

Gdańsk, 12.01.2024 r.

**dr hab. inż. Marek Adamowicz, prof. PG**

Politechnika Gdańska

Wydział Elektrotechniki i Automatyki

ul. Gabriela Narutowicza 11/12

80 – 233 Gdańsk

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie  
Kosmiczne Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy: **Single-Phase Quasi-Z-Source Inverter with Active Energy Buffer**

Autor rozprawy: **mgr inż. Kornel Wolski**

#### **1. Wstęp**

Efektywne wykorzystanie i użytkowanie urządzeń jednofazowych w lokalizacjach bez dostępu do publicznej sieci energetycznej, to znaczy przy zasilaniu z akumulatorów bądź rozproszonych źródeł energii o niskim napięciu, wymaga stosowania przekształtników energoelektronicznych DC-AC podwyższająco-obniżających napięcie, o możliwie jak najwyższej sprawności przetwarzania energii, zapewniających określone parametry generowanego napięcia wyjściowego. Przekształtniki takie mogą być realizowane jako dwustopniowe, o wejściowym stopniu podwyższającym w postaci przekształtnika DC-DC oraz stopniu wyjściowym w postaci falownika napięcia, bądź jako jednostopniowe, tzw. falowniki o źródle impedancyjnym (z *ang. impedance source inverters*).

Szczególnym przykładem są przenośne urządzenia AGD oraz urządzenia zapewniające podstawowe potrzeby, takie jak pompy wody pitnej, które od przekształtników zasilających wymagają małych wymiarów i masy oraz kompaktowej konstrukcji. W gospodarkach rozwiniętych rynek urządzeń przenośnych koncentruje się na zapewnieniu użytkownikom komfortu podróży, podczas gdy w krajach rozwijających się, zwłaszcza w Afryce czy Ameryce Płd. dostarcza społeczeństwu urządzeń zapewniających podstawowe potrzeby życiowe. Postęp w konstruowaniu coraz mniejszych układów przekształtnikowych jest możliwy dzięki ciągłemu postępowi w technologii przyrządów półprzewodnikowych mocy i energoelektronicznych elementów pasywnych. Zawdzięczamy to również regularnemu transferowi technologii kosmicznych i wojskowych do przemysłu cywilnego. Coraz wyższe częstotliwości przełączeń przyrządów półprzewodnikowe z materiałów węgla krzemu (SiC) czy azotku galu (GaN), umożliwiają uzyskiwanie kompaktowych konstrukcji dzięki

zmniejszeniu gabarytu elementów magnetycznych: dławików i transformatorów. Jednocześnie, bardzo wysokie stromości zmian napięcia  $du/dt$  tranzystorów i diod stwarzają nowe wyzwania w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (EMC), które muszą być podejmowane przez projektantów. Otoczenie przemysłowe stymuluje działania naukowców poprzez organizowanie otwartych konkursów w formie wyzwań o sprecyzowanych wymaganiach i wysoko postawionej poprzeczce technologicznej. W Polsce do takich wyzwań można zaliczyć organizowane w ostatnich latach przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju dwa konkursy: „Wielkie Wyzwanie Energia” (2019-2021), obejmujące opracowanie m.in. wysokosprawnego przekształtnika do małej elektrowni wiatrowej o wymiarach nie przekraczających sześcienu o boku 2m oraz przedsięwzięcie „Magazynowanie Energii Elektrycznej – Strumień System” (2021-2023) obejmujące opracowanie kompaktowego systemu przekształtnikowego do ładowania/rozładowania przydomowego magazynu energii, zasilania mikro sieci w obrębie domu mieszkalnego oraz ładowania pojazdu elektrycznego, który powinien charakteryzować się wysoką sprawnością i cichą pracą. Wśród konkursów międzynarodowych wymienić można konkursy grantowe DARPA, regularnie organizowane w USA oraz konkurs „Little Box Challenge” (2014 – 2016), zorganizowany przez koncern Google, który dotyczył opracowania przekształtnika DC-AC do zasilania odbiorników jednofazowych o mocy 2kW charakteryzującego się sprawnością powyżej 95%. Zgodnie z wymaganiami miał on mieścić się w metalowej obudowie o objętości nie przekraczającej 40 cali sześciennych, a ponadto wytrzymać 100 godzin testów z obciążeniem jednofazowym o współczynniku mocy z przedziału od 0,7 do 1. Wartością dodaną dla gospodarki takich konkursów jest możliwość promowania przez producentów zaawansowanych technologicznie podzespołów i komponentów: przyrządów półprzewodnikowych mocy, elementów pasywnych, akumulatorów, itp. Zadaniem uczestników jest tworzenie nowych innowacyjnych rozwiązań użytecznych dla całego społeczeństwa, które jednocześnie będą napędzać rynek producentom komponentów.

Niezależnie od organizowanych konkursów, jednofazowe falowniki o mocach rzędu kilowatów, wysokiej sprawności i kompaktowej konstrukcji, spełniające wymagania norm EMC są cały czas przedmiotem badań i opracowań. W związku z powyższym, rozprawa doktorska mgr. inż. Kornela Wolskiego pt. „Single-Phase Quasi-Z-Source Inverter with Active Energy Buffer”, dotycząca opracowania jednofazowego falownika obniżająco-podwyższającego napięcie, o zmniejszonym gabarycie - dzięki zastosowaniu w obwodzie DC wspomagającego, aktywnego zasobnika energii dotyczy zagadnienia naukowego i badawczego istotnego z punktu widzenia rozwoju gospodarki i społeczeństwa.

