

dr hab. inż. Maria Wrzuszcak
emerytowana prof. Politechniki Opolskiej

Opole, dn. 20. 04. 2023 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 25.04.2023
nr 13 zat.

RECENZJA ROZPRAWY

przedłożonej

Radzie Dyscypliny Automatyka Elektronika Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Śląskiej

celem uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżyniero-
technicznych

w dyscyplinie automatyka elektronika elektrotechnika i technologie kosmiczne

Tytuł rozprawy:

**Redukcja zniekształceń napięcia wyjściowego falowników napięcia przeznaczonych
do systemów UPS dla normatywnych obciążeń**

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Dyga

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Rymarski

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Bernacki

Podstawa opracowania: zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Pani Prof. Moniki Kwoka zgodnie z uchwałą nr 92/2022 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej z dnia 20 grudnia 2022 r.

1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Rozprawa doktorska zajmuje się zagadnieniami zastosowania różnych metod w celu zmniejszenia zniekształceń napięcia wyjściowego falowników jedno- i trójfazowych dla statycznych i dynamicznych, liniowych i nieliniowych obciążeń, zdefiniowanych w obowiązujących przepisach normalizacyjnych. Falowniki są podstawowymi elementami zespołów bezprzerwowego zasilania UPS a także układów przetwarzania napięcia DC na AC między innymi w sieciach z instalacjami fotowoltaicznymi.

W systemach UPS dąży się do uzyskania jak najniższej zawartości harmonicznych, aby osiągnąć jak najlepsze odwzorowanie sygnału sinusoidalnego o zadanej częstotliwości (50 Hz). Jakość napięcia wyjściowego falownika dla obciążeń statycznych oceniana jest na podstawie współczynnika zniekształceń THD (total harmonic distortion). Na jego podstawie wyznacza się również klasę urządzenia producenta. Dla obciążenia dynamicznego normatywnymi parametrami są natomiast czas dojścia do stanu ustalonego oraz wartość przeregulowania amplitudy napięcia wyjściowego.

W związku z co raz szerszym zastosowaniem falowników napięcia jak i wymaganiami jakie muszą spełniać współpracując z siecią energetyczną tematyka pracy jest aktualna i ważna. Recenzowana praca ma charakter teoretyczno – doświadczalny.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej i informacje o jej częściach składowych.

Praca składa się z 14 rozdziałów i bibliografii (141 stron) oraz dodatku w postaci kopii sześciu najważniejszych publikacji współautorskich Pana mgr inż. Łukasza Dygi związanych tematycznie z tezą rozprawy. Publikacje te (w języku angielskim) pochodzą ze znaczących czasopism wykazywanych w Web of Science.

Rozdział pierwszy i drugi stanowią wstęp do pracy, w których Autor uzasadnił podjęcie tematu oraz sformułował tezę rozprawy. W rozdziale trzecim przedstawiono wymagania co do jakości napięcia wyjściowego falowników w oparciu o obowiązujące normy a w rozdziale czwartym dokonano podziału falowników oraz omówiono skrótowo sposoby ograniczania występowania zniekształceń w napięciu wyjściowym.

W rozdziale piątym Autor zajmuje się wpływem sprzężenia zwrotnego na jakość napięcia wyjściowego i wprowadza dyskretny model falownika bazujący na równaniach stanu.

W rozdziale szóstym omówiono projektowanie filtra wyjściowego falownika – dobór elementów L, C.

