


Gliwice, 29.04.2022

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Rymarski
Katedra Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 16
e-mail: zrymarski@polsl.pl


tel. 32 2371950

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Jakuba Majtczaka
„Topologie i metody sterowania falownika prądu z obwodem impedancyjnym”.

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

Wybór tematu i cel pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Piotra Majtczaka w 7 rozdziałach (rozdział 7, to dodatki) na 230 stronach przedstawia problematykę pracy quasi-impedancyjnych falowników prądu typu FPzOI (wprowadzona przez Autora nazwa falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym typu Current Fed qZSI) lub zmodyfikowanych falowników prądu FPzMOI z dwoma obwodami quasi-impedancyjnymi połączonymi w szereg, w trybie falownikowym na sieć elektryczną niskiego napięcia lub w trybie prostownikowym na obciążenie rezystancyjne. Autor postawił tezę, że **możliwe jest sterowanie mocą sieciowego falownika z obwodem quasi-impedancyjnym przy dużej częstotliwości przełączeń tranzystorów** (jako dużą częstotliwość przyjął 100 kHz dla trybu falownikowego i 250 kHz dla trybu prostownikowego) **oraz zachowaniu wysokiej jakości przekształcanej energii**. Natomiast **celem rozprawy jest opracowanie metod sterowania falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym pracującym przy wysokiej częstotliwości przełączeń tranzystorów**. Autor stworzył modele matematyczne i symulacyjne falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym, wykazując, że zmodyfikowaną strukturę FPzMOI (falownik prądu ze zmodyfikowanym obwodem quasi-impedancyjnym) można przy modelowaniu sprowadzić do podstawowej struktury FPzOI, przeprowadził analizę małosygnałową uzyskanego modelu matematycznego (opartego na metodzie uśrednionej przestrzeni stanów), opracował i zaprojektował algorytmy wielopętlowego, wielowejściowego sterowania. Mgr inż. Piotr Majtczak sprawdził wstępne rozważania teoretyczne i symulacje na modelach

eksperymentalnych quasi-impedancyjnych falowników prądu w trybie pracy falownikowej na sieć elektryczną niskiego napięcia lub jako falownik niezależny z obciążeniem rezystancyjnym oraz w trybie pracy prostownikowej z obciążeniem rezystancyjnym. W sumie należy podkreślić, że praca zawiera zarówno badania teoretyczne, symulację komputerową oraz weryfikację eksperymentalną. Prowadzone prace były współfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu UMO-2015/19/B/ST7/00620 pt. „Badania przekształtników energoelektronicznych z obwodem impedancyjnym wykorzystujących przyrządy mocy z węgla krzemu”.

Podsumowując, temat pracy jest zgodny z jej zawartością, a cel pracy jest istotny i przekłada się na praktyczne zastosowania.

Podkreślono i wytluszczone odniesienia do 6 kwestii wpisanych do zaleceń dla recenzentów rozpraw doktorskich dla Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektroniki i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

Przedstawione zagadnienie sterowania falownika prądu ze zmodyfikowanym obwodem quasi-impedancyjnym pracującym przy relatywnie wysokiej częstotliwości przełączania tranzystorów SiC z możliwością pracy zarówno w trybie falownikowym jak i prostownikowym zostało jasno sformułowane i przedstawione w monografii (Ad 1).

Bibliografia pracy obejmuje 152 pozycje od klasycznych najstarszych np. [97] z 1997 (w tym przypadku bardzo słusznie odniesiono się publikacji R. D. Middlebrooka, który jako pierwszy zastosował metodę uśrednionej przestrzeni stanów w zakresie przetworników DC/DC) do najnowszych w chwili pisania monografii np. [144] z 2020. Autor w monografii w tezie pisze o „jakości przekształcanej energii” i warto by to jednak odnieść do istniejących norm, których brakuje w bibliografii.

Ogólnie jednak należy stwierdzić, że przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, głównie z renomowanej bazy IEEEXplore (Ad 2).

Autor ma spore dotychczasowe doświadczenia w zakresie projektowania falowników prądu z tranzystorami SiC. Mgr inż. Piotr Majtczak jest współautorem (2 razy pierwszym autorem) 5 publikacji (od 2016) w bazie Web of Science, w tym 2 w żurnalach (np. tak renomowanym jak IEEE Transactions on Industrial Electronics) i 3 pokonferencyjnych. Publikacje w większości dotyczą problematyki obwodów quasi-impedancyjnych qZ-Source współpracujących z falownikami prądu z wykorzystaniem tranzystorów SiC. Ilość cytowań wynosi 15 (13 obcych), indeks H=3. W bazie Scopus również widocznych jest 5 publikacji jego współautorstwa, ma 18 cytowań i indeks H=3. W rozprawie doktorskiej są cytowane 3 z tych publikacji [29], [35], [41]. Są to dobre parametry bibliometryczne dla młodego doktoranta.

Treść pracy i uwagi ogólne

Określenie „obwód quasi-impedancyjny” używane w monografii dotyczy wersji układu qZ-Source. W monografii wymiennie z tym określeniem jest używane określenie „obwód impedancyjny”, „przekształtnik impedancyjny” lub „sieć impedancyjna” (np. w podpisie Rys. 2).

Rozdział 1, to wstęp omawiający znaczenie trójfazowych falowników napięcia (VSI) o mocy powyżej kilku kilowatów, z dodatkowym przekształtnikiem DC/DC (typu boost) o charakterystyce podwyższającej napięcie oraz falowników prądu (CSI) w systemach przyłączania źródła energii do sieci elektrycznej niskiego napięcia. Układ Z-Source współpracujący z trójfazowym falownikiem napięcia (pierwszy opisany w literaturze obwód impedancyjny) jako przekształtnik DC/DC zaproponował jako pierwszy F.Z. Peng w 2003. Autor przedstawia szeroki zakres zastosowań obwodów impedancyjnych ujętych w również w publikacjach książkowych współautorstwa najbardziej znanych specjalistów z zakresu energoelektroniki jak prof. Frede Blaabjerg. Autor opisuje ogólne własności i ograniczenia sterowania falowników napięcia i prądu.