Istotnym problemem w jednofazowych falownikach napięcia są tętnienia mocy w obwodzie wejściowym DC falownika, o pulsacji równej dwukrotnej pulsacji napięcia wyjściowego ( $2\omega$ ). Wynikają one nieodzwrotnie z zasady działania falownika i procesu generowania wyjściowego napięcia jednofazowego. Przy utrzymaniu stałego napięcia DC powoduje to tętnienia prądu wejściowego, bardzo niekorzystne przy współpracy falownika z ogniwami fotowoltaicznymi (PV). Z kolei, przy utrzymaniu stałego prądu DC powoduje to tętnienia napięcia DC i wysoką zawartość niepożądanych wyższych harmonicznym w napięciu i prądzie wyjściowym. Różne rozwiązania przekształtników jednofazowych, dwu- i jednostopniowych do zasilania ze źródeł DC niskiego napięcia, o zmniejszonym negatywnym wpływie pulsacji mocy w obwodzie DC na gabaryt i masę falownika są aktualnie badane przez ośrodki uniwersyteckie oraz centra badawczo-rozwojowe na całym świecie. W związku z powyższym, uważam wybór tematu rozprawy za oryginalny i aktualny.

## **2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy**

Celem rozprawy było opracowanie nowej konstrukcji jednostopniowego jednofazowego przekształtnika obniżająco-podwyższającego napięcie (buck-boost) z wejściowym obwodem impedancyjnym, która przy zastosowaniu tranzystorów SiC o wysokiej częstotliwości przełączeń będzie się wyróżniać mniejszym gabarytem i masą oraz bardziej kompaktową konstrukcją od istniejących układów przekształtników jednofazowych typu buck-boost, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości prądów wejściowych i wyjściowych.

Wybór tranzystorów SiC, a nie GaN był związany z udziałem Doktoranta w realizacji grantu NCN nr UMO-2015/19/B/ST7/00620 pt. „Badania przekształtników energoelektronicznych z obwodem impedancyjnym wykorzystujących przyrządy mocy z węgla krzemu”, w ramach którego zrealizowana została rozprawa doktorska.

Rozprawa, napisana w języku angielskim, liczy 161 stron i została podzielona na 6 rozdziałów. Ponadto, zawiera spis literatury, spis rysunków, spis tabel oraz dwa dodatki: dodatek A z opisem składowych prądów i napięć gałęzi wejściowego obwodu impedancyjnego quasi-Z-source (qZS) dla pulsacji  $2\omega$  i dodatek B zawierający szczegółowe obliczenia strat energii podczas przełączania tranzystorów SiC falownika qZS.

W rozdziale 1, liczącym 9 stron, Doktorant zawarł wprowadzenie do tematyki jednofazowych przekształtników typu boost-buck ze szczególnym uwzględnieniem opisu problemu pulsacji mocy  $2\omega$  w obwodzie DC. Jako jedną z inspiracji podjęcia tematu rozprawy doktorskiej Doktorant przywołuje międzynarodowy konkurs Little Box Challenge (2014-

2016), który również dotyczył rozwiązania problemu występowania w obwodzie DC falownika jednofazowego pulsacji mocy  $2\omega$  i jej wpływu na gabaryt i masę falownika.

Czerpiąc inspirację z konkursu „Little Box Challenge” Doktorant w rozprawie podejmuje problem zastosowania aktywnego bufora energii (AEB – *active energy buffer*), nazywanego również aktywnym buforem mocy (*active power buffer*) w jednostopniowym jednofazowych przekształtniku obniżająco-podwyższającym, ponieważ w konkursie „Little Box Challenge” układy aktywnych buforów AEB miały zastosowanie w przekształtnikach dwustopniowych.

Aktywne bufony AEB miały już zastosowanie w jednostopniowych jednofazowych przekształtnikach buck-boost z obwodami impedancyjnymi ale nie były badane pod kątem minimalizacji konstrukcji, tak jak to miało miejsce w konkursie „Little Box Challenge” w przypadku przekształtników dwustopniowych. Stanowi to o oryginalności podejścia Doktoranta. Autor dokonuje przeglądu stanu techniki z zakresu topologii układów AEB stosowanych w przekształtnikach dwustopniowych (*boost converter BC+ voltage source inverter VSI*) – podkreślając, które układy AEB zostały zaprezentowane w konkursie „Little Box Challenge”. Dalej Doktorant wprowadza czytelnika do tematyki jednofazowych falowników z wejściowymi obwodami impedancyjnymi (*impedance source inverters*) analizując stan techniki i zastosowań, Szczególny przedmiot zainteresowania Doktoranta stanowi topologia falownika jednofazowego typu quasi-Z-source (qZSI). Autor podejmuje się zadania sprawdzenia, w którym miejscu będzie najkorzystniej podłączyć aktywny bufor AEB w obrębie obwodu impedancyjnego i jaką najkorzystniej powinien mieć topologię? Autor wskazuje, że pomimo dotychczasowych badań zastosowanie praktyczne falowników jednofazowych qZS jest ograniczone (tylko jeden producent fotowoltaiki w Estonii – zespół pod kierunkiem prof. D. Vinnikova). Co wciąż wynika ze zbyt małej osiąganego gęstości mocy (zatem i zbyt dużych kosztów) falowników jednofazowych qZSI – co jest spowodowane problemem pulsacji mocy  $2\omega$  w obwodzie DC.