W kolejnym, siódmym rozdziale przedstawiono zasady sterowania przełącznikami mostka falownika. Omówiono selektywny sposób eliminacji niepożądanych harmonicznych metodą SHE (ang. Selective Harmonic Elimination) oraz ograniczania liczby przełączeń stosując metodę modulacji wektora przestrzennego SV PWM (ang. Space Vector Pulse Width Modulation). Autor przedstawił podstawy teoretyczne tych metod, między innymi algorytm obliczania kątów przełączeń możliwy do zrealizowania w systemie mikroprocesorowym. Autor rozważył pracę falownika z obciążeniem typu gwiazda oraz trójkąt i przedstawił transformację układu trójfazowego do dwufazowego ortogonalnego stosując transformatę Clarka oraz transformację odwrotną z zastosowaniem przekształcenia odwrotnego Clarka. W p. 7.4. Autor przedstawił trzy typy modulacji jednofazowej, 3-poziomowej, stosowanych w falownikach z mikroprocesorami.

Rozdział ósmy to przedstawienie układu sterowania nadążnego typu pasywnego dla falownika jednofazowego. Na podstawie cytowanej literatury przedstawiono model falownika jednofazowego jako układ typu MISO ze sterownikiem PWM, przełącznikiem mostkowym i filtrem wyjściowym. Zapisano równania różnicowe w zastosowaniu do sterowania pracą falownika. Następnie model ten rozszerzono dla układu trójfazowego oraz zmodyfikowano sterowanie nadążne modelu opisanego macierzowo. Sterowanie falownika zrealizowano w wirującym układzie współrzędnych. Występujące tam wzajemne oddziaływania między

zmiennymi Autor wytłumił poprzez wprowadzenie specjalnego sterowania interconnection damping. Zależności energetyczne systemu zapisano przy pomocy Hamiltonianu. Uwzględniono warunki stabilności a także ograniczenia wzmocnienia prądu, napięcia i wzmocnienia regulatora. Na podstawie zapisanych zależności zbudowano model falownika trójfazowego w programie Matlab/Simulink. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 8.31, 8.4.1, 8.4.2. Badania przeprowadzono dla obciążenia liniowego (rezystancyjnego) oraz nieliniowego dynamicznego. Uzyskano zmniejszenie wartości współczynnika THD z około 6% do około 2,5% w układzie trójfazowym dla obciążenia nieliniowego.

Po modyfikacji sterowania – zastosowania PBC2 uzyskano redukcję błędu z ok. 12% do 2% dla napięć międzyfazowych przy przełączaniu co 10ms.

W rozdziale dziewiątym opisano zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie falownika. Wybrano metodę MPC (ang. Model Predictive Control). Ten rodzaj sterowania falownikiem przebadano praktycznie korzystając z dostępnego stanowiska badawczego z płytą sterującą dSPACE DS5101 (z tak zwanym. „*Real Time Interface*” umożliwiającym sterowanie rzeczywistym obiektem z poziomu oprogramowania Matlab/Simulink z pakietem dSpace). Autor przedstawił model matematyczny układu trójfazowego falownika z obciążeniem typu gwiazda bez modulatora, podał wzory opisujące układ oraz określił zero-jedynkowo stany przełączeniowe kluczy tranzystorowych mostka na wejściu. Następnie wyprowadził dyskretny model sterowania dla chwil $(k + 1)$. W oparciu o funkcję kosztów zapisaną wzorem (9.4.5) wykonywał obliczenia predykcji prądów i napięć filtra dla wszystkich możliwych wektorów napięcia wejściowego. Autor dysertacji wprowadził modyfikację metody, wprowadzając do kryterium jakości dodatkowo wielkość zależną od pochodnej napięcia wyjściowego filtra, prądu dławika, częstotliwości sygnału referencyjnego i wartości pojemności kondensatora. W p. 9.5 przedstawiono wyniki symulacji MPC dla falownika jedno- i trójfazowego z nieliniowym obciążeniem dla kilku różnych wartości L, C .

W rozdziale dziesiątym porównano efektywność sterowania predykcyjnego MPC i nadążnego dla tych samych parametrów układu. Wyniki porównania, w postaci wartości współczynnika THD zestawiono tabelarycznie (Tab. 10.1.1). Przeprowadzono również badania falownika ze sterowaniem predykcyjnym firmy Danfos typ 131F podczas odbywania stażu naukowego w Aalborg University w Danii.