Na Rys. 2 przedstawiono kilka struktur obwodów impedancyjnych współpracujących z falownikiem trójfazowym. Popełniono drobny błąd edycyjny pisząc „od prawej strony znajduje się źródło prądu lub napięcia”, a to właśnie jest z lewej strony. Autor zwraca uwagę na możliwość dwukierunkowej pracy obwodu impedancyjnego (Rys. 2). Autor omawia struktury impedancyjne o różnej złożoności. Zgodnie z jego sugestiami podstawowa topologia Z-Source miała wadę związaną z nieciągłym przepływem prądu wejściowego, usuniętą w modyfikacji qZ-Source. W innych pracach, jak rozprawa doktorska K. Bernackiego (Politechnika Śląska) „Zagadnienia dynamiki falowników napięcia współpracujących ze źródłami niskiego napięcia stałego”, 2016, wykazano, że wprawdzie złożone topologie obwodów impedancyjnych pozwalają na uzyskanie wyższego współczynnika podwyższenia napięcia („boost factor”), to jednak ich sprawność energetyczna jest zwykle niższa niż podstawowych topologii. Dlatego wydaje się, że nadal bardzo dobrym rozwiązaniem pozostaje układ qZ-Source z ciągłym prądem wejściowym. Autor właśnie skupia się na tej topologii. Autor nie zwrócił uwagi na podstawowe wady obwodów impedancyjnych jak nieuniknione i typowe zniekształcenia napięcia wyjściowego falownika napięcia (przedmiotem monografii są jednak falowniki prądu) dla nieciągłego przepływu prądu przez dławiki sieci impedancyjnej i zniekształceń o częstotliwości 100 Hz spowodowanych zbyt małą pojemnością kondensatorów w obwodzie impedancyjnym (Z. Rymarski, K. Bernacki, „Drawbacks of impedance networks”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2018, vol. 46, issue 3, pp. 612-628, doi: 10.1002/cta.2395). W zakresie pracy Autora podobne zniekształcenia prądów fazowych prawdopodobnie związane z nieciągłością prądu w dławikach obwodu impedancyjnego występują np. na Rys. 98 przy pracy układu FPzOI w trybie falownikowym. Obwody impedancyjne mają także pewien wpływ na charakterystyki częstotliwościowe sterowania falowników napięcia (Z. Rymarski, K. Bernacki, „Influence of Z-Source output impedance on dynamic properties of single-phase voltage source inverters for uninterrupted power supply”, *IET Power Electronics*, 2014, vol. 7, issue 8, pp. 1978-1988, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0722). Autor w dalszym ciągu rozprawy tworzy modele małosygnałowe obwodu impedancyjnego bardzo upraszczając model samego falownika. Autor podkreśla odporność falownika prądu z obwodem impedancyjnym (Rys. 3) na stany zwarcia niezbędne przy podwyższaniu napięcia przez obwód impedancyjny i możliwość stanów otwarcia stosowanych do obniżania wartości średniej napięcia stałego przy pracy falownikowej lub zmianie kierunku i wartości prądu w dławiku wyjściowym przy pracy prostownikowej. Prezentowany w rozprawie obwód quasi-impedancyjny typu qZ-Source

pozwała na podwyższanie lub obniżanie napięcia oraz zmianę kierunku przepływu mocy (praca falownikowa lub prostownikowa). Dotychczasowe publikacje albo nie przedstawiały weryfikacji eksperymentalnej, albo w eksperymentach przedstawiano modele pracujące przy obniżonych napięciach, co nie pozwalało na pracę w sieci. Autor także miał problemy z pracą mostka z tranzystorami SiC przy napięciach międzyfazowych powyżej 250 V i stosował autotransformator trójfazowy podwyższający napięcie. Problemy te związane były z oscylacjami napięcia występującymi przy stosowaniu tranzystorów SiC MOSFET, opisanymi np. w [145] w aspekcie wpływu próbników pomiarowych, ale także w wielu innych publikacjach dotyczących oscylacji w obwodzie sterowania bramki szybkich tranzystorów WBG, np. T. Liu, T. T. Y. Wong and Z. J. Shen, "A Survey on Switching Oscillations in Power Converters," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 1, pp. 893-908, 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2897764.

Przy omawianiu jakości energii poprzez kształt przebiegów chwilowych napięcia/prądu warto odnieść się do odpowiednich norm, na przykład:

IEC 61000-2-2:2003 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 2-2: Środowisko - Poziomy kompatybilności zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości i sygnałów przesyłanych w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia

IEC 61000-3-2 Ed. 5.0 b:2018 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 3-2: Poziomy dopuszczalne -- Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznego prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A)

EN 50160 - Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych).

Dotychczasowe prace na ogół dotyczyły falowników napięcia z obwodami impedancyjnymi, np. analizy kompatybilności elektromagnetycznej falowników napięcia zależnej od schematu modulacji (rozumianego jako algorytm sterowania PWM przełącznikami mostka w celu uzyskania sinusoidalnego napięcia wyjściowego). W zakresie falowników napięcia analizę tą ujęto w publikacji (K. Bernacki, Z. Rymarski, „Electromagnetic compatibility of voltage source inverters for uninterruptible power supply system depending on the pulse-width modulation scheme”, IET Power Electronics, 2015, vol. 8, issue 6, pp. 1026-1034, DOI: 10.1049/iet-pel.2014.0637), natomiast wpływ obwodów impedancyjnych na kompatybilność elektromagnetyczną falowników napięcia przedstawiono w publikacji K. Bernacki, Z. Rymarski, „Electromagnetic compatibility of impedance source inverters”, Elektronika ir Elektrotechnika, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 55-63, doi: 10.5755/j01.eie.23.3.18333.

Autor wykazał na podstawie przeglądu literatury, że istnieją luki w badaniach falowników prądu z obwodem impedancyjnym w zastosowaniach sieciowych, brak jest opisów algorytmów sterowania dla topologii prądowej falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym i brak badań wysoko częstotliwościowych przekształtników impedancyjnych z przełącznikami na bazie elementów WBG. Autor stwierdza, że brak gotowych modeli matematycznych dla falowników prądu z obwodem quasi-impedancyjnym (FPzOI), chociaż wiele jest opracowań podstawowych modeli przetworników qZ-Source (np. Ryszard

Strzelecki, Dmitri Vinnikov „Models of the qZ-Converters”, Przegląd Elektrotechniczny R. 86 NR 6/2010), w tym modeli dynamicznych opartych właśnie na metodzie uśrednionej przestrzeni stanów (Autor ją stosuje w monografii) przedstawionej po raz pierwszy przez R.D. Middlebrooka [97].