Jako pierwszy problem Doktorant wskazuje duże rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń modeli analitycznych prezentowanych w literaturze, a wynikami badań laboratoryjnych jednofazowych falowników qZSI, co wynika z niedokładnego modelowania składowych zmiennych prądów i napięć o pulsacji  $2\omega$ . Po przeanalizowaniu kilkunastu reprezentatywnych publikacji naukowych Doktorant wyciąga wniosek, że przy dotychczasowym, prezentowanym w literaturze podejściu, zbudowanie kompaktowego falownika jednofazowego typu qZS jest niemożliwe. Rozdział 1 kończy się postawieniem przez Doktoranta tezy, która w tłumaczeniu własnym recenzenta na język polski brzmi: „Możliwe jest skonstruowanie jednostopniowego

*jednofazowego falownika obniżająco-podwyższającego, o wysoce kompaktowej konstrukcji, który pracując przy wysokiej częstotliwości przełączania ( tranzystorow) zapewni utrzymanie wysokiej jakości (przebiegów) prądów wejściowych i wyjściowych”.* Celem pracy, sformułowanym przez Doktoranta na koniec Rozdziału 1 jest: *„Opracowanie i przeprowadzenie badań falownika typu quasi-impedance-source o wysokiej częstotliwości przełączeń (tranzystorów) zawierającego aktywny bufor „second-harmonic buffer”, sterowanego odpowiednio dobraną metodą sterowania.*

Należy zaznaczyć, że ostatnia część tezy stanowi być może skrót myślowy, ponieważ w praktyce przy bezpośrednim zasilaniu urządzeń jednofazowych najważniejszą jest wysoka jakość generowanego napięcia. Z kolei, jakość prądu wyjściowego jest ważna w falownikach pracujących na sieć, które Doktorant dopiero zamierza badać po zakończeniu rozprawy. Falownik pracujący bezpośrednio na obciążenie powinien zapewniać.

Przy bezpośrednim zasilaniu urządzeń jednofazowych prąd wyjściowy będzie zależeć od charakteru obciążenia. Może być ono liniowe lub nieliniowe, na przykład zawierać mostek jednofazowy na wejściu. Wówczas jakość prądu wyjściowego nie jest podstawowym zagadnieniem badawczym. Jednakże w pracy Doktorant ogranicza swoje badania do wąskiego zakresu obciążeń czysto rezystancyjnych, przy których wysoka jakość prądu wyjściowego świadczy jednocześnie o wysokiej jakości napięcia falownika jednofazowego. Ten zabieg pozwala Doktorantowi skupić się na zbadaniu wpływu podwójnej pulsacji mocy w obwodzie DC na kształt prądu obciążenia. Wyeliminowanie tego wpływu przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej jakości prądu wejściowego wymaga zatem albo zastosowania bardzo dużych kondensatorów w obwodzie impedancyjnym qZS albo, jak proponuje doktorant wielokrotnie mniejszego dodatkowego układu aktywnego bufora AEB.

W Rozdziale 2 Doktorant analizuje modele a następnie opisuje zależności i wzory projektowe jednofazowego falownika qZSI bez bufora aktywnego AEB. W tym celu przeprowadza analizę wielkosygnałową falownika qZSI, traktując tranzystory mostka jako źródła prądowe dla analizy składowej DC oraz jako źródła napięciowe dla analizy składowej częstotliwości podstawowej  $\omega$  oraz składowej  $2\omega$ . Dla składowej  $\omega$ , podczas pracy falownika na obciążenie nie ma przepływu prądu do obwodu impedancyjnego qZS ( $L_1$ - $C_1$ - $L_2$ - $C_2$ ). Z kolei dla składowej  $2\omega$  nie ma przepływu prądu w kierunku obciążenia. W konsekwencji jedynym sposobem zamknięcia się pętli dla przepływu prądu  $2\omega$  jest przepływ przez obwód impedancyjny, z rozdzieleniem na przepływ przez gałąź z dławik  $L_1$  i źródłem energii  $v_i$  oraz na przepływ przez gałąź z kondensatorem  $C_1$ . Im więcej składowej  $2\omega$  przepływa przez źródło  $v_i$ , tym gorszy kształt prądu wejściowego i pogorszenie warunków pracy np. modulu PV

podłączonego do wejścia. Z kolei, im większy przepływ prądu przez gałąź C1, tym większa zawartość  $2\omega$  na zaciskach DC falownika i tym większa zawartość harmonicznych (THD) w prądzie wyjściowym. Autor opisuje model falownika qZSI z uśrednianiem zmiennych za okres przełączania tranzystorów  $T_s$  analizując sekwencje przełączeń tranzystorów w poszczególnych gałęziach falownika z obwodem impedancyjnym qZS na wejściu i filtrem LC na wyjściu oraz z dołączonym obciążeniem rezystancyjnym. Autor zauważa, że w literaturze w analizie falownika jednofazowego qZSI rozróżnia się stany zwarć (shoot-through) i stany aktywne tranzystorów falownika ale już w stanach aktywnych nie dokonuje się rozróżnienia, który tranzystor górny przewodzi. Doktorant dowodzi, że ma to istotne znaczenie i błędna analiza prowadzi to do błędnych wyników. Doktorant w przeprowadzonej analizie dokonuje zatem rozróżnienie stanów aktywnych na 01 i 10 oraz potwierdza słuszność tego zabiegu odpowiednimi zarejestrowanymi przebiegami (rys. 2.5). Autor podkreśla również, że źródłem błędów analiz prezentowanych w literaturze jest używanie wyłącznie modeli małosygnałowych z pominięciem w nich składników nieliniowych, co autor stara się skorygować w swojej pracy - wykorzystując w tym celu wyniki uzyskane z analizy wielkosygnałowej. Uzyskane bardziej złożone wzory i formuły szczegółowe Autor prezentuje w Dodatku A. Finalnie, Autor uzyskuje model falownika qZSI, w którym zależności opisujące poszczególne prądy uwzględniają zawartość harmonicznej  $2\omega$ . W dalszej części pracy prowadzi to do uwzględnienia zawartości harmonicznej  $2\omega$  w zależności opisującej prąd obwodu DC we wzorach projektowych.

