

Prof. dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Politechniki Wrocławskiej  
ul. Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław

Wrocław, 27.11.2020r.

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Gierczyńskiego

pt. „Analiza pracy przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu oraz synteza układu regulacji w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego  
Politechniki Warszawskiej

#### 1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

W chwili obecnej systemy przesyłu i przekształcania energii z łączem wysokiej częstotliwości stają się coraz bardziej popularne w wielu zastosowaniach, ze względu na wysoką gęstość mocy, niewielką wagę i niski poziom hałasu bez uszczerbku dla wydajności, kosztów i niezawodności. W systemach tych podstawową rolę pełnią izolowane dwukierunkowe przekształtniki DC/DC z podwójnym mostkiem aktywnym (*ang. Dual Active Bridge – DAB*). Wypierają one skutecznie dotychczas stosowane ciężkie, hałaśliwe i o niskiej sprawności transformatory o częstotliwości sieciowej. Przekształtnik typu DAB składa się z dwóch przekształtników mostkowych typu H, dwóch kondensatorów prądu stałego, dławika pomocniczego i transformatora wysokiej częstotliwości (HF). Transformator HF zapewnia wymaganą izolację galwaniczną i dopasowanie napięcia między dwoma poziomami napięcia, a dławik pomocniczy włączony szeregowo w obwód uzwojenia strony pierwotnej transformatora służy jako urządzenie do natychmiastowego magazynowania energii.

Stosowanie przekształtników DAB z transformatorami wysokiej częstotliwości w miejsce tradycyjnych transformatorów niskoczęstotliwościowych uważane jest obecnie za nowy, rozwijający się trend w zakresie przesyłu i przekształcania energii. Idea układów typu DAB została zapoczątkowana jeszcze w latach 90. ubiegłego wieku i ze względu na możliwości dwukierunkowego przekształcania energii, realizacji miękkiego przełączania oraz modułową i symetryczną strukturę, wzbudziła duże zainteresowanie badaczy i przemysłu. Jednak dopiero obecny postęp w zakresie nowych elementów półprzewodnikowych opartych na węglu krzemu (SiC) i azotku galu (GaN) oraz materiałów magnetycznych nanokrystalicznych na bazie żelaza spowodował, że układy typu DAB przyciągają w ostatnich latach coraz większą uwagę.

Taki przekształtnik jest przedmiotem rozważań mgr. inż. Michała Gierczyńskiego w Jego rozprawie doktorskiej, przy czym skupił się On głównie na zagadnieniach



modelowania oraz syntezy układu sterowania przekształtnikiem DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego DAB z dodatkowymi filtrami prądu na wejściu i wyjściu.

Biorąc to wszystko pod uwagę, należy stwierdzić, że tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest bardzo aktualna oraz ważna z naukowego i praktycznego punktu widzenia. Jako dodatkowe uzasadnienie tego twierdzenia może posłużyć stosunkowo duża liczba publikacji w literaturze światowej ostatnich lat, dotycząca różnych aspektów konstrukcji, projektowania, analizy i optymalizacji oraz zastosowań przekształtników DAB. Reprezentatywny przegląd tej literatury znalazł się w bibliografii niniejszej rozprawy doktorskiej.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 95 stron, w tym spis literatury zawierający 75 pozycji oraz wykaz podstawowych symboli i skrótów. Ponadto na końcu zamieszczono wykaz rysunków i tablic. Rozprawa została podzielona na 5 głównych rozdziałów i podsumowanie.