Właśnie rozwiązanie tych zagadnień modelowania i sterowania falowników prądu zzmodyfikowanym obwodem quasi-impedancyjnym stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora i jest postępowaniem w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową (AD 4).

Na podstawie przeglądu literatury autor przedstawia rozwój stanu wiedzy w zakresie falowników prądowych z obwodami quasi-impedancyjnymi. Autor stawia następującą tezę:

Możliwe jest sterowanie mocą sieciowego falownika z obwodem quasi-impedancyjnym przy dużej częstotliwości przełączeń tranzystorów oraz zachowaniu wysokiej jakości przekształcanej energii.

Natomiast celem rozprawy jest *opracowanie metod sterowania falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym pracującym przy wysokiej częstotliwości przełączeń tranzystorów.*

Można się zastanawiać w tym miejscu rozprawy, co Autor rozumie jako „dużą częstotliwość przełączeń”. W dalszym ciągu rozprawy autor podaje tę częstotliwość jako 100 - 250 kHz, co rzeczywiście w zakresie pracy falowników o mocy rzędu kilowatów jest relatywnie wysoką częstotliwością, którą umożliwiają niskie straty dynamiczne na przełączanie szybkich tranzystorów WBG i ich niższe straty statyczne ze względu na kilkukrotnie niższą rezystancję ich kanału, niż dla tradycyjnych tranzystorów Si MOSFET. Równocześnie warto zwrócić uwagę, że autorzy nowo opublikowanego artykułu A. R. Karbalaei, M. Mardaneh „The Uplifted Boost Switched-Inductor/Capacitor Quasi Z-Source Inverter, IEEE Industrial Electronics, December 2021, vol. 15, no. 4, pp. 4 – 16, piszą, że

“The impedance source inverter can be called one of the most promising topologies in renewable energy sources ...”.

W rozdziale 2 Autor bardzo szczegółowo (Tab. 1) analizuje stany pracy falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym qZ-Source (Current Fed qZSI). Analiza z Rys. 5 jest zgodna np. z Fig. 5 w [21], a Rys. 6a i 6c z Fig. 6 i 7 w [21]. Podstawowa struktura FPzOI była już analizowana w przytoczonej literaturze, (np. w [21]). Warto zwrócić uwagę na dużą ilość cytowanych publikacji F. Z. Penga, chyba najważniejszego autora w zakresie obwodów impedancyjnych. Rys. 6c przedstawia możliwość przejścia analizowanego obwodu z pracy falownikowej na pracę prostownikową (przy wzmacnianiu prądu wejściowego) przez przejście współczynnika stanu otwartego D_{op} z zakresu poniżej 0.5 do zakresu powyżej 0.5 (z zakazaną wartością 0.5). W rozdziale 2 scharakteryzowano także na podstawie literatury [17] metody sterowania FPzOI dla sinusoidalnej modulacji PWM („carrier based” – tzw z falą nośną) typu „simple boost”, „constant boost” i „maximum boost”. Autor przedstawia również na podstawie literatury sterowanie falownikiem prądu z „obwodem impedancyjnym” przy modulacji wektora przestrzennego SVM rozpatrując zarówno pracę falownikową jak i prostownikową. Autor analizuje następnie straty na diodzie z obwodu FPzOI i na

tranzystorach falownika dla różnych sekwencji przełączeń z Rys. 13b i 13c. Autor rozpatruje straty zarówno dla pracy falownikowej jak i prostownikowej (wg autora większe straty niż dla pracy falownikowej – Tabela 5 – jednak dla wyższej częstotliwości przełączania 250 kHz wobec 100 kHz dla pracy falownikowej) na podstawie symulacji w programie SABER do modelowania układów elektromechanicznych. Nie analizowano jednak strat w dławikach, które zależą od prądu magnesującego i jego częstotliwości (straty na przemagnesowywanie i na prądy wirowe, pomijając straty pozostałe). Autor porusza także problem parametrów (np. napięcie blokowania), jakie musi spełniać dioda w obwodzie quasi-impedancyjnym qZ-Source. Następnie Autor opisuje modyfikacje podstawowego obwodu quasi-impedancyjnego z FPzOI poprzez stosowanie dodatkowego tranzystora przełączającego w szereg z diodą (na podstawie [71]), co zapobiega niepożądanemu włączaniu się diody i umożliwi szerszy zakres stosunku maksymalnego napięcia wyjściowego FPzOI U_{llpeak} do napięcia wejściowego U_{DC} niż opisany równaniem (2.1.29) przy ciągłym przepływie prądu przez dławiki. Inne przedstawione modyfikacje obwodu quasi-impedancyjnego z FPzOI, to zastosowanie w falowniku dwukierunkowych łączników. Natomiast zastosowanie podwójnego obwodu quasi-impedancyjnego z obniżonym napięciem wstecznym na diodzie („improved Current-Fed quasi Z-Source Inverter”), to nowa koncepcja która była przedmiotem publikacji doktoranta jako współautora [35]. Jeszcze innym rozwiązaniem przedstawionym przez autora z literatury jest zastosowanie dodatkowego łącznika równoległe do wyjścia obwodu quasi-impedancyjnego (tzw. mostek o 7 przełącznikach określany jako H7 lub CSI7). Rozwiązanie to obniża straty mocy w stanie zwarcia poprzez obniżenie ilości łączników przez które płynie prąd zwarcia („shoot-through”). Autor zmodyfikowaną topologię podwojonego obwodu quasi-impedancyjnego przedstawia w postaci równoważnego podstawowego obwodu quasi-impedancyjnego z odpowiednio przeliczonymi wartościami elementów. Autor podsumowuje rozdział 2 stwierdzając, że przy pracy w trybie falownikowej układ ma wyższą sprawność niż w trybie prostownikowym. Jednak analiza sprawności nie obejmuje strat w dławikach. Następnie Autor analizuje dwa rozwiązania (wykorzystanie stanów pseudoaktywnych stosując łącznik w szereg z diodą i połączenie w szereg dwóch obwodów quasi-impedancyjnych) obniżające napięcie wsteczne na diodzie. Zastosowanie tylko diody w FPzOI uniemożliwia uzyskanie wzmocnienia napięcia stałego wejściowego więcej niż 2 razy, co wynika z (2.1.29). Autor kończy rozdział 2 stwierdzeniem, że zastosowanie elementów półprzewodnikowych z węgla krzemu pozwoli na uzyskanie częstotliwości przełączania powyżej 100 kHz. Autor analizował różne przypadki przebiegów prądu w dławikach dla różnych trybów pracy (np. Rys. 9), opierając analizę doboru parametrów układu qZ-Source w celu utrzymania ciągłości przepływu prądu na obliczeniach z [35] (ewentualnie wzór 2.1.21), natomiast brak doboru materiału rdzeni dławików, który będzie miał małe straty mocy przy stosowanych prądach magnesujących i częstotliwościach ich przełączania (w [35] dla niektórych dławików był to np. materiał Super MSS firmy Micrometals). Rozumiem, że przy sterowaniu prądem dławika qZ-Source można uniknąć braku ciągłości prądu i ma to miejsce w przypadku sterowania przedstawionego na Rys. 53a.