W drugiej części Rozdziału 2 Doktorant opisuje zależności i wzory projektowe jednofazowego falownika qZSI. Proces projektowania falownika qZSI wiąże się z koniecznością określenia stopni swobody w zakresie doboru elementów i syntezy układu sterowania. Autor zaczyna od przedstawienia wymagań projektowych, które są przedstawione w Tabeli 2.1. Wzoruując się na konkursie „Little Box Challenge” i dostępnych pozycjach literaturowych Autor zakłada moc wyjściowa 2000 W, która jednakże nie została później osiągnięta w badaniach eksperymentalnych. Następnie przechodzi do wzorów projektowych indukcyjności i pojemności filtra wyjściowego LC. Projekt filtra jest przeprowadzony pod kątem uzyskania jak największej gęstości mocy. Poprzez minimalizację objętości i masy filtra LC w sposób istotny można zwiększyć gęstość mocy całego falownika qZSI. Kompletny falownik qZSI wraz z filtrem wyjściowym LC musi spełniać określone limity norm kompatybilności elektromagnetycznej. Stąd zaproponowane przez Autora wzory na indukcyjność i pojemność filtra wyjściowego uwzględniają tłumienie przez filtr składowej różnicowej (Differential Mode HF Attenuation). Z nieznanых powodów Autor nie podaje wyprowadzenia ani źródła literaturowego podanych zależności (2.37) na indukcyjność  $L_o$  oraz

(2.38) na pojemność  $C_0$  filtra wyjściowego LC. Zależności te są częściowo częściowo są zrozumiałe, ale nie do końca, a ich interpretacja sprawia trudność. W opisie znajdujemy informację, że zależności uwzględniają tłumienie filtra wyjściowego LC,  $A_0=6$  dB oraz dopuszczalną zawartość harmonicznych w prądzie wyjściowym,  $THD = 2\%$ . W opisie Autor używa zamiennie zwrotów „output DM HF attenuation” oraz „output HF ripple attenuation”, nie podając jednakże stosownych wzorów ani definicji. Pewność odnośnie prawidłowości wzorów (2.37) i (2.38) jest ważna dla prawidłowej interpretacji wyników przedstawionych w postaci przestrzeni projektowej na rysunku 2.21. Jak podkreśla Autor, te same zależności na indukcyjność i pojemność filtra wyjściowego LC będą zastosowanie w projekcie finalnego urządzenia falownika qZSI z buforem aktywnym AEB. Wydaje się, że zwłaszcza ważny jest dobór pojemności, do której zacisków w przypadku filtra wyjściowego LC jest bezpośrednio podłączone obciążenie jednofazowe. Chociaż rzeczywiście nie stanowi to problemu w przypadku obciążenia czysto rezystancyjnego przyjętego w pracy.

Następnie Doktorant przystępuje do projektowania najważniejszej części falownika qZSI - obwodu impedancyjnego typu qZS. Zależności na prądy w gałęziach obwodu impedancyjnego, niezbędne do wzorów projektowych uwzględniają zawartość harmonicznej  $2\omega$ . Ponadto, Doktorant wprowadza współczynniki uwzględniające składowe napięcia z pulsacją  $2\omega$  na kondensatorach  $C_1$  i  $C_2$ . Tym samym zjawiska związane z pulsacją  $2\omega$  są uwzględnione we wszystkich zależnościach projektowych na pojemności  $C_1$  i  $C_2$  oraz indukcyjności  $L_1$  i  $L_2$  obwodu impedancyjnego qZS. Doktorant przeprowadza szereg analiz, których celem jest zminimalizowanie gabarytu pojemności i indukcyjności obwodu impedancyjnego qZS. Szczegółowe wyniki tych analiz w postaci charakterystyk są pokazane na rysunkach (2.7) - (2.10) oraz (2.13). Doktorant w sposób oryginalny opisał występowanie trybu nieciągnącego prądu niskiej częstotliwości (LF-DCM) – co objawia się występowaniem odkształcenia prądu w pewnych zakresach pracy falownika jednofazowego. Doktorant przeprowadził analizę doboru aktywnych przyrządów półprzewodnikowych – czterech tranzystorów SiC MOSFET mostka falownika i diody SiC wejściowej obwodu impedancyjnego qZS. Doktorant podsumowuje Rozdział 2 stwierdzeniem, że problem występowania pulsacji  $2\omega$  w oryginalnej konstrukcji jednofazowego falownika qZSI jest istotny i stanowi poważne ograniczenie tej topologii – uniemożliwiając jej konkurencyjność na rynku.

W Rozdziale 3 Autor przechodzi do opisu i analizy zastosowania w jednofazowym falowniku qZSI aktywnego bufora energii AEB. Doktorant dokonuje stosownych modyfikacji modeli wyprowadzonych w Rozdziale 2 - uwzględniając dołączenie aktywnego bufora energii AEB w obrębie obwodu impedancyjnego qZS. Wyniki analiz różnych wariantów topologii

