

Dr hab. inż. Dariusz Zieliński, prof. uczelni
Zakład Przetwarzania i Magazynowania Energii Elektrycznej
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384597; e-mail: d.zielinski@pollub.pl

Lublin, 04.03.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Marka Wodyka
pt. „ Control methods of three-phase power electronic converters operating under
distorted supply voltage conditions “
(METODY STEROWANIA TRÓJFAZOWYM PRZEKSZTAŁTNIKIEM
SIECIOWYM W WARUNKACH ODKSZTAŁCONEGO NAPIĘCIA LINNI
ZASILAJĄCEJ)

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 15 października 2024 r.

1. Ocena problematyki rozprawy na podstawie cyklu publikacji

Układy przekształtnikowe AC/DC mają szerokie zastosowanie w przemyśle i transporcie, a w szczególności stosowane są w układach integrujących trójfazową sieć niskiego napięcia z magazynami energii oraz odnawialnymi źródłami energii. Pomimo bardzo szerokiej oferty tych przekształtników nadal poszukuje się koncepcji, które pozwolą utrzymać pracę w warunkach odkształceń harmonicznych i asymetrii napięć sieciowych oraz będą rozwiązaniami bardziej niezawodnymi czy charakteryzować się będą wyższą efektywnością pracy. Takie postulaty były inspiracją ocenianej pracy doktorskiej. Doktorant zaproponował szereg ulepszeń algorytmów, znanych w literaturze pod akronimami VOC i DPC. Zaproponowana przez niego modyfikacja polega na modułowym systemie sterowania składającym się z: metod wykorzystujących teorię mocy chwilowej oraz opisu składowych prądu w nowatorskich, niekartezjańskich układach współrzędnych. Zastosowane ulepszenie zorientowane na realizację takich celów sterowania jak asymetryczny prąd przekształtnika czy celowe wtrącanie harmonicznych.

Wprowadzona zmiana pozwoliła na rozszerzenie funkcjonalności W zależności od trybu pracy, asymetryczny prąd przekształtnika może być korzystny dla sieci, gdy występuje brak równowagi napięć fazowych. W trybie prostownikowym prąd o największej amplitudzie powinien być wymuszony w fazie o najwyższej amplitudzie napięcia, natomiast w trybie falownikowym – odwrotnie. Doktorant zaprezentował te rozwiązania w sześciu współautorskich artykułach renomowanych czasopism naukowych, gdzie w pięciu z nich był pierwszym autorem z dominującym udziałem.



Poszukiwania nowych czy modyfikowanych metod sterowania przekształtnikami mocy, umożliwiających uzyskanie zwiększonych możliwości regulacyjnych są dobrym kierunkiem rozwoju. Z tego względu podjęcie prac badawczych przez Doktoranta nad badaniem, modelowaniem i przeprowadzeniem eksperymentów laboratoryjnych w temacie określonym przez tytuł rozprawy uważam za bardzo dobrą decyzję.

2. Ocena problemu badawczego, zadań naukowych, struktury rozprawy oraz zastosowanego piśmiennictwa

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest pracą stanowiącą zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie sześciu artykułów naukowych, który uzupełniony jest o część wprowadzającą opisującą m.in. problem naukowy, motywację, cele naukowe, opis przeprowadzonych badań, konkluzje oraz wykaz literatury. Taki układ stwarza, że praca to dokładnie odpowiada strukturze rozpraw doktorskich. W części wstępnej, po przedstawieniu krótkiej motywacji z akcentami zasadności zainteresowania się podjętym tematem, Doktorant przedstawił przegląd literaturowy wybranej topologii i metod sterowania VOC. Zaprezentowane badania literaturowe stały się punktem wyjściowym do dalszych rozważań Doktoranta. W końcowej części tego przeglądu uwagę skierował na podatność układu sterowania na odkształcenia napięcia spowodowane harmonicznymi i asymetrią faz.