W rozdziale 3 autor przedstawia stosowany przez niego schemat modelowania siedmiołącznikowego falownika prądu (z równoległym kluczem na wejściu falownika, H7) ze zmodyfikowanym obwodem quasi-impedancyjnym (połączone w szereg dwa obwody quasi-

impedancyjne) w FPzMOI posługując się analizą na podstawie [82]. Trójfazowy falownik prądu FPzOI jest sprowadzany do postaci modelu jednofazowego (Rys. 30) realizującego 3 podstawowe stany: otwarcia, zwarcia i aktywny. W zakresie opisu stanów dynamicznych autor proponuje metodę uśrednionej przestrzeni stanu stosowaną dla przetwornic DC/DC już od lat 70-tych przez R. D. Middlebrooka [97]. Autor tworzy opis matematyczny układu FPzOI. W rozprawie doktorskiej jest przedstawiany klasyczny falownik prądu w pracy falownikowej który ma model opisany w [90]. Autor twierdzi, że w tym wypadku przy pracy falownikowej nie będzie wykorzystywany stan otwarcia, a przy pracy prostownikowej przy poborze energii z sieci nie będzie wykorzystanych stanów zwarcia ze względu na spodziewane obniżenie sprawności. Autor ostatecznie wyróżnia dwa stany – otwarty i nieotwarty (obejmujący stany zwarcia i aktywny) i po wyborze zmiennych stanu – napięć na kondensatorach i prądów dławików opisuje stan otwarty i nieotwarty równaniami stanu. Autor najpierw tworzy „model przełączany” funkcjami otwarcia lub zamknięcia łączników, aby dojść do modelu bilinearnego (3.1.14) [91], [95]. Następnie Autor tworzy uśredniony model (z uśrednionymi w czasie macierzami stanu i sterowania – „state space average model”) dla pracy prostownikowej z Rys. 31 z obciążeniem rezystancyjnym, następnie dla modelu FPzOI z Rys. 33 w pracy prostownikowej z obciążeniem źródłem napięcia stałego, które odpowiada np. akumulatorowi. Takie podejście (metoda uśrednionej przestrzeni stanów) jest tylko wtedy możliwe (to metoda dla przetwornic DC/DC), gdy założy się, że w czasie okresu przetwarzania T_{PWM} napięcie na zaciskach pn (np. na Rys. 31, 32, 33, 34) jest stałe. Kolejny model uśredniony przedstawiono dla pracy prostownikowej z obciążeniem RC (Rys. 34). Dalsze uszczegółowienie modelu polega na uwzględnieniu pasożytniczych szeregowych rezystancji dławików i kondensatorów oraz modelu przewodzącej diody jako szeregowego źródła napięcia i rezystancji. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że szeregowo pasożytnicze rezystancje dławików będą zależały od strat mocy w tych dławikach i będą zależeć od prądów magnesujących i częstotliwości ich przełączania. Autor modeluje falownik ze zmodyfikowanym obwodem quasi-impedancyjnym (FPzMOI) dochodząc do wniosku, że można go opisać równaniami stanu identycznymi jak falownik prądu z oryginalnym obwodem quasi-impedancyjnym FPzOI (oczywiście przy przeliczonych wartościach elementów).

Na podstawie opisu FPzOI uśrednionymi równaniami stanu Autor tworzy funkcje przejścia – transmitancje od małosygnałowych zmian - przyrostów (Autor określa je jako „perturbacje” i stosuje 10% wartość sygnału „perturbacji” w punkcie pracy) współczynnika wypełnienia stanu otwartego i współczynnika sterowania (współczynnika modulacji). Transmitancja od współczynnika wypełnienia stanu otwartego d_{op} na prąd prostownika i_{DC} jest nieminimalnofazowa. Na podstawie symulacji uzyskano wykresy Bodego, które eksportowano do programu Matlab, aby zidentyfikować obiekt. Autor porównywał transmitancje uzyskane z modelu matematycznego i z symulacji przekształtnika uzyskując dobrą zbieżność (Rys. 43). Autor następnie rozszerzał analizę pracy FPzOI jako prostownika, uwzględniając stronę napięcia przemiennego po transformacjach napięć wejściowych z naturalnego układu współrzędnych abc do wirującego układu współrzędnych dq i do stacjonarnego $\alpha\beta$. W podsumowaniu rozdziału autor podkreśla nieminimalnofazowość układu FPzOI, co w pewnym stopniu utrudnia sterowanie. Równocześnie autor wskazuje na

niedogodności stosowania modelu opartego na uśrednionej przestrzeni stanów, np. brak możliwości uwzględnienia takich zjawisk jak tętnienia prądów i napięć, czy nieciągłość sygnałów.