AEB (o mocy ułamkowej oraz o pełnej mocy) jak również miejsca jego dołączenia w obrębie obwodu impedancyjnego qZS (równoległe do źródła  $v_i$ , równoległe do zacisków obwodu DC oraz równoległe do kondensatora  $C_1$  obwodu impedancyjnego) są porównywane z wykorzystaniem wizualnej reprezentacji w przestrzeni projektowej. Doktorant, używając wizualizacji w przestrzeni projektowej, dokonuje porównania sprawności i gęstości mocy jednofazowego falownika qZSI bez aktywnego bufora i z aktywnym buforem AEB. Dodanie AEB powoduje zmniejszenie sprawności ze względu na większą liczbę komponentów w przypadku falownika qZS z dodanym buforem. Jednakże jest to rekompensowane znacznym wzrostem gęstości mocy szczytowej, która może wzrosnąć z około 1,5 kW/dm<sup>3</sup> do niemal 7,5 kW/dm<sup>3</sup>. Jest to istotny wzrost gęstości mocy. Jak wynika z przeprowadzonej analizy porównawczej, większość punktów projektowych falownika qZS bez bufora aktywnego AEB można w przestrzeni projektowej zastąpić punktami projektowymi falownika qZS z buforem AEB przy osiąganym wyższej sprawności. W dalszej części rozdziału Doktorant dokonuje analizy strat. Szczegółowo porównuje dwa warianty układu bufora AEB dołączonego równoległe do kondensatora  $C_1$ : z przekształtnikiem typu buck, dla którego uzyskiwana jest największa gęstość mocy oraz z przekształtnikiem typu boost, dla którego uzyskiwana jest najwyższa sprawność.

Rozdział 4 jest poświęcony syntezy układu sterowania jednofazowego falownika qZSI z aktywnym buforem AEB dołączonym równoległe do kondensatora  $C_1$  obwodu impedancyjnego qZS. Doktorant stosuje znaną z literatury metodę uśredniania „*state-space averaging*” (w tym miejscu mogłaby już zostać przywołana pozycja literaturowa [104]) i dostosowuje ją w umiejętny sposób na potrzeby analizy całościowej topologii zawierającej dwie gałęzie tranzystorowe mostka falownika oraz gałąź tranzystorową bufora aktywnego AEB. Dzięki temu Doktorant umiejętnie wyprowadza (w dziedzinie ciągłej) model małosygnałowy całego układu jednofazowego falownika qZSI z aktywnym buforem AEB. Pozwoliło to Doktorantowi otrzymać wszystkie transmitancje niezbędne do syntezy układu sterowania oraz dokonania analizy stabilności układu sterowania zawierającego dwie zamknięte pętle regulacji: z regulatorem prądu dławika wyjściowego  $L_o$  oraz z regulatorem prądu dławika  $L_b$  aktywnego bufora AEB. Do realizacji zadań regulacji Doktorant zastosował znane z literatury regulatory proporcjonalno multi-rezonansowe (PMR – *Proportional Multi Resonant*). W układzie regulacji prądu wyjściowego  $i_{L_o}$  zastosowano składowe regulatory harmonicznym nieparzystych, do 29-tej, a w układzie regulacji prądu  $i_{L_b}$  dławika aktywnego bufora AEB – składowe regulatory harmonicznym parzystych, do 30-tej. Do badania stabilności Autor wykorzystał dostępną w programie MATLAB funkcję root locus. W



transmitancji zamkniętej pętli sterowania Doktorant uwzględnił opóźnienia wynikające z wykonywania algorytmu modulatora oraz czasu wykonywania i przetwarzania pomiarów (w MATLABIE zastosował aproksymację Padego 4-tego rzędu). Następnie Doktorant dokonał strojenia regulatorów proporcjonalno rezonansowych z wykorzystaniem analizy charakterystyk Bodego układu zamkniętego regulacji. Na zakończenie Doktorant dokonał weryfikacji układu w dziedzinie Z dokonując przekształcania układu czasu ciągłego do układu czasu dyskretnego z wykorzystaniem znanej z literatury transformaty Tustina (Tustin transform with a pre-warp at each resonant frequency). Ze względu na ograniczenia programu MATLAB, weryfikacja została przeprowadzona osobno dla każdej z częstotliwości regulatora PMR. Potwierdzające stabilność dyskretne lokalizacje biegunów i zer dla wszystkich składników rezonansowych zostały zebrane w jednej mapie biegunów-zer dla regulatora prądu  $i_{Lo}$  dławika wyjściowej (na rys. 4.6a) oraz dla regulatora prądu  $i_{Lb}$  dławika bufora aktywnego (na rys. 4.6b). Do realizacji praktycznej sterownika użyto mikroprocesora MCU o częstotliwości taktowania zegara 200MHz, co z pewnością stanowiło pewne ograniczenie dla realizacji całego cyfrowego układu sterowania z regulatorami PMR, przy założeniu, że tranzystory SiC MOSFET będą przełączane z częstotliwością 100kHz (we współczesnych układach przemysłowych o podobnym stopniu zaawansowania obliczeń, np. w filtrach aktywnych SiC, stosowane są już mikroprocesory o częstotliwości taktowania zegara 1GHz).

W Rozdziale 5 Autor opisał stanowisko badawcze, przedstawił program testów, który w dużej części odpowiada wymaganiom konkursu „Little Box Challenge” oraz omówił wyniki badań laboratoryjnych uzyskane podczas weryfikacji eksperymentalnej opracowanego prototypu jednofazowego falownika qZSI z aktywnym buforem AEB. Wzorując się na rozwiązaniu z konkursu „Little Box Challenge”, Doktorant do realizacji pojemności  $C_1$  i  $C_2$  każdorazowo wykorzystał bank wielowarstwowych kondensatorów ceramicznych (Multilayer Ceramic Capacitors MLCC) typu C5750X6S2W225K250KA w obudowie SMD. Kondensatory te charakteryzują się nieliniową charakterystyką – co zostało uwzględnione podczas testów eksperymentalnych i umożliwiają konfigurację połączeń dla uzyskania określonych wymiarów geometrycznych. Finalnie, Doktorant uzyskał kompaktową konstrukcję jednofazowego falownika qZSI z aktywnym buforem AEB przyłączonym do kondensatora  $C_1$  o wymiarach całkowitych: 170 mm x 170 mm x 90 mm.

