Gliwice, 10.10.2024

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Rymarski
Katedra Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 16
[redacted]

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Bałkowca
„Jednokierunkowy obniżająco-podwyższający przekształtnik napięcia AC/DC o zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego zasilany z trójfazowego czteroprzewodowego źródła napięcia"

przygotowana dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektroniki, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

Wybór tematu i cel pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Tomasza Bałkowca w 5 rozdziałach (i dwóch załącznikach) na 150 stronach przedstawia problematykę jednokierunkowego obniżająco-podwyższającego przekształtnika napięcia AC/DC o zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego, zasilanego z czteroprzewodowego trójfazowego źródła napięcia połączeniem (czteroprzewodowe podłączenie źródła napięcia ułatwia dodatkowo dalszą analizę z wykorzystaniem układu pojedynczej fazy, Rys. 2.3). W pracy zacytowano 110 pozycji literaturowych, w tym 5 własnych (4 artykuły i opis patentowy [67] oznaczony numerem zgłoszenia zamiast patentu). Autor jest współtwórcą patentu PL 228952 [67] udzielonego 30.05.2018, dotyczącego właśnie modyfikacji prostownika Vienna opisanego w patencie [53] z 1994. Modyfikacja ta polega na zmianie dwóch diod na dwa tyrystory, które umożliwiają pracę prostownika Vienna w trybie obniżającym napięcie, a nie tylko podwyższającym napięcie jak w pierwotnym rozwiązaniu. Autor przedstawił analizę pracy prostownika obniżająco-podwyższającego napięcie (zgodnego ze swoim patentem PL 228952), opracował po 2 układy sterowania w obu trybach pracy, przeprowadził badania symulacyjne (także dla przeciążeń i zwarć po stronie stałoprądowej). Ostatecznie wykonał sterowany mikroprocesorowo fizyczny model badanego przekształtnika i zweryfikował eksperymentalnie wcześniejsze badania zarówno dla trybu obniżającego jak i podwyższającego napięcie. Tematyka pracy jest ważna i aktualna, ponieważ dotyczy przekształtników stosowanych w mikrosieciach prądu stałego (wykorzystywanych przy integracji odnawialnych źródeł energii oraz systemów magazynowania energii) oraz stacjach ładowania pojazdów elektrycznych, gdzie napięcia na akumulatorach są obecnie od 350 do 800 V. Innym ciekawym zastosowaniem jest przetwarzanie napięcia zmiennego 15 kV na napięcie stałe 3 kV stosowane w sieciach trakcyjnych kolei w Polsce, co opisano w niecytowanej w rozprawie własnej publikacji T.

Bałkowiec, W. Koczara „Three-Phase Rectifier Dedicated to DC Traction Substation" Przegląd Elektrotechniczny R.93 NR 9/2017, doi:10.15199/48.2017.09.08.

Celem autora było udowodnienie tezy, że *możliwa jest regulacja napięcia wyjściowego w trybie obniżania i podwyższania napięcia, przy zastosowaniu zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego w jednokierunkowym przekształtniku napięcia AC/DC zasilanym z trójfazowego, czteroprzewodowego źródła napięcia.* Zaproponowana przez Autora modyfikacja topologii standardowego łącznika z prostownika Vienna umożliwia pominięcie dodatkowego przetwornika DC/DC w układzie podwyższająco-obniżającym wyjściowe napięcie stałe. W celu udowodnienia tej tezy przeprowadzono analizę pracy przekształtnika AC/DC obniżająco-podwyższającego napięcie, analizę strategii kształtowania prądów fazowych w warunkach asymetrycznego obciążenia po stronie stałoprądowej, opracowano struktury układów sterowania przekształtnikiem i ich zaimplementowano je zarówno w układzie symulacyjnym jak i zbudowanym przez Autora eksperymentalnym modelu. Tezę wykazano zarówno na podstawie badań symulacyjnych jak i eksperymentalnych.

Podsumowując podstawowym celem pracy było opracowanie układu przetwornika AC/DC w oparciu o własny patent Autora PL 228952 umożliwiającego zarówno podwyższanie (to już było w podstawowym mostku Vienna) jak i obniżanie napięcia DC (tego dotyczyło rozwiązanie patentowe).

