

dr hab. inż. Przemysław Ptak

Gdynia, 5.05.2023 r.

Profesor Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 19.05.2023

nr 15 zał.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

złożonej przed

Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Politechniki Śląskiej

celem uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk

inżynieryjno-technicznych w ww. dyscyplinie

Tytuł rozprawy doktorskiej:

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

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Łukasz Dyga

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

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: dr inż. Krzysztof Bernacki

Podstawa formalna opracowania recenzji: pisemne zlecenie recenzji otrzymane od Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, Pani dr hab. inż. Moniki Kwoka, prof. PŚ zgodnie z uchwałą ww. Rady Dyscypliny z dnia 20 grudnia 2022 r.

1. Cel, teza oraz zakres przedstawionej rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Dygi dotyczy metod zmniejszania zniekształceń napięcia wyjściowego falowników napięcia stosowanych w systemach bezprzerwowego dostarczania zasilania (UPS). Systemy te są stosowane wspólnie z instalacjami fotowoltaicznymi, a także mogą współpracować z elektrolizerami do zasilania ich z magazynów energii elektrycznej o napięciu roboczym równym 48 V. Doktorant przedstawia zagadnienia różnych metod poprawy jakości napięcia wyjściowego falowników dla statycznych i dynamicznych, liniowych i nieliniowych obciążeń zdefiniowanych w normie EN-62040:3 dla jedno i trójfazowych falowników napięcia o maksymalnej mocy wyjściowej nie przekraczającej 3 kW.

Doktorant jasno sprecyzował tezę rozprawy doktorskiej, która brzmi następująco:

„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”

Doktorant swoje badania eksperymentalne rozpoczął od analizy wpływu sprzężenia zwrotnego i filtra wyjściowego $L_F C_F$ w szerokim zakresie zmian częstotliwości pracy. Ponadto doktorant dobrał odpowiedni schemat i rodzaj modulacji. Zaprojektował filtr wyjściowy $L_F C_F$ i przedstawił wyniki badań eksperymentalnych dotyczących dławików w modelu eksperymentalnym pracującym z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego oraz wdrożył poszczególne metody sterowania nadążnego, również z wykorzystaniem sterownia predykcyjnego. Dla porównania efektywności działań poszczególnych algorytmów sterowania doktorant przeprowadził symulacje jak i weryfikacje na modelu eksperymentalnym stosując się do zaleceń normy EN-62040:3.

Po analizie rozprawy doktorskiej stwierdzam, że ma ona zdecydowanie charakter teoretyczno-konstrukcyjno-eksperymentalny.

2. Charakterystyka poszczególnych części składowych rozprawy doktorskiej

Doktorant na samym wstępie wyjaśnił znaczenie poszczególnych skrótów i symboli wykorzystywanych w ocenianej rozprawie doktorskiej. Praca jest zbudowana z czternastu rozdziałów wliczając podsumowanie otrzymanych wyników badań eksperymentalnych. W rozdziale pierwszym doktorant świetnie przedstawił krótki wstęp informacyjny oraz uzasadnił podjęcie tematu rozprawy doktorskiej. Następnie zwięźle opisał cel pracy oraz postawioną tezę badawczą. W rozdziale trzecim zostały w sposób wyczerpujący opisane normy dotyczące wymagań jakości napięcia wyjściowego w falownikach jedno i trójfazowych. W rozdziale czwartym przedstawiono w jasny sposób podział topologii falowników napięcia oraz sposoby ograniczenia występowania zniekształceń napięcia wyjściowego. W rozdziale piątym przedstawiono układ zastosowanego sprzężenia zwrotnego oraz jego wpływ na jakość napięcia wyjściowego. Kolejne rozdziały dotyczą opisu metody projektowania filtra wyjściowego (rozdział 6) zasad sterownia tranzystorami kluczującymi mostka na wejściu falownika (rozdział 7). Rozdział ósmy oraz dziewiąty opisują metody sterowania typu PBC jako sterowanie nadążne oraz sterowanie predykcyjne z wykorzystaniem modelu dyskretnego MPC. Rozdział ósmy oraz dziewiąty zawierają zarówno wyniki badań eksperymentalnych jak wyniki symulacji komputerowych z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink. Doktorant w rozdziale 13 głęboko przeanalizował zagadnienie teorii falek w celu pozyskania nowych metod oceny jakości napięcia wyjściowego w falownikach poddawanych badaniom eksperymentalnym. W podsumowaniu przedstawiono ocenę realizacji postawionej tezy rozprawy doktorskiej oraz wskazano dalsze plany badawcze co świadczy o dużej dojrzałości naukowej doktoranta.