Jako źródło energii w ustalonych punktach pracy falownika zastosowane zostały dwa zasilacze GEN-600-2.6TDK-LAMBDA o mocy 1,56kW każdy. Do badania układu przy skokach napięcia zastosowano zasilacz ITECH IT6018B-800-75 Regenerative Power System (18 kW, 800 V, 75 A). Badano współczynnik tętnień prądu wejściowego, zawartość drugiej

harmonicznej w prądzie wejściowym oraz współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w prądzie wyjściowym falownika qZS. Przeprowadzone testy miały na celu wykazanie pozytywnego wpływu zastosowania aktywnego bufora AEB oraz wykazanie, że opracowany układ jednofazowego falownika qZSI z aktywnym buforem AEB zapewnia żądaną jakość przebiegów prądu wejściowego i prądu wyjściowego dla różnych wartości współczynnika wzmocnienia  $B$  oraz dla szerokiego zakresu zmian rezystancji obciążenia i zmian napięcia wejściowego. Ponadto celem badań było zbadanie punktu pracy bufora  $D_b$  na zachowanie i właściwości układu. W badaniach laboratoryjnych, w trybie pracy jednofazowego falownika napięcia ( $B = 1$ ), przy zasilaniu z napięcia wejściowego  $v_i = 200V$  osiągnięto maksymalną moc 545W. Następnie przeprowadzono badania układu falownika qZSI przy zwiększaniu współczynnika podwyższania napięcia  $B > 1$  poprzez wprowadzanie stanów zwarć ST. Ze względu na ograniczenia stanowiska laboratoryjnego, wpływ zmian współczynnika wzmocnienia  $B > 1$  na pracę falownika qZSI został przetestowany przy istotnie obniżonej mocy i istotnie obniżonym napięciu, w porównaniu z postawionymi wymaganiami projektowymi. Przy zmiennej wartości współczynnika wzmocnienia  $B$  zauważono, że ze stopniowym wzrostem wartości  $B$  zawartość tętnień niskich harmonicznych napięcia kondensatora  $C_b$  bufora aktywnego wzrasta z powodu wzrostu prądu wyjściowego i wynikającego z tego wzrostu zapotrzebowania na energię buforowaną o pulsacji  $2\omega$ . Przy pracy bufora aktywnego nie zmieniły się wskaźniki jakości co potwierdza możliwość pracy falownika qZSI z aktywnym buforem AEB w szerokim zakresie napięcia wejściowego. Podobnie, przy obniżonej mocy i obniżonym napięciu wyjściowym wykazano dobre właściwości opracowanego układu przy zmianach obciążenia i zmianach napięcia wyjściowego w szerokim zakresie.

Rozprawa kończy się rozdziałem 6 zawierającym podsumowanie rozprawy, opis oryginalnego wkładu własnego Autora, spis 5 publikacji współautorskich Doktoranta, opublikowanych w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej, powiązanych z tematyką rozprawy oraz krótki opis propozycji dalszych badań stanowiących kontynuację rozprawy. Spośród pięciu wymienionych publikacji Doktoranta na uwagę zasługują dwa artykuły opublikowane w IEEE Transactions on Industrial Electronics (2018) oraz IEEE Transactions on Power Electronics (2019), z których pierwszy ma 11 cytowań, a drugi 25 cytowań (Google Scholar).

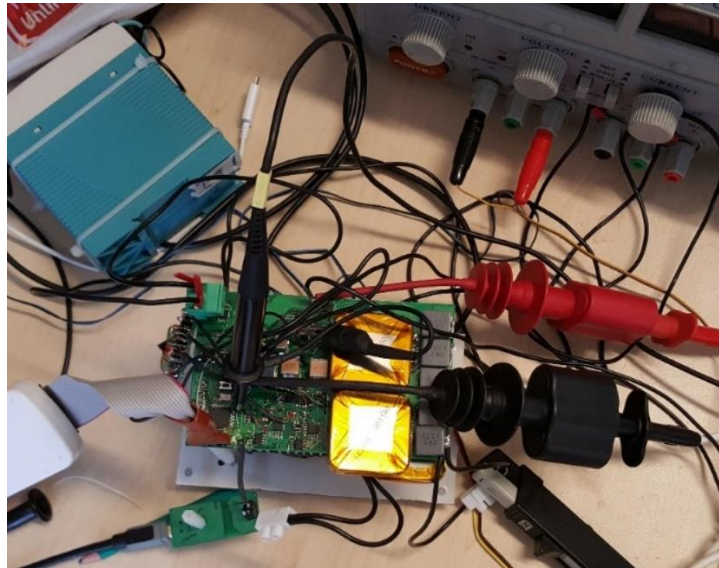
Dołączony do rozprawy spis literatury zawiera 117 pozycji, w tym trzy publikacje, których współautorem jest Kornel Wolski.

### **3. Uwagi ogólne**

Do uwag dyskusyjnych natury ogólnej jakie nasuwają się po zapoznaniu się z rozprawą doktorską należą:

- 1) Z powodu opisanych w pracy ograniczeń sprzętowych Autorowi nie udało się przeprowadzić testów prototypu jednofazowego falownika qZSI przy wymaganej mocy obciążenia 2000W. Stąd należy założyć, że analizy teoretyczne i symulacyjne powinny opierać się na sprawdzonych wzorach i zależnościach projektowych, o mocnej podbudowie teoretycznej. Pomimo częściowych wyjaśnień w opisie, przedstawione w Rozdziale 2 zależności: (2.37) na indukcyjność  $L_o$  oraz (2.38) na pojemność  $C_o$  filtra wyjściowego LC sprawiają czytającemu kłopot w interpretacji. Z jednej strony pojawiający się w zależności (2.37) składnik  $10^{A_o/-20}$  świadczy o uwzględnieniu tłumienia (attenuation) tętnień (rippli) prądu filtra wyjściowego LC, z drugiej zaś strony pojawiający się w zależności (2.37) pierwiastek kwadratowy z 54 może wskazywać, że dodatkowo we wzorze uwzględniono współczynnik znany z literatury jako RAF – Ripple Attenuation Factor, który tutaj może być zdefiniowany jako stosunek prądów wyznaczonych z (2.61) i (2.76). Na podstawie pracy trudno znaleźć inną interpretację wzoru (2.37), niż taką, że współczynnik tłumienia został uwzględniony dwukrotnie. Proszę zatem podać wyprowadzenie wzoru (2.37) bądź/i odpowiednie źródło literaturowe. Proszę podać definicję użytego parametru „Output DM HF attenuation”, którego nazwa w tekście nad wzorem (2.37) jest użyta również jako „output HF ripple attenuation  $A_o$ ”.
- 2) Czy jeżeli parametr  $A_o$ , który jest podany w Tabeli 2.1 w dB, występuje we wzorach (2.37) i (2.38) w wykładniku potęgi przy liczbie 10 – to nie powinien w tym wykładniku być dzielony przez liczbę wyrażoną w decybelach? Jak jest z wyprowadzeniem jednostek w zależnościach (2.37) i (2.38)?
- 3) W rozdziale 2 Autor mocno stwierdza, że tylko użycie aktywnego bufora AEB pozwala zmniejszyć gabaryt kondensatorów  $C_1$  i  $C_2$  obwodu impedancyjnego, a tym samym gabaryt całego falownika qZSI. Otóż w czasie trwania konkursu „Little Box Challenge” (2014-2016) i znacznie wcześniej też, były na rynku dostępne kondensatory elektrolityczne tantalowe o dużych pojemnościach i kompaktowej obudowie. Na przykład kondensator Quantic Evans typ TDD5110103 o pojemności 10mF na napięcie 110V ma wymiary 35.56mm x 35.56mm x 23mm. Taki same wymiary mają kondensatory 7.5mF/125V, 15mF/80V, czy 55mF/50V. Jednakże, żaden z finalistów LBC nie zdecydował się na użycie tych komponentów. Czy zastosowanie aktywnego bufora AEB będzie również konkurencyjne dla tak kompaktowych kondensatorów? W

załączeniu widok przykładu przekształtnika jednofazowego do obciążenia o mocy 2000W z kondensatorami Quantic Evan zrealizowanego wg wymagań Little Box Challenge (poza konkursem):



#### 4. Uwagi szczegółowe

Redakcja pracy jest bardzo staranna. Wyniki szeroko zakrojonych analiz i badań symulacyjnych zostały przedstawione w sposób przekonujący, jasno i zwięźle w postaci szeregu charakterystyk. Na szczególną uwagę zasługują starannie wykonane wizualizacje punktów projektowych falownika qZSI pokazane w przestrzeni projektowej (sprawność i gęstość mocy) oraz wizualizacja porównania punktów projektowych falownika qZSI współpracującego z buforem aktywnym AEB w różnych wariantach na rysunkach 3.13 – 3.17, a także porównanie układów bez bufora i z buforem AEB na rys. 3.10.

W pracy można znaleźć kilka niewielkich błędów językowych, których jednakże nie sposób było się ustrzec, zwłaszcza w rozdziale pierwszym dotyczącym wprowadzenia do rozprawy i analizy stanu literatury:

- strona 14, wiersz 1 góra: jest „high-density inverters”, raczej powinno być „high power density inverters”;
- podobnie, strona 81, wiersz 3 dół: jest “high-density 450-V MLCCs”, raczej powinno być: „high energy density”;
- we wstępie, strona 13, drugi akapit: „Single-phase inverters will play crucial role in the coming years due to their ability to interface the distributed, residential energy sources with the power grid”. Recenzent byłby ostrożny w powierzaniu kluczowej roli falownikom jednofazowym przyłączanym do sieci niskiego napięcia. Są one przyczyną

licznych problemów w sieciach dystrybucyjnych, m.in. asymetrii prądów i napięć fazowych – z powodu przepływu prądu o dużej wartości w przewodzie neutralnym i związanych z tym spadków napięć w przewodzie neutralnym. Zdaniem recenzenta rozwój przekształtników dla generacji rozproszonej może równie dobrze pójść w kierunku przekształtników DC-DC (w tym DAB DC-DC) dla sieci hybrydowych AC/DC bądź przekształtników DC-DC dla nowych sieci DC.

## 5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia obszerne i kompleksowe podejście do modelowania i analizy, projektowania i badań obiektu jakim jest jednofazowy przekształtnik podwyższająco-obniżający napięcie z wejściowym obwodem impedancyjnym, przeznaczony do współpracy z rozproszonymi źródłami energii niskiego napięcia.