Doktorant nie wspomina w pracy, że wcześniejsze prace jak: Tomasz Bałkowiec, Włodzimierz Koczara, Three-Phase Rectifier Dedicated to DC Traction Substation, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93 NR 9/2017, doi:10.15199/48.2017.09.08 powiązane tematycznie z rozprawą doktorską sfinansowane były w 50% z grantu Narodowego Centrum Nauki DEC-2013/11/B/ST8/04420 „Teoria wytwarzania energii elektrycznej z generatorami o regulowanej prędkości" oraz w 50% z Grantu Dziekańskiego "Układy wielofazowych prostowników trakcyjnych" nr 504/02743/1044. Czyli tematyka pracy (wykorzystanie przetwornika opisanego w patencie PL 228952) miała wcześniejsze pozytywne opinie z NCN i możliwości ciekawych zastosowań.

Doktorant opublikował 16 artykułów z zakresu energoelektroniki z lat 2015-2023 ujętych (02.10.2024) w renomowanej bazie Web of Science, z których w 3 jest pierwszym autorem, 5 artykułów jest w czasopismach, pozostałe 11 w materiałach konferencji międzynarodowych. Doktorant ma w bazie WoS: 11 cytowań, w tym 9 obcych, indeks h=2. W bazie Scopus jest 19 publikacji Autora, w 5 jest pierwszym autorem, 7 artykułów jest w czasopismach, 12 w materiałach konferencyjnych, 26 cytowań, indeks h=2.

Zatem wyniki pracy Doktoranta w zakresie układów energoelektronicznych były już wcześniej oceniane przez niezależnych recenzentów i uzyskały ich uznanie, a jego parametry bibliometryczne są dobre jak dla Doktoranta.

Omówienie rozprawy doktorskiej

Rozdział 1 pracy, to typowe wprowadzenie określające zakres zastosowań prostownika Vienna podwyższających napięcie [53] w mikrosieciach prądu stałego i stacjach ładowania pojazdów elektrycznych. Autor przedstawia dynamiczny wzrost publikacji dotyczących prostownika Vienna w bazie IEEEXplore (Rys. 1.2) jako dowód jego rosnącej popularności. Przedstawiono dwa typy sieci dystrybucyjnych prądu stałego – unipolarną i bipolarną. Omówiono 4 topologie jednokierunkowych prostowników trójfazowych podwyższających

napięcie z podstawowym łącznikiem prostownika Vienna typu 4D-1T (mostek 4 diod z jednym tranzystorem na przekątnej). Na końcu rozdziału przedstawiono cel pracy, którym jest udowodnienie tezy pracy o możliwości regulacji napięcia wyjściowego zarówno w trybie podwyższania jak i obniżania napięcia w jednokierunkowym przekształtniku napięcia AC/DC, poprzez modyfikację topologii standardowego łącznika 4D-1T z prostownika Vienna (modyfikację opisano w patencie PL 228952). Autor przedstawia także zakres prac badawczych od opracowania topologii przekształtnika, poprzez analizę strategii kształtowania prądów fazowych umożliwiających symetryzację napięć wyjściowych DC, opracowanie układów sterowania, symulację proponowanych układów i eksperymentalną weryfikację. Przedstawiona w Rozdziale 1 struktura pracy pokrywa się z zakresem planowanych prac.

Rozdział 2 przedstawia modyfikację standardowego łącznika 4D-1T przeznaczonego do pracy z podwyższaniem napięcia stałego do topologii 2TH-2D-1T umożliwiającej realizację zarówno podwyższania jak i obniżania napięcia stałego na wyjściu przetwornika AC/DC. Autor zasila przedstawiane w rozprawie topologie z trójfazowego źródła napięcia z czteroprzewodowym połączeniem. Umożliwia mu to prostą analizę pojedynczej fazy przekształtnika (Rys. 2.3). W Rozdziale 2 przedstawiono zasadę pracy przekształtnika obniżająco-podwyższającego z łącznikami 2TH-2D-1T oraz przebiegi prądów i napięć dla obu trybów pracy przekształtnika. Przedstawiona w tym rozdziale analiza zasady działania przekształtnika umożliwiła opracowanie układów sterowania.