Cel badawczy rozprawy, stanowiący jednocześnie tezę naukową, Doktorant sformułował w rozdziale 1.4, a brzmi on: *"The purpose of this dissertation is to develop control methods for grid-connected three phase power electronic converters operating under grid voltage imbalance and harmonics"*. Realizację tego celu Doktorant zrealizował w formie sześciu tematycznie powiązanych artykułów naukowych, opublikowanych w renomowanych czasopismach. Do osiągnięcia postawionego celu, Doktorant zaproponował następujące prace:

- Generowanie niesymetrycznego prądu sinusoidalnego wykorzystujący składowe mocy chwilowej pq jako zmienne sterujące.
- Generowanie niesymetrycznych prądów sinusoidalnych wykorzystując transformację układu odniesienia niekartezjańskiego oraz nowe składowe prądu dq jako zmienne sterujące.
- Celowe generowanie harmonicznymi w celu utrzymania współczynnika mocy równego jedności dla przekształtnika pracującego w trybie prostownika, wykorzystując transformację drgającego układu odniesienia oraz nowe składowe prądu dq jako zmienne sterujące.
- Filtracja harmonicznymi i kompensacja mocy biernej dla przekształtnika pracującego jako aktywny filtr mocy przy użyciu transformacji drgającego układu odniesienia oraz nowych składowych prądu dq jako zmiennych sterujących.



Wymienione prace dotyczą głównie sposobu kształtowania prądów fazowych pozwalających na osiągnięcie celów regulacyjnych. Dla wybranego układu sterowania Doktorant zaplanował również struktury uodporniające układ na zaburzenia pochodzące od sieci dystrybucyjnej. Na łamach prezentowanych publikacji, Doktorant przeprowadził dyskusję formułując wnioski i określając dodatkowe funkcjonalności. Poza wskazanymi zadaniami modelowymi i oceną wyników obliczeniowych Doktorant, przeprowadził badania i porównał uzyskane wyniki. Dalej dokonał analizy uzyskanych wyników i sformułował końcowe wnioski. Wyszczególnione zadania odzwierciedlone są w wybranych artykułach i poparte gruntowną analizą modelową i matematyczną.

Wykaz literatury obejmuje 95 pozycji bibliograficznych. Niemal wszystkie te pozycje napisane są w j. angielskim. Źródłem większości z nich są przede wszystkim artykuły z renomowanych czasopism IEEE, uznanych wydawnictwach książkowych oraz patenty i międzynarodowe normy. Pozycje te obejmują aktualną wiedzę naukowo-techniczną ściśle powiązaną z zakresem rozprawy. Jedenaście z wyszczególnionych pozycji to opracowania współautorskie lub autorskie Doktoranta.

Zdaniem recenzenta problemu badawczego i zadania naukowe zostały sformułowane poprawnie a zastosowane piśmiennictwo świadczy o bardzo dobrej znajomości światowej literatury naukowej z zakresu badanych zjawisk. Sposób redakcji pracy jest zgodny z Ustawą prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Art.187 ust.3, rozszerzającym możliwość przedstawienia pracy doktorskiej w postaci zbioru artykułów naukowych.

3. Ocena adekwatności zastosowanych metod badawczych

Zastosowane metody badawcze są zgodne z wymaganiami. Składają się na nie:

- a) Studia literaturowe wraz z interpretacją i analizą oraz formułowanie wniosków, które wyznaczają decyzje o zakresie i przedmiocie badań, kształcie tezy naukowej oraz planowanych zadaniach badawczych;
- b) Badania modelowe i symulacyjne;
- c) Analiza matematyczna problemu oraz proponowanego rozwiązania;
- d) Planowanie badań eksperymentalnych i ich przeprowadzenie;
- e) Analiza, interpretacja i dyskusja uzyskanych rezultatów oraz formułowanie wniosków w zakresie spełnienia oraz osiągnięcia celów naukowych.