3. Ocena zastosowanych metod badawczych oraz przedstawionych wniosków

Analizując metody badawcze zastosowane przez doktoranta w jego rozprawie doktorskiej można zauważyć trzy osobne wątki, które analizował. Pierwszym z nich było porównanie zmodyfikowanych metod sterowania w układach o więcej niż jednej zmiennej wejściowej, tzw. układy MISO, które wykazują dużą odporność na zmiany parametrów oraz szybkość i jakość regulacji obiektu. Doktorant podjął się także realizacji ulepszonego sterowania typu „passivity” oraz modelu „predictive control” w odniesieniu do poprawy jakości napięcia wyjściowego falowników V_{OUT} w zastosowaniach dla systemów UPS, dla różnych typów obciążenia, ilości faz, warunków pracy oraz zmiany parametrów filtra wyjściowego $L_F C_F$.

W kolejnym kroku doktorant zaproponował metodę sterowania przepływem energii w układzie falownika wykorzystującej złącze DC, układ peryferyjny podwyższający napięcie wyjściowe, akumulator, ogniwo PV oraz falownik DC/AC jako jeden ze sposobów na obniżenie zniekształceń napięcia wyjściowego przy jednoczesnych korzyściach takich jak niskie straty mocy oraz utrzymanie punktu maksymalnej mocy ogniwa PV.

Ostatnim etapem badawczym było zaproponowanie jednego wspólnego współczynnika oceny jakości napięcia wyjściowego dla różnych typów obciążenia w oparciu o analizę czasowo – częstotliwościową, ciągłą transformatę falkową dla zadanej częstotliwości przełączania f_c .

4. Ocena doboru źródeł bibliograficznych

Bibliografia prezentowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 115 pozycji tematycznie mocno powiązanych z rozprawą doktorską. Należy zauważyć, że w skład bibliografii wchodzi zarówno czasopisma o wysokim Impact Factorze, a także takie czasopisma jak Przegląd Elektrotechniczny, czasopisma z wydawnictwa MDPI, materiały konferencji krajowych jak i międzynarodowych, a także co najważniejsze prace naukowe znajdujące się w kwartyle Q1. W wykazie literatury znajduje się 13 publikacji w których doktorant był autorem lub współautorem, w tym jedna praca w czasopiśmie Applied Sciences gdzie doktorant jest głównym autorem. Doktorant posiada również dwie prace w czasopiśmie Energies oraz jedną pracę w IEEE Transaction on Industry Applications z 2019 roku.

Należy również zauważyć, że doktorant wskazał w literaturze jako pozycję swoją pracę magisterską, której kontynuacją są badania eksperymentalne przedstawione w analizowanej rozprawie doktorskiej.

5. Analiza możliwego zastosowania praktycznego przedstawionych wyników badań

Analizując wyniki badań przedstawione w rozprawie doktorskiej można zauważyć przewagę oraz zalety stosowania sterowania predykcyjnego MPC, głównie ze względu na brak zastosowania regulatora PWM, który był do niedawna bardzo szeroko stosowany do sterowania tranzystorami kluczującymi w mostkach falowników napięcia. Analizując literaturę oraz nowe rozwiązania konstrukcyjne można wywnioskować, że projektanci systemów zasilania będą zauważać zalety sterowania predykcyjnego i stosować sterowanie za pomocą wektorów przestrzennych. Jednym z prekursorów sterowania za pomocą wektorów przestrzennych w swoich pracach teoretycznych i praktycznych jest Prof. Iwaszkiewicz.

Analizując wyniki badań eksperymentalnych doktoranta przedstawione w rozprawie doktorskiej możemy zauważyć, że sterowanie wektorowe daje bardzo dobre rezultaty co do polepszania wartości współczynników odpowiadających za jakość napięcia wyjściowego falowników i świetnie nadaje się do pracy w systemach „off – grid”, gdzie falownik napięcia pracuje na magazyn energii elektrycznej i nie jest fizycznie połączony z siecią dystrybucyjną energii elektrycznej. Sterowanie wektorowe może prowadzić również do mniejszych strat mocy w układach falowników napięcia, a co za tym idzie do zmniejszania wielkości układów chłodzących elementy kluczujące, co w konsekwencji prowadzi do miniaturyzacji układów energoelektronicznych.