Rozdział 3 przedstawia opisy sterowania przekształtnikiem AC/DC w obu trybach pracy. W Rozdziale 3.2 przedstawiono sterowanie w trybie obniżającym napięcie DC, którego celem jest uzyskanie dwóch niezależnie regulowanych napięć DC na kondensatorach u_{DC1} i u_{DC2} oraz zapewnienie kontroli prądów fazowych. Do układu regulatora wprowadzane są napięcia na kondensatorach i prądy fazowe. Dla dodatnich prądów fazowych energia jest dostarczana do kondensatora C_1, dla ujemnych do kondensatora C_2. Stąd Autor stosuje dwa odrębne regulatory. Autor przedstawił schematy blokowe dwóch wersji sterowań USTPON1 i USTPON2 o odmiennych regulatorach prądów. W pierwszym z nich sumy dodatnich lub ujemnych impulsowych prądowych są uśredniane w filtrze średniej ruchomej (Moving Average Filter – MAF – filtrze odpowiednim do filtrowania szumu z sygnału wolno zmieniającego się) i sterują poprzez regulatory R i sterownik załączeń tyrystorów FAC (z dołączonym układem synchronizacji fazy z napięciami fazowym PLL) kątami załączenia 6 tyrystorów. W drugim przypadku każdy prąd fazowy po uśrednieniu osobno steruje poprzez regulatory R (dla każdego dodatniego i ujemnego prądu fazowego) oraz blok FAC tymi kątami. Dla obu tych sterowań USTPON1 i USTPON2 Doktorant w symulacjach mierzy czas regulacji T_{set} (czas dojścia to stanu ustalonego) po wystąpieniu różnego typu zaburzeń (np. skokowej zmianie rezystancji obciążenia) lub po skokowej zmianie wartości zadanych itp. Celem układu sterowania jest uzyskanie dwóch niezależnie regulowanych napięć wyjściowych i kontrola prądów fazowych. Oba regulatory zależnie od typu zaburzenia dają podobne lub nieco różniące się wyniki regulacji. Jednak nigdzie nie przedstawiono budowy samych regulatorów R_U i R_I. Są to zapewne proste regulatory PI, tak jak w cytowanych pozycjach literaturowych, ale od ich parametrów zależy dynamika całego układu. W Rozdziale 3.3 przedstawiono przypadek regulacji napięć wyjściowych w układzie podwyższającym napięcie, gdzie steruje się załączeniem 3 tranzystorów w klasycznym układzie z łącznikami Vienna. W dwóch regulatorach USTPPN1 i USTPPN2 realizowane są dwie odmienne strategie kształtowania

prądu fazowego źródła – zmiany jego wartości w dwóch połówkach okresu sieci – sumowania składowej stałej ze składową zmienną prądu (algorytm opisywany w literaturze [86] jako „DC-Link Voltage Balancing Algorithm") lub wprowadzenia asymetrii wartości szczytowych (strategia ta jest przedstawiana w literaturze, np. [61]) (Rys. 3.16). Regulacja prądów fazowych wykonywana jest po ich transformacji Parka do układu wirującego (*dqz*). W obu regulatorach mierzy się różnicę obu wyjściowych napięć DC na kondensatorach oraz ich sumę. Na podstawie błędów tych dwóch wartości wyznacza się wartości odniesienia prądów w układzie wirującym. Na wyjściu regulatorów w układzie *dqz* zastosowano układy odwrotnej transformacji Parka i układy modulacji szerokości impulsów PWM. W regulatorze USTPPN2 istnieje blok DC/dqz przetwarzania prądów odniesienia wynikających z błędu sumy i różnicy napięć DC na prądy odniesienia prądów fazowych w układzie *dqz*. Wyliczenia tych współczynników przedstawiono w dodatku A. Podobnie jak w przypadku przetwornika AC/DC obniżającego napięcie, w przypadku przetwornika podwyższającego napięcie wykonano badania symulacyjne dla różnego typu zaburzeń uzyskując zbliżone wyniki dla obu typów sterowania USTPPN1 i USTPPN2. Podobnie jak dla przetwornicy obniżającej napięcie nie przedstawiono budowy regulatorów R (zapewne PI, jak w większości przytaczanych pozycji literaturowych). Na schemacie sterowania Rys. 3.17 i Rys. 3.18 pominięto sterowanie tyrystorami, które mają pracować jak diody w trybie pracy podwyższania napięcia. Być może doktorant uznał to za trywialne. W Rozdziale 3.4 przedstawiono sterowanie przetwornikiem opatentowanym przez Doktoranta, w warunkach przeciążeń i zwarć po stronie stałoprądowej. Dodatkowe tyrystory wprowadzone przez Doktoranta do łączników Vienna można wykorzystać do wyłączenia układu przetwornika podwyższającego napięcie w stanie zwarcia lub przeciążenia do odłączenia obwodu wyjściowego od źródła napięcia przemiennego. Doktorant analizuje pracę wyzwalaczy przeciążeniowych (działających na zasadzie przekroczenia dopuszczalnej wartości zmodyfikowanej całki Joula) i zwarciowych. Przeprowadzono badania symulacyjne skokowej zmiany obciążeń DC, przy których dla określonego progu prądu następuje w przetwornicy MVR zablokowanie sygnałów bramkowych tyrystorów oraz tranzystorów – przypadek testowy PT5USTPPN działania zabezpieczenia przeciążeniowego dla przetwornicy podwyższającej napięcie lub przypadek testowy aktywacji zabezpieczenia zwarciowego PT6USTPPN także dla przetwornicy podwyższającej napięcie.