Rozdział pierwszy zawiera omówienie tematyki rozprawy i bardzo syntetyczny przegląd literatury, skoncentrowany na poszczególnych aspektach analizowanego problemu: topologii DAB przekształtnika DC/DC, modelach tego przekształtnika w stanach pracy ustalonej, modulacji i sterowaniu, algorytmach kompensacji składowej stałej oraz przejściowej prądu transformatora oraz na algorytmach regulacji napięcia wyjściowego. Następnie Autor przedstawił motywację podjęcia tematu odwołując się do docelowej aplikacji przekształtnika DAB, którą było zastosowanie go do ładowania oraz rozładowywania baterii litowo-jonowych. Podkreślił, że w literaturze przekształtnik DAB z filtrem prądu wyjściowego i kaskadową strukturą sterowania był opisywany jedynie przez F. Krismera z zespołu prof. J.W. Kolar z ETH Zurich. Jednak w pracach tego zespołu wykorzystano modelowanie dynamiki analizowanej topologii przekształtnika DAB z wykorzystaniem podejścia małego sygnałowego w przestrzeni stanu, a procedurze doboru nastaw regulatorów poświęcono stosunkowo mało uwagi i ograniczono się jedynie do podania żądanych wartości zapasu wzmocnienia i fazy.

W świetle powyższego Doktorant przedstawił cel i zakres swojej rozprawy, formułując go następująco: „*Celem rozprawy jest analiza stanów ustalonych i przejściowych przekształtnika o topologii DAB oraz zaproponowanie struktury i metod sterowania umożliwiających uzyskanie pożądanych właściwości regulacyjnych.*” Przy czym Autor postanowił skoncentrować się na wykorzystaniu metod analitycznych do stworzenia rozwiązań o charakterze praktycznym, czyli zastosować klasyczne metody strojenia regulatorów PI na podstawie charakterystyk częstotliwościowych zlinearyzowanego obiektu.

Na zakończenie tego rozdziału Autor przedstawił tezę rozprawy oraz krótko scharakteryzował jej zawartość.

W Rozdziale 2, po zdefiniowaniu oznaczeń stosowanych w opisach przekształtnika DAB, Autor omówił pracę tego przekształtnika w stanie ustalonym przy zastosowaniu tzw. modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym (*ang. Single Phase Shift – SPS*), stosując zaczerpnięty z literatury tzw. uproszczony model bezstratny przekształtnika, co umożliwiło



linearyzację obiektu sterowania. Następnie uzasadnił cel stosowania dodatkowych filtrów w celu ograniczenia składowej przemiennej prądu wejściowego i wyjściowego przekształtnika DAB (a tym samym ograniczenie zakłóceń przewodzonych emitowanych przez ten układ) i przedstawił sposób projektowania zaproponowanego filtra LC (wraz z układami tłumiącymi) oraz jego transmitancję i charakterystyki częstotliwościowe. W rozdziale tym Doktorant opisał również model symulacyjny przekształtnika zrealizowany w programie PLECS, w którym to modelu uwzględnił rezystancje pasożytnicze transformatora oraz rezystancję kanału dren-źródło tranzystorów MOSFET. Na szczególną uwagę w tym rozdziale zasługuje uzyskana zgodność wyników teoretycznych uzyskanych przy uproszczonym modelu analitycznym i znacznie dokładniejszym modelu symulacyjnym (rys. 2.3, 2.9 i 2.10).

W rozdziale 3 Doktorant przedstawił autorski algorytm kompensacji składowej przejściowej w przebiegach prądu transformatora przekształtnika DAB, polegający na odpowiednim przesuwaniu chwil występowania zboczy narastających napięć AC mostków H poprzez algorytm modulacji SPS i opierający się na analizie wartości gradientu prądu transformatora w interwale czasowym pomiędzy zboczami tych napięć w porównaniu do interwałów poprzedzających i następujących po nim.

Zasadniczą część rozprawy stanowi najobszerniejszy rozdział czwarty (41 stron, ponad 43% rozprawy), w którym Autor przedstawił zastosowaną kaskadową strukturę regulacji przekształtnika DAB i autorską metodologię strojenia regulatorów PI wykorzystującą charakterystyki częstotliwościowe zlinearyzowanego obiektu sterowania. W rozdziale tym zawarł również porównanie dynamiki obwodów regulacji prądu oraz napięcia przekształtnika wyznaczonej na podstawie uproszczonych obliczeń analitycznych z badaniami symulacyjnymi dokładnego modelu matematycznego obiektu i analizowanej struktury sterowania, uzyskując bardzo dobrą zgodność wyników.