Zastosowanie tych metod w wystarczającym stopniu zapewnia realizację postawionych zadań badawczych, co uzasadniają wymienione niżej rezultaty.

Studia literaturowe ukierunkowane są ściśle na prezentację trójfazowych układów przekształtnikowych AC/DC pracujących z siecią dystrybucyjną w warunkach odkształceń harmonicznych i asymetrii napięć sieciowych. Mają one charakter zwarty, a w ich wyniku przedstawione są podstawowe układy sterownia.

Badania modelowe poparte ugruntowanym aparatem matematycznym Doktoranta zrealizowane były w każdej prezentowanej publikacji. Badania te polegały na formułowaniu opisów matematycznych, na podstawie schematu elektrycznego,

z uwzględnieniem architektury i proponowanej metody sterowania. Analiza graficzna zrealizowana została w sposób przemyślany i bardzo czytelny.

Sformułowane przez Doktoranta równania różniczkowe umożliwiły bezpośrednią realizację badań symulacyjnych. Zaprezentowane w publikacjach efekty badań są ze sobą powiązane i tworzą kompletny obraz, jednak Doktorant nie wyjaśnił jakie narzędzie symulacyjne zastosował do sporządzenia tych przebiegów. Załącznik z modelami symulacyjnymi mogłyby być doskonałym uzupełnieniem rozprawy.

Analizując cykl publikacyjny stwierdzam, że Autor dowiódł umiejętności posługiwania się metodą badań symulacyjnych jak i planowaniem tych badań. Niestety zabrakło oczekiwanych informacji o stworzonym oprogramowaniu, przyjętych uproszczeniach i ograniczeniach. Nie jest oczywiste, w jakim stopniu samodzielności modele symulacyjne stworzone zostały przez Doktoranta.

Wyniki badań rzeczywistych Doktorant przedstawił w załączonych publikacjach. Sposób przedstawienia tych wyników jest bardzo dobry, natomiast brak uzupełniających informacji na temat stanowiska badawczego, wkładu pracy w jego budowę pozostawia wątpliwości recenzenta w kwestii samodzielności wykonywanych prac badawczych.

Wykonanie przewidzianych w doktoracie badań Doktorant potwierdził przedstawiając wyniki i formułując oceny oraz wnioski w przedłożonych publikacjach. Ostateczne konkluzje zrehabilitował w rozdziale czwartym. W rozdziale tym Doktorant powołuje się na publikacje i wyjaśnia, co zostało zrobione oraz co uzasadnia opinię, że cel pracy został osiągnięty. Jedynym niefortunnym stwierdzeniem jest zdanie końcowe, zdawkowo informujące czytelnika, że badania przeprowadzono z wykorzystaniem popularnej platformy DSP TMS320F28335 i trójfazowego przekształtnika opartego o tranzystory IGBT, co pozostawia pewien niedosyt.

Zawartość i forma przedstawionej pracy wskazują, że jest to przemyślany oraz spójny tematycznie cykl publikacji naukowych, spełniający wymagania formalne.

4. Ocena oryginalności osiągnięcia naukowego i jego przydatności dla nauk inżynierjno-technicznych

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta zaliczam opracowanie zbioru metod i algorytmów umożliwiających pracę przekształtnika AC/DC w warunkach odkształceń harmoniczych i asymetrii napięć sieciowych. Wysoko oceniam zaproponowaną metodę ograniczenia prądu, która zamyka hodograf prądu w sześciokącie określonym przez maksymalną dopuszczalną amplitudę prądu fazowego. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie sinusoidalnego i asymetrycznego prądu. Niestety, w takich warunkach przekształtnik nie może osiągnąć swojej pełnej mocy pozornej, ponieważ nie wszystkie fazy osiągają limit prądu. Problem ten rozwiązano poprzez wprowadzenie nowatorskiej metody ograniczenia prądu, pozwalającej na uzyskanie pośrednich stanów asymetrii, w przypadku, jeśli byłoby to konieczne.