W Rozdziale 6 przedstawiono badania modelu eksperymentalnego w celu weryfikacji wcześniejszych rozważań teoretycznych i symulacji. W modelu zmodyfikowanej przez Autora przetwornicy Vienna z łącznikami 2TH-2D-1T zastosowano dodatkowe tranzystory w obciążeniu DC umożliwiające zmianę mocy obciążenia (włączenie lub wyłączenie rezystorów). Sterowanie (algorytmy sterowania) zrealizowano na mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28335. Wejściowe napięcie skuteczne każdej z faz było równe 60 V. Przeprowadzono badania dla zmiany obu napięć odniesienia DC od 0 do 60 V oraz asymetrycznej zmiany jednego napięcia odniesienia od 0 do 60 V, a drugiego od 0 do 30V, dla obu sterowań dla trybu obniżania napięcia. Pokazano także przypadek skokowej zmiany rezystorów obciążenia oraz przerwy w zasilaniu jednej z faz. Analogiczne pomiary testowe (dla innych rezystancji obciążenia, bo napięcia wyjściowe DC wzrosły do 350 V) wykonano dla przekształtnika podwyższającego napięcie oraz dodatkowo przeprowadzono test pracy przekształtnika w warunkach przeciążenia, co potwierdziło w praktyce możliwość wykorzystania tyrystorów w układzie podwyższającym napięcie jako elementu

zabezpieczającego (w tym trybie są one standardowo załączone przez całe okresy zasilania). Doktorant dla obu sterowań układem podwyższającym napięcie (z sumowaniem składowej stałej z prądem zmiennym lub różnymi wartościami maksymalnymi prądu w obu półokresach sieci) porównywał rozkład harmonicznych dla różnych przypadków testowych wysnuwając wniosek, że możliwy jest pobór prądu fazowego o niskim współczynniku zawartości harmonicznych dla symetrycznych obciążeń po stronie stałoprądowej. Natomiast w przypadku asymetrycznych napięć DC lub asymetrycznych obciążeń współczynniki THD prądów fazowych wzrastają. Zarówno w symulacjach jak i badaniach eksperymentalnych występują pewne różnice w rozkładzie harmonicznych dla obu sterowań.