Rozdział 5 zawiera opis stanowiska laboratoryjnego oraz weryfikację eksperymentalną wyników otrzymanych w rozdziale czwartym.

Rozprawę zamyka syntetyczne podsumowanie otrzymanych wyników i wykaz osiągnięć autora rozprawy.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-projektowy, przy czym proponowane koncepcje związane z modyfikacją znanej kaskadowej struktury sterowania oraz z zaproponowanym przez Autora podejściem do syntezy regulatorów w tej strukturze zostały zweryfikowane na drodze eksperymentów symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych zrealizowanych praktycznie przy wykorzystaniu zaprojektowanego i zbudowanego przekształtnika DAB.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Głównym problemem naukowym, który Autor starał się rozwiązać, było wykazanie, że odpowiednio zaprojektowana struktura kaskadowa regulatorów prądu i napięcia wyjściowego przekształtnika DAB spełnia wymagania co do jakości przebiegów zmiennych stanu przekształtnika, z zachowaniem założonych zapasów wzmocnienia i fazy, gwarantujących



stabilną pracę oraz szybkość i dobre tłumienie odpowiedzi układu nawet w przypadku zmian jego parametrów i szumów pomiarowych.

Doktorant sformułował następującą tezę:

*„Zaproponowana metoda projektowania układu regulacji, z autorskim algorytmem kompensacji składowej przejściowej w prądzie transformatora, dla przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu zapewnia uzyskanie pożądanych właściwości regulacyjnych w każdych warunkach pracy, także w przypadku ograniczonej dokładności identyfikacji obiektu sterowania.”*

Autor, po wprowadzeniu odpowiednich założeń upraszczających, opracował model matematyczny przekształtnika DAB, umożliwiający jego opis w stanach ustalonych i dynamicznych. Uzyskał więc model przydatny do rozwiązania zadania syntezy nastaw regulatorów PI (z ograniczeniami), z wykorzystaniem klasycznego podejścia z zakresu teorii sterowania układów liniowych, a mianowicie charakterystyk częstotliwościowych układu otwartego i zamkniętego. Na uwagę zasługuje autorski algorytm kompensacji składowej przemiennej prądu wejściowego i wyjściowego przekształtnika DAB. Autor wprowadził odpowiednie filtry na wejściu i wyjściu układu i wykazał, że możliwe jest opracowanie algorytmu umożliwiającego skuteczne tłumienie składowej przejściowej prądu transformatora o podwyższonej częstotliwości (40 kHz) i tym samym eliminację negatywnych zjawisk zachodzących w stanach dynamicznych przekształtnika DAB, przy zmianie współczynnika przesunięcia fazowego  $D_{SPS}$  w zastosowanej metodzie modulacji z tzw. pojedynczym przesunięciem fazowym SPS.

Doktorant przedstawił metodykę projektowania regulatorów PI prądu i napięcia wyjściowego przekształtnika DAB, wykorzystując analizę transmitancji poszczególnych elementów układu i ich charakterystyk częstotliwościowych, dobierając nastawy regulatorów w podporządkowanej i zewnętrznej pętli regulacji tak, aby uzyskać założony zapas stabilności układu regulacji, zdefiniowany poprzez zapas wzmocnienia i fazy. Zastosowanie tego klasycznego podejścia projektowego stało się możliwe dzięki przyjęciu szeregu założeń upraszczających i linearyzacji układu. Autor dokonał tej linearyzacji traktując układ jako bezstratny i zastępując obydwie mostki H przekształtnika DC/DC idealnymi źródłami napięcia o fali prostokątnej, a transformator separujący jako transformator idealny z szeregowo włączonymi indukcyjnościami rozproszenia. Do takiego modelu obiektu dodał filtry LC wejściowy i wyjściowy, opisując cały układ przy wykorzystaniu transformacji Laplace'a. Ponadto, uwzględniając opracowaną przez siebie metodę kompensacji składowej przemiennej prądu przekształtnika zaproponował aproksymację dynamiki kształtowania przefiltrowanego prądu po stronie wtórnej w odpowiedzi na sygnał z regulatora prądu za pomocą szeregowego połączenia członu opóźniającego (opóźnienie równe 1,75 okresu przełączeń przekształtnika) oraz transmitancji filtra prądu. Umożliwiło to zastosowanie podejścia zgodnego z teorią układów liniowych do syntezy nastaw regulatora prądu.