Spośród kilkunastu znanych z literatury topologii falowników obniżająco-podwyższających z wejściowymi obwodami impedancyjnymi Doktorant wybrał topologię falownika qZSI, która została opublikowana jako jedna z pierwszych i stanowi z pewnością topologię najbardziej reprezentatywną dla tej klasy układów. Prezentowane do tej pory w literaturze modele falowników jednofazowych qZSI były zbyt mało dokładne i nie uwzględniały wszystkich zjawisk, zwłaszcza związanych z pulsacją mocy  $2\omega$  w obwodzie wejściowym falownika. Prowadziło to dużych rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń modeli analitycznych prezentowanych w literaturze, a uzyskiwanymi wynikami badań laboratoryjnych jednofazowych falowników qZSI. Jak dowodzi w rozprawie Doktorant, uniemożliwiało budowanie jednofazowych falowników qZSI o kompaktowej konstrukcji. Opracowanie w rozprawie dokładnych modeli jednofazowego falownika qZSI i przeprowadzenie analiz, zwłaszcza prądów z uwzględnieniem składowych o podwójnej pulsacji  $2\omega$  przepływających w obrębie obwodu impedancyjnego oraz przepływających pomiędzy źródłem, obwodem impedancyjnym, mostkiem tranzystorowym, filtrem wyjściowym LC i obciążeniem **wymagały zatem oryginalnego wkładu Autora**. Doktorant, poprzez zastosowanie wspomagającego układu aktywnego bufora energii, o wybranej i przeanalizowanej topologii, w obrębie wejściowego obwodu impedancyjnego jednofazowego falownika qZSI, **samodzielnie rozwiązał problem negatywnego wpływu pulsacji mocy  $2\omega$  w wejściowym obwodzie impedancyjnym na wymagane parametry komponentów pasywnych obwodu impedancyjnego**, co jak do tej pory było przyczyną relatywnie dużego gabarytu falownika jednofazowego z obwodem impedancyjnym i jego malej przydatności w gospodarce.

Kompleksowa analiza topologii falownika qZSI z aktywnym buforem energii AEB przeprowadzona przez doktoranta z wykorzystaniem specjalistycznych metod (m.in. metoda uśredniania stanu, metoda analizy modeli wielkosygnałowych, metoda analizy modeli małosygnałowych, metody analizy stabilności w dziedzinie ciągłej i dyskretnej) i specjalistycznych narzędzi (specjalistyczne oprogramowanie symulacyjne, stanowiska testowe ze specjalistyczną aparaturą pomiarową) może zostać, przy niewielkich nakładach, dalej wykorzystana do analizy innych topologii przekształtników jednofazowych z wejściowymi obwodami impedancyjnymi, w tym do układów z obwodami impedancyjnymi z dławikami sprzężonymi. Stanowi to o uniwersalności opracowanej przez Doktoranta metody i stanowi jej niewątpliwą zaletę.

Zastosowanie wspomagającego układu aktywnego bufora energii AEB o kompaktowej budowie, dołączonego równolegle do kondensatora C1 obwodu impedancyjnego, pozwoliło na ponad trzykrotne zwiększenie gęstości mocy jednofazowego falownika qZSI, co obecnie może się przyczynić do rozwiązania problemu dotychczasowej niskiej konkurencyjności jednofazowych falowników qZSI w porównaniu z innymi rozwiązaniami jednofazowych przekształtników DC-AC stosowanych w branży fotowoltaiki i branży urządzeń przenośnych zasilanych z akumulatorów.

Tym samym udowodniona została teza, postawiona w Rozdziale 1 rozprawy. Zastosowanie aktywnego bufora energii, razem z opracowaną algorytmiczną metodą projektowania, okazało się skuteczny, rozwiązaniem problemu zmniejszenia rozmiarów komponentów pasywnych obwodu impedancyjnego jednofazowego falownika qZSI. Ze względu na uzyskaną korzyść w postaci pełnej kontroli prądu wejściowego o wysokiej jakości parametrów, opracowany jednofazowy falownik qZSI może przyszłościowo mieć zastosowanie w przenośnych urządzeniach zasilanych z ogniw paliwowych.

**Za osiągnięcia własne Autora rozprawy uznaję:**

- ✓ Opracowanie uniwersalnego, uogólnionego, modelu analitycznego jednofazowego falownika quasi-Z-source (qZSI) umożliwiającego uwzględnienie różnych wariantów miejsca dołączenia aktywnego bufora energii AEB i zastosowania różnych metod modulacji szerokości impulsów napięcia.
- ✓ Opracowanie oryginalnej topologii falownika qZSI z odsprężeniem pulsacji mocy w obwodzie wejściowym poprzez kompensację pulsacji napięcia  $2\omega$  na kondensatorze C1 obwodu impedancyjnego z wykorzystaniem aktywnego bufora energii o topologii synchronicznego przekształtnika DC-DC typu buck (qZSI-bC1).

- ✓ Opracowanie kompleksowej strategii doboru komponentów pasywnych i aktywnych falownika qZSI-bC1, uwzględniającej zarówno maksymalizację gęstość mocy, jak i maksymalizację sprawności.
- ✓ Zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie prototypu falownika qZSI-bC1
- ✓ Opracowanie, weryfikacja symulacyjna, implementacja w mikrokontrolerze (MCU) i weryfikacja eksperymentalna układu sterowania falownika qZS z dwoma pętlami regulacji prądu wyjściowego falownika qZS oraz prądu dławika aktywnego bufora energii AEB, obejmującego generatory sygnałów referencyjnych, regulatory proporcjonalno-rezonansowe (strojenie, dobór nastaw), modulator, a także procedurę badania stabilności opracowanego układu.
- ✓ Przeprowadzenie zaplanowanych testów laboratoryjnych opracowanego prototypu falownika qZS-bC1 o kompaktowej konstrukcji oraz analiza uzyskanych wyników.

## 6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Kornela Wolskiego pt. „**Single-Phase Quasi-Z-Source Inverter with Active Energy Buffer**” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata i stanowi samodzielny wkład doktoranta w obszarze energoelektroniki należącej do dyscypliny Elektrotechnika (nowa dyscyplina Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne) i przyczynia się do poszerzenia wiedzy w zakresie analizy i metod sterowania jednofazowych przekształtników obniżająco-podwyższających napięcie przeznaczonych do współpracy z rozproszonymi źródłami energii niskiego napięcia.

**W związku z tym, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie warunki i wymagania określone w art. 13 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym, stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