Rozdział 5 to podsumowanie. Autor stwierdza, że w rozprawie udowodnił swoją tezę, że *„możliwa jest regulacja napięcia wyjściowego w trybie obniżania i podwyższania napięcia, przy zastosowaniu zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego w jednokierunkowym przekształtniku napięcia AC/DC zasilanego z trójfazowego, czteroprzewodowego źródła napięcia*". Układ obniżający napięcie jest oparty na jego współautorskim patencie PL 228952. Do tego układu Doktorant opracował 2 rodzaje sterowania, które umożliwiają niezależną regulację obu wyjściowych napięć DC. Autor w jednym sterowaniu w trybie obniżania napięcia bierze pod uwagę wartości średnie prądów każdej z faz, w drugim wartość średnią z sumy trzech prądów fazowych. Według Doktoranta korzystniejsze jest rozwiązanie z niezależną regulacją wartości średnich prądów fazowych ze względu na równomierne obciążenie faz w wyniku sterowania. W trybie podwyższającym napięcie także przedstawiono dwie wersje sterowania z odmiennym kształtowaniem prądu fazowego. W pierwszej wersji kształtowano prąd fazowy jako składową zmienną sumowaną ze składową stałą, co znane jest z literatury. W drugim rodzaju sterowania ustawiane są odmienne wartości maksymalne napięcia w obu połówkach okresu napięcia sieci. W sterowaniu podwyższającym napięcie Autor zastosował odmienne niż prezentowane w literaturze podejście generując wartości zadane dla poszczególnych składowych prądu w układzie wirującym *dqz*. Oba układy sterowania w rozprawie dają podobny rezultat. Dla asymetrycznych napięć wyjściowych DC lub dla asymetrycznych obciążeń, w prądach fazowych pojawia się składowa stała, a według cytowanych norm pobór z sieci elektroenergetycznej prądu fazowego ze składową stałą jest niedopuszczalny. Dzięki dodatkowym tyrystorom (patent Autora) w łączniku mostka Vienna istnieje możliwość wyłączenia układu w warunkach przeciążeń lub zwarć. W podsumowaniu brakuje przedstawienia planów dalszego rozwoju prac nad przekształtnikami AC/DC ze zmodyfikowanymi łącznikami wg patentu Autora.

Do najważniejszych osiągnięć własnych autora należą:

1. Modyfikacja łącznika ze standardowego rozwiązania prostownika Vienna 4D-1T do 2TH-2D-1T (wprowadzenie dwóch tyrystorów zamiast dwóch diod) ujęta we współautorskim patencie PL 228952 [67] udzielonym 30.05.2018. Modyfikacja ta umożliwia realizację trójfazowego jednokierunkowego przekształtnika AC/DC obniżająco-podwyższającego napięcie w trybie obniżania napięcia.

2. Opracowanie układów sterowania jednokierunkowym przekształtnikiem obniżająco-podwyższającym napięcie (dla opatentowanego układu umożliwiającego obniżanie napięcia), które niezależnie regulują dwa wyjściowe napięcia stałe (mogą być asymetryczne) również w przypadku asymetrii prądów obciążenia.

3. Analiza teoretyczna (na podstawie analizy harmonicznych prądów fazowych) strategii kształtowania prądu fazowego przez przekształtnik podwyższający napięcie w warunkach asymetrii napięć wyjściowych DC lub asymetrii rezystancji obciążenia (sumarycznie: mocy obciążeń po stronie stałoprądowej).

4. Opracowanie układu sterowania realizującego strategię kształtowania prądu fazowego o asymetrycznych przebiegach w kolejnych półokresach (sumowanie ze składową stałą albo regulacja asymetrycznych wartości szczytowych w dwóch półokresach sieci) w układzie współrzędnych wirujących *dqz* dla przetwornicy podwyższającej napięcie.

5. Opracowanie układu sterowania jednokierunkowym obniżająco-podwyższającym przekształtnikiem napięcia w trybie podwyższania napięcia, w warunkach przeciążeń oraz zwarć po stronie stałoprądowej, w oparciu o wykorzystanie nadmiarowych w tej strukturze tyrystorów, do odcięcia przepływu prądu.

6. Opracowanie modeli symulacyjnych przekształtnika z opisanymi sterowaniami w celu wstępnej weryfikacji proponowanych układów sterowania.

7. Budowa i oprogramowanie mikroprocesorowo sterowanego eksperymentalnego modelu przekształtnika AC/DC w celu weryfikacji wcześniejszej analizy teoretycznej i badań symulacyjnych dla zaproponowanej przez Autora architektury przekształtnika i układów sterowania.

Podsumowując, temat pracy jest zgodny z jej zwartością, cel pracy jest istotny i przekłada się na praktyczne zastosowania, a niewątpliwą zaletą pracy jest oparcie jej na własnym patencie i oryginalnych rozwiązaniach Autora.

Ocena pracy doktorskiej w odniesieniu do kwestii wpisanych do zaleceń dla recenzentów rozpraw doktorskich dla Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

1. *Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?*

Tematyka pracy jest ważna i aktualna, ponieważ dotyczy przekształtników stosowanych w mikrosieciach prądu stałego (wykorzystywanych przy integracji odnawialnych źródeł energii oraz systemów magazynowania energii) oraz stacjach ładowania pojazdów elektrycznych. Doktorant zaprojektował układy sterowania do własnej, opatentowanej modyfikacji mostka Vienna (zmodyfikował łączniki) i do standardowego mostka Vienna.