Autor opracował również dokładniejszy model symulacyjny w środowisku PLECS, uwzględniający charakterystyki zaworów półprzewodnikowych (tranzystory MOSFET) oraz



rezystancję i indukcyjności pasożytnicze transformatora, jak również czas martwy przekształtnika (dla parametrów odpowiadających układowi laboratoryjnemu).

Na uwagę zasługuje fakt, że analizy teoretyczne i wyniki badań symulacyjnych zostały zweryfikowane na zaprojektowanym i zbudowanym w laboratorium Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej układzie prototypowym, z przekształtnikiem DAB, wykonanym z wykorzystaniem modułów mocy z tranzystorami typu MOSFET z węgliku krzemu oraz układem sterującym zaprogramowanym w mikrokontrolerze TMS320F28379D firmy Texas Instruments. Doktorant uzyskał bardzo dobrą zgodność wyników symulacyjnych z weryfikacją eksperymentalną.

Do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

- opracowanie prostego w implementacji mikroprocesorowej algorytmu kompensacji składowej przejściowej prądu transformatora, umożliwiającego eliminację negatywnych zjawisk zachodzących w stanach dynamicznych przekształtnika DAB;
- opracowanie nowatorskiego sposobu opisu matematycznego przekształtnika DAB, pozwalającego na teoretyczną analizę pracy oraz syntezę układu regulacji z wykorzystaniem regulatorów PI;
- opracowanie autorskiej metodologii wyznaczenia nastaw regulatora prądu i napięcia przekształtnika DAB, zapewniającej założenia projektowe dotyczące zapasu wzmocnienia i fazy zamkniętego układu regulacji oraz zmniejszenie liczby stopni swobody podczas syntezy regulatorów z dwóch do jednego parametru;
- opracowanie modeli symulacyjnych oraz wykonanie wszechstronnych testów zaprojektowanego układu, umożliwiających wstępną weryfikację poszczególnych etapów analiz teoretycznych;
- implementację zaproponowanych algorytmów sterowania na platformie mikroprocesorowej oraz wykonanie badań eksperymentalnych zaprojektowanego przekształtnika DAB z filtrami wejściowym i wyjściowym.

W trakcie czytania opiniowanej rozprawy nasunęły mi się właściwie tylko dwie uwagi dyskusyjne, które wymagają odpowiedzi Doktoranta, tym bardziej, że pierwsza z nich związana jest z fragmentem sformułowanej przez Niego tezy, a mianowicie:

1<sup>o</sup> Jak wyglądają odpowiedzi dynamiczne (na skokową zmianę wartości zadanej oraz zakłócającej) analizowanego przekształtnika DAB w przypadku ograniczonej dokładności identyfikacji parametrów przekształtnika?

W bardzo szczegółowej analizie wpływu parametrów regulatorów na właściwości analizowanych układów regulacji prądu przekształtnika (obwód wewnętrzny) oraz napięcia wyjściowego przekształtnika DAB, przedstawionej w rozdziałach 4.5 i 4.6, zabrakło mi analizy wpływu błędów identyfikacji parametrów układu mocy przekształtnika na pracę układu w stanach dynamicznych przy nastawach poszczególnych regulatorów dobranych dla wartości znamionowych. Autor kilkakrotnie w rozprawie podkreślał konieczność zachowania kompromisu pomiędzy wymaganiami układu co do

dynamiki a postulatem zachowania odpowiedniego zapasu wzmocnienia i fazy w celu uzyskania pewnej odporności na niepewności parametryczne i pomiarowe układu. Wprawdzie jeden taki przykład podano w podrozdziale 5.3, dla zwiększonej o 50% rezystancji w torze tłumienia filtra prądu wyjściowego, ale czy błędna identyfikacja wartości innych parametrów obwodów obu filtrów (wejściowego i wyjściowego), np. rezystancji  $R_{fl}$ , błąd stosunku indukcyjności  $n_L=L_{fb}/L_{fa}$  bądź indukcyjności zastępczej transformatora  $L_{eq}$ , nie wpłyną na ograniczenie właściwości dynamicznych bądź zapasu stabilności przekształtnika, a jeśli tak, to w jaki sposób?