Układy falowników napięcia analizowane przez doktoranta w rozprawie doktorskiej bardzo dobrze nadają się do współpracy w sieciach „off-grid” w celu zasilania układów elektrolizerów z magazynu energii elektrycznej w celu pozyskania dodatkowej energii z magazynu wodoru, który może występować w systemie „off-grid”. Takie rozwiązania są opracowywane w zespole naukowym Prof. Góreckiego z Uniwersytetu Morskiego w Gdyni.

Wykorzystywana przez doktoranta w analizach ciągła transformata falkowa także jest szeroko stosowana w przemyśle stoczniowym w testowaniu systemów energetycznych jednostek pływających w celu identyfikowania zapadów napięcia oraz analizy kształtu napięcia w systemach dystrybucyjnych.

6. Analiza spostrzeżeń i niejasności w rozprawie doktorskiej

- Na str. 15 rozprawy doktorskiej można zauważyć stwierdzenie, że największy wpływ na jakość napięcia wyjściowego mają początkowe harmoniczne częstotliwości podstawowej. Należy wspomnieć, że zespół Prof. Janusza Mindykowskiego z Uniwersytetu Morskiego w Gdyni wykazał w swoich pracach, że należy obserwować widmo harmonicznych w energetycznych systemach okrętowych w zakresie 3,5 kHz (koło 70 harmonicznej) i doszukiwać się tam dużych zniekształceń wpływających na wynik współczynnika THD_U .
- Można znaleźć strony na których znajduje się zbyt dużo wolnego miejsca.
- Brakuje podania wykazu prac autorskich co pomogło by w analizie prac w których doktorant jest współautorem.
- Kilka razy zauważono w tekście rozprawy doktorskiej brak wyjaśnienia zastosowanego skrótu.
- W tekście rozprawy doktorskiej doktorant wymiennie używał oznaczenia V_{OUT} oraz V_{REF} jako oznaczenia napięcia wyjściowego falownika, co może wprowadzać błędy w analizie rozprawy doktorskiej.

7. Analiza ogólna przedstawionej rozprawy doktorskiej

Doktorant swoją pracę doktorską oparł w głównej mierze na trzynastu publikacjach w których był współautorem. Należy zaznaczyć, że swoje badania eksperymentalne prowadził nie tylko w laboratoriach Politechniki Śląskiej, ale również wyjechał na staż naukowy do Danii, na Uniwersytet w Aalborgu, tak dobrze znany dzięki pracy zespołu Prof. Frede Blabjerga oraz jego pracom z zakresu energoelektroniki. Podczas trzymiesięcznego stażu w Danii mgr inż. Łukasz Dyga współpracował z Prof. Pooya Davari, badając wspólnie właściwości sterowania predykcyjnego głównie w trójfazowych falownikach napięcia. Nie jest to jedyna współpraca zgraniczna doktoranta, ponieważ współpracował bardzo blisko również z Dr. Mohammedem

Alhasheem z Arab Academy for Science w Kairze w Egipcie. Można stwierdzić, że największy wpływ na jakość rozprawy doktorskiej wywarły wyniki badań eksperymentalnych opublikowane w czasopiśmie Applied Sciences, gdzie doktorant był pierwszym autorem, a wyniki przedstawionych tam badań eksperymentalnych były owocem szerokiej współpracy doktoranta z uznanymi ośrodkami naukowymi na świecie w zakresie badań nad różnymi metodami sterowania jedno i trójfazowych falowników napięcia.

Analizując wyniki badań eksperymentalnych zamieszczone w pracach doktoranta pozwalają wnioskować o bardzo dużej dojrzałości naukowej i inżynierskiej doktoranta. Wykazał się również umiejętnością współpracy z badaczami z innych poza krajowych ośrodków naukowych, co również świadczy o jego dojrzałości naukowej oraz w dobrym świetle stawia jego dalszą karierę naukową.

Przedłożoną do oceny rozprawę doktorską mgr inż. Łukasza Dygi oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że praca doktorska 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 14 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.).

Wnoszę o dopuszczenie przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Dygi do publicznej obrony.

Równocześnie składam wniosek o wyróżnienie przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasz Dygi ze względu na bardzo wysoką wartość merytoryczną oraz przedstawioną aktualną tematykę rozważanego zagadnienia. Doktorant jest również współautorem 12 publikacji naukowych, z czego kilka posiada Impact Factor, a za najważniejszą pracę należy uznać artykuł w czasopiśmie IEEE Transaction on Industry Applications. Duży wpływ na wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej ma praca w czasopiśmie Applied Sciences, gdzie doktorant jest pierwszym autorem.

dr hab. inż. Przemysław Przek, prof. UMG