Doktorant przedstawił następującą tezę:

"*Możliwa jest regulacja napięcia wyjściowego w trybie obniżania i podwyższania napięcia, przy zastosowaniu zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego w jednokierunkowym przekształtniku napięcia AC/DC zasilanego z trójfazowego, czteroprzewodowego źródła napięcia*".

Wskazanym celem pracy doktorskiej była weryfikacja tezy, opracowanie odmiennych sterowań dla przekształtnika AC/DC obniżającego i podwyższającego napięcie, sprawdzenie pracy przetwornicy dla asymetrycznych napięć wyjściowych DC i asymetrycznych rezystancji obciążenia, sprawdzenie przydatności dodatkowych tyrystorów w układzie podwyższającym napięcie w warunkach przeciążenia lub zwarcia (Autor to nazywa dodatkową

funkcjonalnością). Przeprowadzono badania symulacyjne i weryfikację eksperymentalną z wykorzystaniem sterowanego mikroprocesorowo modelu.

Zarówno teza jak i cel pracy doktorskiej zostały jasno wskazane.

2. *Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?*

Moim zdaniem Doktorant przeprowadził we właściwy sposób analizę literatury światowej, głównie z bazy IEEEXplore, wykorzystując renomowane publikacje z serii IEEE Transactions. Doktorant cytował 4 własne publikacje i opis własnego patentu, z własnych 16 publikacji z bazy WoS. Natomiast Bibliografia jest moim zdaniem niestarannie opracowana pod względem edytorskim. Nawet cytując własny patent [67] Doktorant podał numer i datę zgłoszenia patentowego, a nie numer patentu i jego 2 lata późniejszą datę jego ogłoszenia. Podobnie własne cytowanie [107] jest błędnie wpisane. Ciekawe, że Autor nie cytował własnego artykułu T. Bałkowiec, W. Koczara „Three-Phase Rectifier Dedicated to DC Traction Substation" Przegląd Elektrotechniczny R.93 NR 9/2017, doi:10.15199/48.2017.09.08, przedstawiającego ciekawe zastosowanie opatentowanego przetwornika dla trakcji kolejowej.

Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Doktorant wykonał obliczenia teoretyczne, symulacje w programie MATLAB (nie udostępniając jednak schematów symulacyjnych z programu MATLAB/Simulink) i nie przedstawiając budowy regulatorów (zapewne typu PI), a ostatecznie wykonał weryfikację symulacji na własnoręcznie zbudowanym modelu eksperymentalnym sterowanym mikroprocesorowo. Brak jest jednak opisu oprogramowania (nawet blokowego) tego mikroprocesora.

Uzyskane wyniki prac wykazały prawdziwość tezy i osiągnięcie przez doktoranta wymienionych już wcześniej celów: sprawdzenie pracy przetwornicy dla asymetrycznych napięć wyjściowych DC i asymetrycznych rezystancji obciążenia, sprawdzenie przydatności dodatkowych tyrystorów w układzie podwyższającym napięcie w warunkach przeciążenia lub zwarcia.

3. *Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?*

Doktorant przedstawił rozprawę, gdzie zamieścił projekt sterowania dla przekształtnika zarówno standardowego jak i zgodnego z własnym patentem PL 228952, co gwarantuje jej samodzielność i oryginalność. Do najważniejszych osiągnięć własnych autora należą:

3.1. Modyfikacja łącznika ze standardowego rozwiązania prostownika Vienna 4D-1T do 2TH-2D-1T (wprowadzenie dwóch tyrystorów zamiast dwóch diod) ujęta we współautorskim patencie PL 228952 [67] udzielonym 30.05.2018, która umożliwia realizację trójfazowego jednokierunkowego przekształtnika AC/DC obniżająco-podwyższającego napięcie.

3.2. Opracowanie układów sterowania jednokierunkowym przekształtnikiem AC/DC obniżająco-podwyższającym napięcie (dla układu standardowego i dla opatentowanego układu umożliwiającego obniżanie napięcia), które niezależnie regulują dwa wyjściowe napięcia stałe (mogą być asymetryczne) również w przypadku asymetrii prądów obciążenia.