W świetle powyższego, prosiłabym Doktoranta o przedstawienie kilku przykładów pracy obwodu regulacji prądu, obwodu regulacji napięcia oraz całej struktury sterowania (które w rozprawie mogłyby stanowić uzupełnienie rozdziałów 4.4 i 4.6) dla zmiennych wartości parametrów układu (w szczególności rezystancyjnych) oraz o podanie jak szeroki może być dopuszczalny zakres zmian tych parametrów (bądź błędów identyfikacyjnych) przy zachowaniu założonej tolerancji co do wartości zapasu wzmocnienia i fazy w poszczególnych analizowanych obwodach regulacji.

- 2<sup>o</sup> Przy syntezie obwodu regulacji napięcia Autor wykorzystał dość istotny fakt, jakim jest ściśle monotonicznie malejący charakter przebiegu charakterystyki amplitudowej transmitancji widmowej otwartego układu. Umożliwiło to oparcie procedury strojenia regulatora napięcia na analizie zapasu fazy układu otwartego. Czy zdaniem Autora dla każdego przekształtnika typu DAB z filtrem prądu będzie zachodzić ta prawidłowość co do przebiegu charakterystyki amplitudowej transmitancji układu otwartego regulacji napięcia?

Poza podanymi wyżej uwagami o charakterze ogólnym, nie zauważyłam w zasadzie żadnych usterek redakcyjnych w recenzowanej rozprawie poza jedną:

- str. 83, w. 15<sub>g</sub> – zamiast „ilość opóźnienia fazy”, proponuję „wartość opóźnienia fazy”.

Praca jest napisana poprawnym językiem polskim, z ogromną starannością o przejrzystość przekazu, dobrze zilustrowana i bardzo starannie zredagowana. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki badań symulacyjnych zostały potwierdzone w badaniach eksperymentalnych, a więc rozprawa obejmuje pełny cykl badawczy – od analiz teoretycznych, poprzez badania symulacyjne, do eksperymentu laboratoryjnego.

#### 4. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Gierczyńskiego jest ciekawa i wartościowa, odnosi się do problemów aktualnych w sterowaniu przekształtnikami energoelektronicznymi, a w szczególności tak nietypowymi jak izolowane przekształtniki DC/DC o topologii podwójnego mostka aktywnego DAB. Autor przedstawił obszerną analizę problemu modelowania takiego przekształtnika, a w szczególności sposobu doboru nastaw



regulatorów PI w strukturze sterowania z modulacją typu SPS. Większość rozważań teoretycznych została zweryfikowana w badaniach eksperymentalnych.

Mgr inż. Michał Gierczyński wykazał się dużym zasobem wiedzy z zakresu energoelektroniki i teorii sterowania, jak również technik informatycznych, które umożliwiły mu wykonanie szczegółowych analiz teoretycznych i badań symulacyjnych jak również realizację praktyczną prototypu przekształtnika DAB i jego układu sterowania z wykorzystaniem mikrokontrolera TMS320F28379D.

Rozprawa zawiera samodzielne rozwiązanie problemu naukowego, stanowiąc tym samym wkład naukowy Autora w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*, a w szczególności do zagadnień projektowania i sterowania przekształtnikami DC/DC o topologii DAB. Potwierdza ona umiejętności Doktoranta w rozwiązywaniu złożonych problemów naukowych i technicznych. Zakres i poziom ocenianej rozprawy upoważniają mnie do stwierdzenia, że spełnia ona w pełni wymagania stawiane przez obowiązującą *Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym*. Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Teresa Ostrowska-Kocalska*