Rozdział jedenasty zatytułowano: „Zarządzanie przepływem energii w systemach UPS wykorzystujących sieci impedancyjne jako sposób na obniżenie zniekształceń napięcia wyjściowego”. Omówiono redukcję zniekształceń w trybie ładowania akumulatora, współpracę falownika z siecią impedancyjną oraz przeanalizowano pracę falownika z ogniwem fotowoltaicznym w trybie pracy w punkcie odpowiadającym maksimum mocy falownika. Badania eksperymentalne przeprowadzono na pojedynczym panelu symulatora PV firmy ITECH o symbolu IT6525C. Wyniki przedstawiono na rysunkach od 11.3.4. do 11.3.9.

W rozdziale dwunastym przeanalizowano wpływ częstotliwości przełączania na efektywność zastosowanych sterowań.

W rozdziale trzynastym zatytułowanym: „Nowe metody oceny jakości napięcia wyjściowego falowników” przedstawiono wykorzystanie ciągłej transformaty falkowej CWT do oceny jakości napięcia wyjściowego dla konkretnych częstotliwości i czasu. Do analizy Autor wybrał falkę Morse’a. Zaproponował zmodyfikowany współczynnik oceny jakości napięcia bazujący na obliczeniach objętości pod wykresem 3D skalogramu (wzór 13.3.2).

Rozdział czternasty stanowi podsumowanie pracy.

3. Ocena zastosowanych metod badawczych oraz ocena omówienia wyników badań

W rozdziale 2.2 Autor sformułował następującą tezę:

Zmniejszenie poszczególnych zniekształceń napięcia wyjściowego falownika można uzyskać zarówno poprzez odpowiedni projekt i dobór parametrów filtra wyjściowego, przez zastosowanie odpowiedniego liniowego układu regulacji jak i przez zastosowanie układów bilansujących energię w układach z sieciami impedancyjnymi zasilanymi z ogniw PV. Kryteria oceny zniekształceń napięcia wyjściowego muszą brać pod uwagę zmiany parametrów napięcia wyjściowego dla wszystkich obciążeń zdefiniowanych w normach, biorąc pod uwagę limity dopuszczalnych wartości harmonicznych, czas dojścia do stanu ustalonego oraz wielkość przeregulowania w zależności od typu obciążenia układu.

W rozdziałach od 4 do 13 Autor przeanalizował i przebadał różne metody redukcji zniekształceń napięcia wyjściowego falownika w układach bezprzerwowego zasilania UPS a więc możliwość zmniejszenia zniekształceń poprzez stosowanie odpowiednich filtrów wyjściowych, odpowiednio efektywne układy regulacji i sterowany przepływ energii w układach falowników współpracujących z ogniwami fotowoltaicznymi, w których pożądana jest praca w punkcie maksymalnej mocy MPP. Zastosował i porównał dwie metody sterowania falownika: sterowanie nadążne PBC oraz predykcyjne MPC, jednocześnie wskazując na ograniczenia tych metod. Zastosowanie zmodyfikowanego przez Autora sterowania typu „passitivity”, oznaczonego IPBC2 pozwoliło uzyskać szybszą reakcję falownika na zmiany typu obciążenia, również obciążenia dynamicznego nie zrównoważonego. Wyniki porównania wartości współczynnika zawartości harmonicznych THD uzyskane przy sterowaniu PBC i MPC dla różnych obciążeń przedstawione zostały w postaci wykresów (rys. 10.1.1 do 10.1.3) oraz zestawienia w tabeli 10.1.1. Przedstawione badania porównawcze PBC i MPC dotyczyły falowników trójfazowych ze zrównoważonym lub niesymetrycznym obciążeniem, również dynamicznie przełączanym.