3.3. Analiza teoretyczna (na podstawie analizy harmonicznych prądów fazowych) strategii kształtowania prądu fazowego przez przekształtnik AC/DC podwyższający napięcie w

warunkach asymetrii napięć wyjściowych DC lub asymetrii rezystancji obciążenia (sumarycznie: mocy obciążeń po stronie stałoprądowej).

3.4. Opracowanie układu sterowania realizującego strategię kształtowania prądu fazowego o asymetrycznych przebiegach w kolejnych półokresach (sumowanie ze składową stałą albo asymetryczne wartości szczytowe w dwóch półokresach sieci) w układzie współrzędnych wirujących *dqz* dla przetwornicy podwyższającej napięcie (w cytowanej literaturze wykorzystywano układ *abc*).

3.5. Opracowanie układu sterowania jednokierunkowym obniżająco-podwyższającym przekształtnikiem napięcia AC/DC w trybie podwyższania napięcia w warunkach przeciążeń oraz zwarć po stronie stałoprądowej, w oparciu o wykorzystanie nadmiarowych w tej strukturze tyrystorów do odcięcia przepływu prądu.

3.6. Opracowanie modeli symulacyjnych przetwornika ze sterowaniami w celu wstępnej weryfikacji proponowanych układów sterowania (w rozprawie przedstawiono schematy blokowe sterowania i wyniki symulacji).

3.7. Budowa i oprogramowanie mikroprocesorowo sterowanego eksperymentalnego modelu przekształtnika AC/DC w celu weryfikacji wcześniejszej analizy teoretycznej i badań symulacyjnych dla zaproponowanej przez Autora architektury przekształtnika i układów sterowania.

Na podstawie wskazanych osiągnięć Autora mogę stwierdzić, że rozprawa wnosi nowe wartości do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanego przez literaturę światową.

4. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

1. Autor przekonująco posłużył się wynikami symulacji i badaniami modelu eksperymentalnego z 4 typami sterowania (po 2 na obniżanie i podwyższanie napięcia). Rozprawa jest zwięźle napisana, z logiczną kolejnością zawartości – teoria – symulacje – badania modelu eksperymentalnego, poprawnie redakcyjnie. Pewnym brakiem jest brak opisu zastosowanych regulatorów. W zasadzie opis dynamiki układu (według nomenklatury Autora: określenie „czasu regulacji") bez przedstawienia regulatora jest niepełne. Edycyjnie praca jest poprawna oprócz Bibliografii, gdzie błędy dotyczą nawet autocytowań Autora. W rozprawie brak informacji o stosowanym oprogramowaniu i jego wersji. Wspomniano jedynie ogólnie o wykorzystaniu programu MATLAB.

5. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Tematyka pracy jest ważna i aktualna, ponieważ dotyczy przekształtników stosowanych w mikrosieciach prądu stałego (wykorzystywanych przy integracji odnawialnych źródeł energii oraz systemów magazynowania energii) oraz stacjach ładowania pojazdów elektrycznych. Innym ciekawym zastosowaniem jest przetwarzanie napięcia zmiennego 15 kV na napięcie stałe 3 kV stosowane w sieciach trakcyjnych kolei w Polsce, co opisano w publikacji Autora: T. Bałkowiec, W. Koczara „Three-Phase Rectifier Dedicated to DC Traction Substation" Przegląd Elektrotechniczny R.93 NR 9/2017, doi:10.15199/48.2017.09.08

Uwagi szczegółowe

1. Układ pracy doktorskiej jest prawidłowy. Pięć rozdziałów (piąty, to podsumowanie) zostało logicznie ułożonych. W pracy są także dwa załączniki z obliczeniami. Jakość edycji pracy jest dobra (z wyjątkiem Bibliografii) – 110 pozycji. Pomijając błędy edycyjne

Bibliografia jest odpowiednia, lecz przy omawianiu współpracy przetwornika z siecią elektroenergetyczną może warto było odnieść się do odpowiednich europejskich norm, a np. pierwszą pozycją literaturową jest bardzo popularna amerykańska norma IEEE-519, potem europejskie normy dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej, w tym limitów harmonicznych prądu (Autor analizuje harmoniczne prądów fazowych). A może np. trzeba było dodatkowo nawiązać do normy EN 50160 dotyczącej parametrów napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, np. przy omawianiu rezultatów braku prądu jednej fazy.