Asymetryczne wielkości trójfazowe są reprezentowane przez eliptyczny hodograf w nieruchomym układzie odniesienia, a w klasycznej synchronicznej transformacji dq



powodują oscylacje o podwojonej pulsacji podstawowej harmonicznej. Prowadzi to do trudności w wyznaczaniu kąta fazowego napięcia sieci oraz w regulacji prądu w układzie dq . Aby wyeliminować te problemy, zaproponowano nowatorską transformację do niekartezjańskiego układu odniesienia, opartą na składowych prądu dla dodatniej i ujemnej sekwencji. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie szerokiego zakresu asymetrii prądu przy użyciu prostych regulatorów proporcjonalno-całkujących. Dodatkowo ograniczenie prądu może być bezpośrednio stosowane do składowych odniesienia prądu dq w nowym układzie.

Innym rodzajem zakłóceń w sieci elektroenergetycznej są harmoniczne w napięciu zasilającym. Większość prac naukowych koncentruje się na układach sterowania odpornych na harmoniczne napięcia sieciowego, ponieważ mogą one powodować powstanie niezamierzonych harmonicznych w prądzie przekształtnika. Jednak odpowiednio wprowadzone harmoniczne prądowe mogą być korzystne zarówno dla systemu energetycznego, jak i samego przekształtnika. Taka sytuacja ma miejsce, gdy prąd i napięcie zachowują ten sam kształt w trybie prostownikowym. Wówczas przekształtnik pracuje z jednostkowym współczynnikiem mocy, co oznacza, że moc pozorna jest reprezentowana wyłącznie przez moc czynną. Innymi słowy, moc czynna jest osiągana przy minimalnej możliwej wartości skutecznej prądu. W klasycznym podejściu realizacja tego celu wymaga jednak dodania określonych harmonicznych do prądu odniesienia, co wymusza stosowanie wielu członów rezonansowych w regulatorze prądu. Prowadzi to do problemów związanych z dostrajaniem oraz implementacją funkcji anty-przeciążeniowych.

Kolejnym wyzwaniem jest właściwe określenie odniesienia harmonicznych, co nie jest trywialne. Aby przezwyciężyć te trudności, do systemu sterowania wprowadzono transformację do wibrującego układu odniesienia. W ten sposób odkształcone napięcie i składowe prądu są reprezentowane jako sygnały sinusoidalne w układzie nieruchomym, a prąd przekształtnika może zawierać pożądane harmoniczne sterowane prostymi regulatorami proporcjonalno-całkującymi. Ponieważ transformacja do wibrującego układu odniesienia opiera się na sygnałach zniekształconych przez harmoniczne, sterowanie aktywnym filtrem mocy jest naturalnym kandydatem do implementacji tej metody, gdyż jego prąd składa się głównie z harmonicznych. Współczynniki transformacji są obliczane na podstawie odniesienia prądu, a układ sterowania wykorzystuje regulatory proporcjonalno-całkujące.

Powyższe rozwiązania zwiększają odporność przekształtnika AC/DC współpracującego z siecią dystrybucyjną w warunkach odkształceń harmonicznych i asymetrii napięć sieciowych a także wspierają system elektroenergetyczny. Jest to zadanie niezwykle aktualne i znajdzie szerokie zastosowanie w naukach inżyniersko-technicznych, dlatego bardzo wysoko oceniam przedstawione osiągnięcia.