Projekty układów sterowania prowadzono najpierw teoretycznie (wyznaczenie modelu matematycznego), potem Autor przeprowadzał symulację w programie Matlab/Simulink a następnie przeprowadzał badania na eksperymentalnym falowniku sterowanym 32-bitowym systemem mikroprocesorowym (STM32F407VG) lub falowniku sterowanym układem MicroLabBox typu „Real Time Interface” (Matlab/Simulink/dSpace).

Autor oceniał również odporność zastosowanych sterowań predykcyjnych i nadążnych na zmiany parametrów filtra wyjściowego. Najmniej odporny na zmiany parametrów układu był regulator SISO - deadbeat. Dlatego był on wykorzystywany tylko do identyfikacji opóźnień w układzie zamkniętym falownika.

Autor wykazał się umiejętnością wykorzystania metod analizy sygnałów, w tym metod czasowo – częstotliwościowych. Na podstawie analizy falkowej napięcia wyjściowego falownika z wykorzystaniem falek Morse’a, zaproponował, aby objętość obliczana pod falką podstawową (całka po objętości) była miarą zniekształcenia sygnału. Autor nie określił jednak granic całkowania. W tabeli 13.5.1 zestawiono uzyskane wartości tej proponowanej

miary oznaczonej QWF oraz THD i WTHD (weighted total harmonic distortion obliczany na podstawie analizy falkowej) dla różnych obciążeń falownika.

Doktorant wykazał się znajomością i umiejętnością stosowania różnych metod badawczych i metod analizy adekwatnych do rozwiązywanego problemu naukowego. Udowodnił prawdziwość postawionej na początku dysertacji tezy, wykazując skuteczność proponowanych rozwiązań dla falownika jedno- i trójfazowego nawet w przypadku nie zrównoważonych obciążeń i wprowadził nowy współczynnik zniekształceń napięcia wyjściowego, zależny od rodzaju obciążenia. Wyniki badań naukowych przeprowadzonych w ramach realizacji pracy doktorskiej zostały przez Autora opublikowane w liczących się, recenzowanych czasopismach.

4. Analiza źródeł bibliograficznych

Bibliografia obejmuje 115 pozycji tematycznie związanych z pracą. Większość stanowią publikacje z ostatnich kilku lat z liczących się czasopism międzynarodowych i polskich, konferencji międzynarodowych jak również norm PN EN dotyczących falowników. W spisie umieszczono 13 publikacji w których doktorant jest autorem lub współautorem. W dwóch publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem. Jeden z tych artykułów został opublikowany w Applied Science w roku 2022 a drugi w języku angielskim w Przeglądzie Elektrotechnicznym z roku 2020. Ponadto Pan mgr inż. Łukasz Dyga jest współautorem dwu publikacji w wysoko punktowanym czasopiśmie Energies, MDPI (z roku 2019 i 2021) a także w IEEE Transaction on Industry Application (2019) i Elektronika IR Elektrotechnika (2018). W publikacjach współautorskich wysoko punktowanych, których kopie dołączono do pracy, znajdują się wyszczególnienia wkładu poszczególnych autorów.

5. Praktyczne zastosowanie wyników badań

Porównanie efektywności sterowań nadążnego i predykcyjnego falownika pozwala lepiej dostrzec zalety sterowania MPC ze względu na brak modulatora PWM, ponieważ steruje się bezpośrednio wektorem przestrzennym, co może znaleźć szersze zastosowanie w systemach zasilania. Rezultaty pracy są ważne i mogą być wykorzystane w układach UPS oraz w układach falowników współpracujących z ogniwami fotowoltaicznymi. Zagadnienie uzyskania jak najmniejszych wartości współczynnika zawartości harmoniczných jest kluczowe w systemach przetwarzania napięcia DC na AC.