W rozdziale 4 autor przechodzi do syntezy algorytmu sterowania przekształtnikiem FPzOI pracującym w trybie prostownika lub falownika (Rys. 51). Podstawowa różnica pomiędzy znanymi regulatorami falowników napięcia, a falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym (FPzOI) polega na uwzględnianiu w sterowaniu współczynnika wypełnienia stanu otwartego (wzory na wzmocnienie prądowe, np. (2.1.11)). Autor przedstawia studium literaturowe dotyczące sterowania falowników z obwodami impedancyjnymi, trzeba zwrócić uwagę, że w literaturze przedstawiano zwykle falowniki napięcia pracujące z obwodami impedancyjnymi, gdzie w osobnym układzie sterowano czasem zwarcia. Autor w szczególności chciał przedstawić rzadko opisywane w literaturze sterowanie prądowym falownikiem quasi-impedancyjnym w trybie prostownikowym. Autor proponuje w swoim rozwiązaniu układu regulacji regulatory PI lub regulatory proporcjonalno rezonansowe w torze regulacji prądu oraz zewnętrzną pętlę sterowania mocą bazującą na estymatorze mocy chwilowej (jest to relatywnie nowe podejście bazujące na teorii H. Akagi). Regulator prądu przemiennego falownika prądu (Rys. 55) jest typu proporcjonalno-rezonansowego PR w stacjonarnym układzie współrzędnych $\alpha\beta$ lub regulatorem PI w wirującym układzie współrzędnych dq . Stacjonarny układ współrzędnych $\alpha\beta$ stosujemy dla symetrycznych napięć. Autor przedstawia najpierw ciągły układ sterowania (2 wewnętrzne pętle – pętla regulatora PR prądu sieci oraz pętla aktywnego tłumienia drgań z członem typu różniczkującego z prądem dławika na wejściu, opis w rozdziale 7.1). Autor sterowanie ciągle dyskretyzuje, stosując transformację bilinearną Tustina. Zewnętrzna pętla regulacji przekazuje do pętli wewnętrznej sygnały odniesienia prądu (w układzie $\alpha\beta$) wyliczone na podstawie pomiaru napięć (w układzie $\alpha\beta$) i zadanych chwilowych wartości mocy czynnej i biernej (Rys. 75). Teoria H. Akagi umożliwia analizę stanów dynamicznych mocy w obwodach z nieliniowymi prądami (teorie Budeanu i Fryzego tego nie umożliwiały). Istnieją jednak poważne publikacje, np. L. S. Czarnecki „Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems”, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 21, no. 1, 2006 podważające zastosowanie tej teorii w układach z sinusoidalnym przebiegiem prądu. Wg L. Czarneckiego teoria mocy chwilowej sugeruje obecność chwilowego prądu biernego w liniach zasilających czysto rezystancyjnych odbiorników oraz obecność chwilowego prądu czynnego w przewodach zasilających czysto reaktywnych obciążen. Ponadto sugeruje to, że prądy linii z obciążeniem liniowym z sinusoidalnym napięciem zasilania zawierają niesinusoidalne składniki. H. Akagi w swojej książce [124] wspomina L. Czarneckiego i jego modyfikacje teorii mocy Fryzego w układach z niesinusoidalnym prądem.

Autor omawia przypadki stosowania regulatora mocy P_{DC} w przypadku pracy prostownikowej falownika FPzOI, prądu i_{DC} w przypadku pracy prostownikowej lub falownikowej oraz napięcia u_{DC} w przypadku pracy prostownikowej. W przypadku regulacji i_{DC} lub u_{DC} obliczana jest zależność tych wielkości od chwilowej mocy czynnej p oddawanej do obciążenia.

Drobnym błędem edycyjnym jest wstawienie Rys. 67 mającego przedstawiać regulator napięcia u_{DC} identycznego z Rys. 64 przedstawiającym regulację i_{DC} .

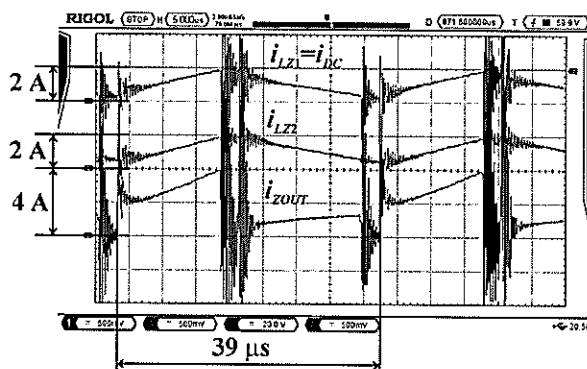
Innym podejściem niż zastosowanie teorii mocy chwilowych w układzie stacjonarnym $\alpha\beta$ jest wykorzystanie regulatora PI prądów sieci w wirującym układzie współrzędnych dq przy współpracy z siecią o symetrycznych napięciach. Występuje tu konieczność odsprzęgnięcia sygnałów w osiach dq . Aby przeprowadzić odwrotną transformację układu dq na wirujący $\alpha\beta$ (dla sterowania wektorowego falownika) stosuje się układ synchronizacji z napięciem sieci typu PLL. Autor przedstawia także możliwość zastosowania regulatora wielorezonansowego lub regulatora powtarzalnego (oryginalna nazwa „repetitive controller”) do kompensacji wyższych harmonicznych prądu fazowego. Według Luo F.L., Ye H., Rashid M.: “Digital Power Electronics and Applications”, Elsevier Academic Press, USA 2006 regulator „repetitive controller” to generator harmonicznych, który włącza się w zewnętrzną pętlę sprzężenia – metoda „plug-in”. Zwykle taki regulator ma włączony w szereg kompensator, którego charakterystykę częstotliwościową należy ukształtować w zależności od charakterystyki układu objętego wewnętrzną pętlą sprzężenia. Idea kompensacji oparta na “zerowym błędzie fazy funkcji śledzenia” ZPETC („zero phase error tracking compensation”) znana jest od 30 lat. Wadą regulatora „repetitive controller” jest pamiętanie zaburzenia w chwili, gdy już go nie ma, a dalej jest zapisane w pamięci ostatniego okresu i wpływa na sterowanie obiektu przez następny podstawowy okres.