5. Ocena sposobu przedstawienia uzyskanych wyników, uwagi problemowe oraz zauważone wątpliwości recenzenta

Praca jest przygotowana bardzo dobrze i zwięźle. Rysunki oraz wyniki badań są przedstawione starannie, w sposób przemyślany i zgodnie z kanonem prowadzenia prac badawczych. Poziom redakcji obniża brak załączników oraz jednoznacznego stwierdzenia w jakich warunkach i w jakim środowisku prowadzono symulacje, a w jakich badania w pewnym stopniu utrudnia ocenę przedłożonego dzieła. Brak jasnego opisu rzeczywistego stanowiska utrudnia analizę dorobku doktoranta. Ponadto nie przedstawiono jasnego wkładu doktoranta w budowę stanowiska badawczego. Recenzent analizując dorobek może się tylko domyślać czy doktorant do swoich badań wykorzystywał istniejące stanowisko badawcze czy budował własne. Podobna sytuacja dotyczy się algorytmów sterowania. Nie jest jednoznacznie określone czy doktorant opracował pełne sterowanie na potrzeby swoich badań czy modyfikował i adaptował dostępne algorytmy do swoich potrzeb. Doktorant przedstawił podział procentowy wkładu w poszczególnych publikacjach, natomiast nie załączył oświadczeń współautorów oraz opisu przedstawionego podziału kompetencji i wkładu w daną publikację.

Uwagi krytyczne mają charakter pytań, w których Doktorant proszony jest o wyjaśnienie sposobu prowadzenia badań jak i przedstawienia wyników.

- a) Proszę określić wkład merytoryczny Doktoranta w kluczowych publikacjach. Doktorant dokumentuje swoje osiągnięcia za pomocą artykułów, natomiast są to prace co najmniej dwóch autorów.
- b) Dlaczego w pracy nie przedstawiono stanowiska rzeczywistego? Proszę określić swój wkład w budowę stanowiska, jakie modyfikacje przeprowadził doktorant?
- c) Proszę określić wkład doktoranta w opracowane algorytmy sterowania. Czy doktorant modyfikował istniejące algorytmy sterowania czy budował je samodzielnie od podstaw?
- d) Brak informacji o stworzonym oprogramowaniu, przyjętych uproszczeniach i ograniczeniach. Nie wiadomo więc, czy model symulacyjny stworzony został samodzielnie przez Doktoranta czy w zespole.
- e) Brak pełnej informacji o zastosowanym sprzęcie pomiarowym i jego parametrach.

Doktoranta proszę o ustosunkowanie się do przedstawionych uwag a)-e) w formie pisemnej i przesłanie odpowiedzi z wykorzystaniem poczty elektronicznej na adres e-mail recenzenta pobrany ze strony <https://ehms.pollub.pl/standard/staff.php>.

Wszystkie wymienione wątpliwości wyrażają zainteresowania recenzenta rozprawą, mając jednocześnie na celu zwrócenie uwagi Doktorantowi na pewien niedosyt związany z prezentowaniem wyników prac. Zastrzeżenia o charakterze merytorycznym powinny być wyjaśnione przez Doktoranta.



6. Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Pomimo kilku pytań natury formalnej, z całą pewnością uznać można, że rozprawa doktorska mgra inż. Sebastiana Marka Wodyka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz szczegółową wiedzą w zakresie przekształtników napięcia AC/DC pracujących w warunkach odkształceń harmoniczych i asymetrii napięć sieciowych. Realizując pracę naukową dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych, co świadczy o nabyciu wystarczających umiejętności do samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Doktorant potwierdził swoją gruntową wiedzę, przedstawiając sześć powiązanych merytorycznie, współautorskich publikacji wydanych w renomowanych czasopismach naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgra inż. Sebastiana Marka Wodyka wyróżnić oraz uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam więc, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Sebastiana Marka Wodyka do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

Uwzględniając wysoki poziom merytoryczny rozprawy, kompletność tez, poprawność przeprowadzonych rozważań, dużą dbałość redakcyjną również współautorstwo sześciu publikacji w International Transactions on Electrical Energy Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE Transactions on Power Delivery oraz Power Electronics and Drives wnioskuję, w przypadku pozytywnego przyjęcia i nadania stopnia naukowego doktora, o wyróżnienie rozprawy.