2. W rozprawie przedstawiając sterowania, zupełnie pominięto budowę i parametry regulatorów. Przy omawianiu dynamiki sterowanych układów jest to niezrozumiałe. Uzasadnienie stosowania filtrów „moving average" jest także bardzo skrótowe (bez odpowiedniego odniesienia).

3. Kwestią dyskusyjną jest brak przedstawiania schematów symulacyjnych z wykorzystywanego programu MATLAB/Simulink. Obecnie mając schematy symulacyjne i odpowiednie oprogramowanie (np. dSpace) oraz sprzęt z nim współpracujący typu Real Time Interface (np. MicroLabBox RTI1202) można zamiast tworzenia oprogramowania na mikroprocesor wykorzystać te schematy i sterować z oprogramowania MATLAB/Simulink/dSpace fizycznym urządzeniem eksperymentalnym. Taka szybka metoda weryfikacji jest np. wykorzystywana w Aalborg University w zespole prof. F. Blaajerga.

4. Doktorant słusznie uważa, że oprogramowanie systemu mikroprocesorowego do sterowania modelem laboratoryjnym przetwornicy jest jego osiągnięciem. Ale w rozprawie brak nawet schematu blokowego tego programu.

5. W rozprawie brak informacji o stosowanym oprogramowaniu i jego wersjach. Wspomniano jedynie o wykorzystaniu programu MATLAB/Simulink.

6. W podsumowaniu brakuje przedstawienia planów dalszego rozwoju prac nad przekształtnikami AC/DC ze zmodyfikowanymi łącznikami wg patentu autora.

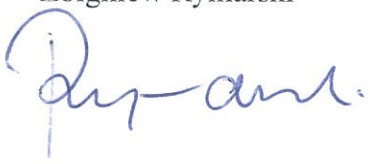
Podsumowanie oceny pracy doktorskiej

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Tomasza Bałkowca *„Jednokierunkowy obniżająco-podwyższający przekształtnik napięcia AC/DC o zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego zasilany z trójfazowego czteroprzewodowego źródła napięcia"* zawiera oryginalne wyniki, a Doktorant wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami w zakresie przekształtników AC/DC obniżająco-podwyższających napięcie. Doktorant opracował 4 typy sterowania dla tych przekształtników, symulował pracę przekształtników z tymi sterowaniami i implementował je do modelu laboratoryjnego sterowanego mikroprocesorowo. Doktorant przeanalizował wyniki pracy przekształtników dla asymetrycznych napięć wyjściowych DC, asymetrycznych obciążeń, skokowych zmian napięć odniesienia i rezystancji obciążenia. Cały rozdział poświęcono pracy przekształtnika podwyższającego napięcie dla warunków przeciążenia i zwarcia na wyjściu wskazując na dodatkową rolę tyrystorów wprowadzonych przez Doktoranta do standardowego łącznika prostownika Vienna (patent Doktoranta). Doktorant udowodnił postawioną na początku rozprawy tezę. Należy podkreślić właściwe, kompleksowe podejście do rozwiązania postawionego problemu – stworzenie teorii, symulacja rozwiązania potwierdzająca rozważania teoretyczne, na końcu badania modelu laboratoryjnego.

Przedstawione wcześniej uwagi dotyczą głównie edycji i nie wpływają na wysoką merytoryczną jakość pracy. Szczególnie doceniam rozwijanie wykorzystania własnego patentu. Pracę oceniam zgodnie ze skalą ocen Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, jako „spełniającą wymagania z wyraźnym nadmiarem".

Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Bałkowca *„Jednokierunkowy obniżająco-podwyższający przekształtnik napięcia AC/DC o zmodyfikowanej topologii łącznika dwukierunkowego zasilany z trójfazowego czteroprzewodowego źródła napięcia"* stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) w związku z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1669) oraz art. 5 ust. 3. tej ustawy.

Stawiam wniosek do **Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej** o dopuszczenie Pana mgr. inż. Tomasza Bałkowca do publicznej obrony rozprawy doktorskiej w dyscyplinie naukowej **Elektrotechnika** (przewód doktorski był wszczęty przed 30.04.2019) odpowiadającej dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, **dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne** wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11 października 2022 roku w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. pozycja 2022, 27 październik 2022) r.

Zbigniew Rymarski