W sumie autor w rozdziale 4 przedstawił wybrane metody sterowania dla falowników prądu z obwodami quasi-impedancyjnymi (FPZOI) pracującymi zarówno w trybie falownikowym na sieć jak i w trybie prostownikowym, w którym położono nacisk na konieczność stosowania dodatkowego regulatora prądu dławika z układu qZ-Source. Zrealizowano dwie strategie sterowania. Pierwsza to pominięcie stanów zwarciovych (przy sterowaniu prądem) w celu zredukowania strat w nich występujących, gdy prąd dławika obwodu impedancyjnego zależy wyłącznie od współczynnika wypełnienia stanu otwartego (należy unikać wartości tego współczynnika zbliżonych do 0.5, bo gwałtownie zwiększa to prąd dławików obwodu impedancyjnego). Druga zrealizowana strategia, to wyznaczanie współczynnika wypełnienia stanu otwartego za pomocą regulacji prądu dławika obwodu impedancyjnego (stosując stany zwarcia). Autor stosuje regulatory prądu fazowego (po transformacji na wirujący układ współrzędnych dq), regulator kompensujący drgania w filtrze dolnoprzepustowym LC (stosując transformację na stacjonarny układ współrzędnych $\alpha\beta$), regulator wielorezonansowy tłumiący wyższe harmoniczne prądu fazowego, regulatory prądu stałego i_{DC} , napięcia stałego u_{DC} lub chwilowej mocy czynnej po stronie prądu stałego oraz regulatory prądu dławika obwodu impedancyjnego. Wydaje się, że Rys. 87 najlepiej przedstawia stosowaną ideę sterowania falownikiem prądu w trybie prostownikowym. Modele predykcyjne bazujące na modelu – „model predictive control”, wskazane przez autora jako interesujące w przyszłości, są stosowane dość szeroko w zespole prof. F. Blaabjerga z Aalborg University.

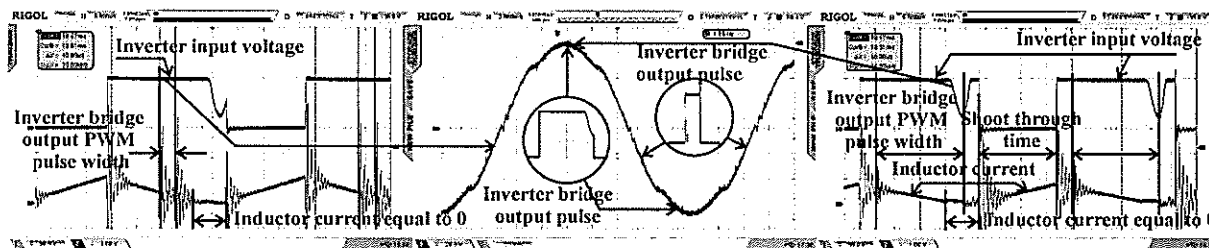
Autor przedstawione wcześniej rozważania teoretyczne i symulacje sterowania falownikami prądu sprawdził praktycznie w falowniku prądu z obwodem impedancyjnym o założonej mocy 6 kVA przy pracy falownikowej na sieć lub obciążenie stałe i 3 kVA przy pracy prostownikowej. Jednak moce te zredukowano odpowiednio do 2 i 1 kW dla

eksperymentów z FPzMOI. Częstotliwość przetwarzania dla pracy falownikowej wynosiła 100 kHz, a pracy prostownikowej 250 kHz, przy czym algorytm sterowania był wykonywany z częstotliwością 50 kHz, zapewne ze względu na ograniczoną moc obliczeniową mikroprocesora sterującego. Zastosowano tranzystory MOSFET w technologii SiC o niskiej rezystancji kanału, wysokiej częstotliwości przełączania i wysokiej odporności na temperaturę. Oprócz 6 tranzystorów (łączonych w szereg z diodami Schotky'iego) w mostku falownika zastosowano dodatkowy dwutranzystorowy łącznik (struktura H7) realizujący stany zwarcia obwodu quasi-impedancyjnego. Zastosowano odmienne metody modulacji przy pracy falownikowej na obciążenie rezystancyjne (ze stanami zwarcia i aktywnymi) i na sieć (ze stanami zerowymi otwartymi), a przy pracy prostownikowej bez stanów zwarcia, lub ze stanami zwarcia przy regulacji prądu dławika obwodu impedancyjnego. Autor przedstawił, że przy pracy falownikowej podłączono falownik do sieci trójfazowej przez autotransformator (ponieważ model eksperymentalny miał ograniczone napięcie na tranzystorach SiC) oraz transformator separacyjny, natomiast przy pracy prostownikowej obciążenie jest rezystancyjne.

Na Rys. 90 przedstawiono pracę obwodu impedancyjnego. Czy przy niewielkim poborze prądu przy pracy jako falownik, nie istnieje ryzyko nieciągłego przepływu prądu przez dławiki i zniekształcenia impulsów u_{pn} w stanach nie-zwarciovych (nie będą prostokątami)? Na Rys. 90 prawie dochodzi się do stanu granicznego ciągłości prądu. Autor przytacza artykuł [145] mówiący o wpływie pomiarowej sondy Rogowskiego na oscylacje tranzystorów SiC. Ale na podanym niżej rysunku (Z. Rymarski, K. Bernacki, „Drawbacks of impedance networks”, International Journal of Circuit Theory and Applications, 2018, vol. 46, issue 3, pp. 612-628, doi: 10.1002/cta.2395). mierzono prądy poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorach pomiarowych w standardowym układzie qZ-Source dla jednofazowego falownika napięcia z tranzystorami Si IRF360 (szeregowy rezystor w sterowaniu bramki 10 Ω) uzyskując zbliżone oscylacje, jak na Rys. 90. Zatem na Rys. 90 być może pokazany jest wpływ cewki Rogowskiego na oscylacje, ale mogą też być inne przyczyny oscylacji.



Czy przy pracy falownikowej, gdy nie ma regulacji prądu dławika z obwodu impedancyjnego nie problemu z nieciągłym prądem dławika tego obwodu? Taki nieciągły prąd powoduje zniekształcenia napięcia/prądu (zależnie od trybu pracy i od pojemności kondensatorów w filtrze falownika) takie jak widoczne na Rys. 98 dla prądów. Przyczyny zniekształceń napięcia dla VSI z qZ-Source z nieciągłym przepływem prądu przedstawiono na poniższym rysunku.



(Z. Rymarski, K. Bernacki, „Drawbacks of impedance networks”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2018, vol. 46, issue 3, pp. 612-628, DOI: 10.1002/cta.2395)

Podsumowując w opisie części eksperymentalnej autor przedstawił weryfikację wcześniejszych rozważań teoretycznych zarówno dla pracy statycznej jak i stanów dynamicznych (np. dynamicznej zmiany obciążenia przy pracy prostownikowej). Przeprowadził badania pracy w trybie falownikowym z oddawaniem energii do sieci ze źródła napięcia stałego zarówno w trybie podwyższającym jak i obniżającym napięcie. Autor wskazuje na pojawiające się zakłócenia promieniowane przy wartości napięcia międzyfazowego powyżej 250 V i wskazuje jako przyczynę szybki narost napięcia na tranzystorach mostka falownika.

