęboką wiedzą oraz dobrym przygotowaniem merytorycznym do pracy naukowo-badawczej, w tym, w szczególności, wysokimi umiejętnościami analitycznymi.
- 2) Przedstawione wyniki samodzielnych badań mają istotną wartość poznawczą, inspirującą i praktyczną, przez co mogą być przydatne zarówno w innych pracach badawczych jak i w działalności konstruktorsko-inżynierskiej.
- 3) Rozprawa charakteryzuje się wysokim poziomem edytorskim.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska magistra inżyniera Krzysztofa Kóska pt. „Nieizolowany wielopoziomowy przekształtnik modułowy DC/DC typu YY” w dyscyplinie elektrotechnika spełnia wszelakie kryteria i wymagania stawiane pracom doktorskim w obowiązującej Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnoszę o przyjęcie i dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony.

Uwzględniając bardzo wysoki poziom merytoryczny oraz zakres i szczegółowość przeprowadzonych badań, a także istotne praktyczne znaczenie osiągniętych rezultatów, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.