6. Informacja o nieprawidłowościach i dostrzeżonych błędach

Str. 43 równanie $y = Cx$ powtórzono dwukrotnie, powinno być objaśnienie x – wektor stanu;
Str. 48 w zapisie równania 5.3 powinno być x ze znakiem transponowane;
Str. 53 w tytule rozdz. 7 słowo zasady należałoby zamienić na metody;
Str. 60 błędy numeracji rysunków 7.1.1 do 7.1.3;
Str. 82 pojawia się wielkość λ i odniesienie do wzoru (9.2.14), którego nie ma w rozdz.9.2. Wzór o tej numeracji pojawił się w rozdz. 9.4. na str.86.
Str. 87 λ to waga a nie parametr ważony;

Str. 87 Rozdz. 8.7 kończy się wzorem, brak tekstu z komentarzem;
 Str. 93 podpis pod rys. znalazło się niepotrzebne „w napięcia”;
 Str. 96 niepoprawny styl ostatniego zdania;
 Str. 97 4 linia od góry słowa „obliczając odpowiednio” należałoby zastąpić przez „dobierając odpowiednio”;
 Str. 97 6 linia od dołu: określenie „znickształceń” jest niewłaściwe;
 Str. 99 pierwsze zdanie pod rysunkiem – niepoprawny styl;
 Str. 103 w zapisie wzorów (11.2.16) brak odstępu;
 Str. 119 druga linia od góry, literówka, powinno być „Heisenberga”;
 Str. 119. Rozdz. 13.2. opisując falkę Morse’a należało zacząć od zapisu matematycznego tej falki i objaśnień β , γ . Nie można odwoływać się w tekście do wzoru, którego jeszcze nie przedstawiono.
 Str. 119 3 linia od dołu, tekst: „przejście z poziomu skali do dziedziny częstotliwości” powinien brzmieć: „przejście z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości”;
 Rozdz. 13.4. brak odniesień i komentarzy do wyników analizy falkowej przedstawionych na rysunkach. Rozdział nie powinien kończyć się wzorem lub rysunkiem bez omówienia. Jest wprawdzie osobny Rozdział 13.6 zatytułowany „wnioski” ale znajdują się tam raczej stwierdzenia ogólne.

7. Ocena ogólna

Autor wykazał się wiedzą z dziedziny energoelektroniki, automatyki i elektrotechniki. Odbываяc staż naukowy na Uniwersytecie w Danii współpracował z naukowcami z Danii oraz nawiązał kontakty z naukowcami z innych krajów (Uniwersytet W Kairze) czego rezultatem są dwie wspólne publikacje w Applied Sciences (2022) oraz Energies (2019):

- Dyga Ł., Alhasheem M., Davari P., Rymarski Z.: Robustness of Model-Predictive and Passivity-Based Control in the Three-Phase DC/AC Converter Application. Applied Sciences. 2022; 12(9):4329, DOI: 10.3390/app12094329.
- Rymarski Z., Bernacki K., Dyga Ł., Davari P.: Passivity-Based Control Design Methodology for UPS Systems, Energies 2019, 12(22), 4301, DOI: 10.3390/en12224301.

Świadczą one o aktualności tematyki oraz o tym, że prace doktoranta wnoszą nowe wartości. Wykazane błędy i nieścisłości mają charakter błędów edytorskich i nie umniejszają wartości przedstawionej do recenzji pracy.

Przedstawioną do oceny pracę mgr inż. Łukasza Dygi oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że praca spełnia warunki określone w art.14 ust. 2 pkt 2 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, z późn. zm), a także § 6 ust.1 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261), w

związku z art.179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r.- Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (DZ. U. z 2018 r. poz.1669 z późn. zm)

i wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Dygi do publicznej obrony.

Równocześnie wnioskuję o wyróżnienie pracy ze względu na wartości merytoryczne rozprawy. Wyniki rozprawy zostały opublikowane w formie prac oryginalnych w recenzowanych czasopismach posiadających Impact Factor, przy czym kandydat ubiegający się o tytuł doktora w dwóch z nich był pierwszym autorem.

.....
dr hab. inż. Maria Wrzuszczak