Badania eksperymentalne potwierdziły (z pewnymi ograniczeniami, które pewnie w ciągu dalszych prac można usunąć) możliwość pracy z częstotliwością 100 – 250 kHz falowników prądu ze zmodyfikowanymi obwodami impedancyjnymi (FPzMOI) przy pobieraniu (praca prostownikowa) i oddawaniu (praca falownikowa) energii z/do sieci niskiego napięcia.

Uwagi szczegółowe

1. Układ pracy doktorskiej jest prawidłowy. Siedem rozdziałów zostało logicznie ułożonych. Jakość edycji pracy jest bardzo dobra. Literatura – 152 pozycje, jest odpowiednia, lecz przy omawianiu jakości energii poprzez kształt przebiegów chwilowych napięcia/prądu warto odnieść się do odpowiednich norm, których w spisie literatury nie znalazłem. Praca jest trudna w zrozumieniu ze względu przeplatanie opisów pracy falownikowej i prostownikowej. Rozumiem jednak, że inaczej się nie dało przedstawić zalety falownika prądu FPzOI/FPzMOI jaką jest możliwość pracy w obu tych trybach.

2. Praca została starannie edytorsko przygotowana. Znalazłem dwa drobne błędy: na Rys. 2. popełniono drobny błąd edycyjny pisząc „od prawej strony znajduje się źródło prądu lub napięcia”, a to właśnie jest z lewej strony. Błędem edycyjnym jest wstawienie Rys. 67 mającego przedstawiać regulator napięcia u_{DC} , identycznego z Rys. 64 przedstawiającym regulację i_{DC} .

3. Autor nie wspomina o typowych zniekształceniach napięcia/prądu wyjściowego w falownikach napięcia związanych z nieciągłym przepływem prądu przez dławiki „obwodu impedancyjnego” i z niedostateczną pojemnością kondensatorów w tym obwodzie. Wprawdzie Autor omawia falowniki prądu, ale przy trybie pracy falownikowej na obciążenie rezystancyjne można spodziewać się podobnych efektów, natomiast przy pracy na sieć, zniekształceń prądu widocznych np. na Rys. 98, które mogą być związane z nieciągłym przepływem prądu przez dławiki qZ-Source. Oczywiście w przypadkach, gdy stosowana jest

regulacja prądu dławika obwodu quasi-impedancyjnego (np. sterowanie z Rys. 53a) można wyeliminować problem nieciągłości prądu dławika w obwodzie quasi-impedancyjnym.

4. W pracy odniesiono się do [35] w sprawie doboru dławików i pojemności w obwodzie quasi-impedancyjnym. Przy analizie strat mocy (Tab. 5) nie analizowano strat w dławikach, które zależą od prądu magnesującego i jego częstotliwości w zależności od materiału rdzenia (straty na przemagnesowywanie i na prądy wirowe, pomijając straty pozostałe). Autor analizował różne przypadki przebiegów prądu w dławikach dla różnych trybów pracy (np. Rys. 9) (opierając analizę warunków ciągłości przepływu prądu i doboru dławików z punktu ich indukcyjności na obliczeniach z [35], w rozprawie jest tylko jeden wzór 2.1.21), natomiast brak doboru materiału ich rdzenia (w [35] dławiki po stronie AC mają rdzenie z materiału Super MSS), który będzie miał małe straty mocy przy stosowanych prądach magnesujących i częstotliwościach ich przełączania. Rozumiem, że przy sterowaniu prądem dławika można uniknąć braku ciągłości prądu, ale ma to miejsce tylko w przypadku sterowania z Rys. 53a, natomiast bez tego sterowania utrzymanie ciągłości prądu dla zmiennych obciążeń jest problemem.

5. Przedstawione w pracy uszczegółowienie modelu polega na uwzględnieniu pasożytniczych szeregowych rezystancji dławików i kondensatorów oraz modelu przewodzącej diody jako szeregowego źródła napięcia i rezystancji. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że szeregowo pasożytnicze rezystancje dławików będą zależały od strat mocy w tych dławikach i będą zależęć od wartości prądów magnesujących i częstotliwości ich przełączania. Można modelować funkcje przejścia falowników transmitancjami o zmiennych współczynnikach zależnych od częstotliwości i wartości prądu magnesującego, co jednak by bardzo skomplikowało modelowanie, a tak naprawdę znacząca jest częstotliwość przełączania i nominalny prąd magnesujący.

6. Autor posiłkuje się teorią mocy chwilowej opisaną przez H Akagi. Ta teoria jako jedyna pozwala na analizę stanów dynamicznych w układach z nieliniowym przebiegiem prądu. Jest ona szeroko stosowana w najlepszych ośrodkach (np. w zespole prof. F. Blaabjerga w Aalborg University). Istnieją jednak poważne publikacje, np. L. S. Czarnecki Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, 2006 podważające zastosowanie tej teorii w układach z sinusoidalnym przebiegiem prądu. Wg L. Czarneckiego teoria mocy chwilowej sugeruje obecność chwilowego prądu biernego w liniach zasilających czysto rezystancyjnych odbiorników oraz obecność chwilowego prądu czynnego w przewodach zasilających czysto reaktywnych obciążeń. Ponadto sugeruje to, że prądy linii z obciążeniem liniowym z sinusoidalnym napięciem zasilania zawierają niesinusoidalne składniki. L. S. Czarnecki jest tak poważnym specjalistą w zakresie analizy mocy w układach elektrycznych, że H. Akagi w swojej książce [124] wspomina oraz cytuje L. Czarneckiego i jego modyfikacje teorii mocy Fryzego w układach z niesinusoidalnym prądem. Prosiłbym tylko o komentarz, chociaż i tak nawet lekko wadliwa teoria mocy chwilowej H. Akagi jest jedyna w przypadku analizy stanów nieustalonych w układach z niesinusoidalnym przebiegiem prądu.

7. Proszę wyjaśnić dlaczego stosowano regulatory wielorezonansowe zamiast regulatorów powtarzalnych („repetitive controller”). Jaka powinna być charakterystyka amplitudowa i

fazowa kompensatora w „repetitive controller” przy zastosowaniu metody “zerowego błędu fazy funkcji śledzenia” ZPETC („zero phase error tracking compensation”) przy włączeniu regulatora powtarzalnego w zewnętrzną pętlę sprzężenia – metoda „plug-in”.

8. Autor wskazuje na pojawiające się zakłócenia promieniowane przy wartości napięcia międzyfazowego powyżej 250 V i uznaje jako przyczynę szybki narost napięcia na tranzystorach SiC mostka falownika. Istotnym problemem wskazanym np. w [145] są oscylacje w obwodzie bramkowym tranzystorów SiC. Jak wyglądał układ sterujący w obwodach bramkowych tranzystorów SiC. Jak tłumiono oscylacje w obwodzie bramkowym?

9. Sterowanie odbywa się z częstotliwością 50 kHz, a przełączanie dwa albo pięć razy większą częstotliwością. Czy to znaczy, że szerokość impulsów jest utrzymywana na stałej wartości przez kilka okresów przełączania?

Ocena rozprawy

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Piotra Majtczaka „Topologie i metody sterowania falownika prądu z obwodem impedancyjnym”. zawiera oryginalne wyniki, a doktorant wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami w zakresie falowników prądowych z obwodami impedancyjnymi typu qZ-Source, w szczególności w zakresie projektowania wielopętlowych i wielowejściowych układów regulacji tych falowników pracujących w trybie falownikowym na sieć niskonapięciową lub trybie prostownikowym, pracujących odpowiednio z częstotliwością przełączania 100 kHz lub 250 kHz, z wykorzystaniem tranzystorów SiC w mostku falownika.

Osiągnięto główny cel pracy, którym było opracowanie metod sterowania falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym pracującym przy wysokiej częstotliwości przełączeń tranzystorów. Autor udowodnił postawioną na początku rozprawy tezę, że „możliwe jest sterowanie mocą sieciowego falownika z obwodem quasi-impedancyjnym przy dużej częstotliwości przełączeń tranzystorów (Autor jako dużą częstotliwość przyjął 100 kHz dla trybu falownikowego i 250 kHz dla trybu prostownikowego) oraz zachowaniu wysokiej jakości przekształcanej energii”. **Autor poprawnie rozwiązał postawione zagadnienia (Ad 3).**

Autor przedstawił analizę topologii falownika prądu (z mostkiem H7 z czwartą gałęzią do realizacji stanów zwarciovych) z podwójnym obwodem qZ-Source (falownik prądu z modyfikowanym obwodem quasi-impedancyjnym - FPzMOI) oraz analizę metod modulacji PWM dla FPzOI/FPzMOI pod kątem sprawności przetwarzania energii, analizując jednak jedynie elementy półprzewodnikowe. Przy stosowanych relatywnie wysokich częstotliwościach przełączania warto uwzględnić straty mocy w rdzeniach dławików. Autor stworzył modele symulacyjne FPzOI, uwzględniając różne typy modulacji PWM. Korzystając z metody uśrednionej przestrzeni stanów stworzył modele zarówno standardowego obwodu quasi-impedancyjnego z uproszczonym modelem falownika (przyjmując stałość napięcia u_{pn} w okresie przetwarzania) jak i zmodyfikowanej struktury FPzMOI, sprowadzając jej małosygnałowy model do modelu układu podstawowego. Autor pokazał algorytmy sterowania prądem sieci w stacjonarnym i wirującym układzie współrzędnych. Stworzono

algorytm sterowania wielkościami wyjściowymi FPzMOI w trybie pracy falownikowej i prostownikowej. Zbudowano i przetestowano model laboratoryjny w obu trybach pracy

Autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników (Ad 5). Monografia ma wszystkie niezbędne części pracy naukowej – obliczenia teoretyczne, symulacje programowe i weryfikację na modelach eksperymentalnych o parametrach zbliżonych do rzeczywistych falowników. **Wydaje się, że głównym osiągnięciem Autora, a także jego samodzielnym i oryginalnym dorobkiem (Ad 4),** było tworzenie modelu zmodyfikowanego układu FPzMOI, sprowadzenie jego modelu do układu standardowego FPzOI i opracowanie wielopętlowego, wielowejściowego sterowania falownika prądu z obwodem quasi-impedancyjnym, umożliwiające jego pracę zarówno w trybie falownikowym jak i prostownikowym przy relatywnie wysokiej częstotliwości przełączania.

Praca ma aspekty praktyczne (jest przydatna dla nauk inżyniersko-technicznych Ad 6) a po rozwiązaniu problemów z oscylacjami napięcia na tranzystorach SiC i zastosowaniu pełnego napięcia sieciowego na falownikach (wyeliminowaniu autotransformatora) proponowany układ może z powodzeniem pracować np. w mikrosieci – oddając i gromadząc energię w bankach mocy.

Oryginalność pracy potwierdza (Ad 4) 5 publikacji współautorskich, przedstawiających zagadnienia zbliżone do ujętych w monografii tematów lub jak [35] stanowiących ich podstawę, (od 2016) w bazie Web of Science, w tym 2 w czasopiśmie (w tym w renomowanym IEEE Transactions On Industrial Electronics) i 3 konferencyjne, z których w monografii cytowano 3 prace. Publikacje w renomowanych czasopiśmie były wcześniej pozytywnie ocenione przez wielu kompetentnych recenzentów.

Przedstawione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na wysoką merytoryczną jakość pracy.

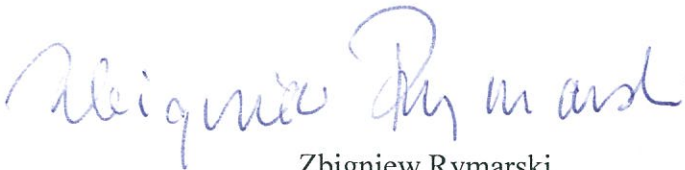
Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Majtczaka „Topologie i metody sterowania falownika prądu z obwodem impedancyjnym” stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach 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 i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Piotra Jakuba Majtczaka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej w dyscyplinie naukowej **Elektrotechnika** (przewód doktorski był wszczęty przed 30.04.2019) odpowiadającej dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, **dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika** wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu MNiSzW z dnia 20 września 2018 roku w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. 2018 poz. 1818).

Ponadto biorąc pod uwagę **wysoki poziom merytoryczny i oryginalność** prezentowanych rozwiązań, **możliwość ich praktycznej implementacji** oraz **wcześniejszy dorobek**

publikacyjny doktoranta (5 pozycji publikacyjnych w bazie Web of Science) uważam pracę za wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie.



Zbigniew Rymarski

