

dr hab. inż. Daniel Wojciechowski, profesor uczelni  
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
Politechnika Gdańska  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 28.02.2025

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Sebastiana Wodyka

pt. „Control methods of three-phase power electronic converters operating under distorted supply voltage conditions”

Niniejsza recenzja została opracowana zgodnie z uchwałą nr 860/II/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 19 listopada 2024 roku.

### 1. Aktualność tematyki

Rozprawa doktorska dotyczy sterowania trójfazowym, dwukierunkowym przekształtnikiem sieciowym, przyłączonym do trzech przewodów roboczych (bez przyłączenia do przewodu neutralnego), opartym na strukturze dwupoziomowego falownika napięcia. Przekształtniki takie mają bardzo szeroki obszar aplikacyjny. Są stosowane przede wszystkim jako układ sprzęgający odbiorniki i źródła energii z siecią zasilającą, i są kluczowe w takich systemach jak odnawialne źródła energii (elektrownie wiatrowe, fotowoltaiczne, wodne), systemy magazynowania energii, napędy przekształtnikowe, układy zasilania bezprzerwowego, czy też ładowarki pojazdów elektrycznych. Innym obszarem zastosowań przekształtników pracujących na sieć są kompensatory aktywne (filtry aktywne) służące do poprawy jakości energii elektrycznej, przy czym funkcjonalność przekształtnika sieciowego i kompensatora mogą być zawarte w jednym urządzeniu. Rezultatem tak dużego znaczenia praktycznego przekształtników sieciowych jest trwające od wielu lat zainteresowanie wielu ośrodków badawczych na świecie, zarówno naukowych jak i przemysłowych, metodami sterowania takimi przekształtnikami. Podstawowym zadaniem układu sterowania przekształtnikiem sieciowym, bez względu na zastosowanie, jest precyzyjne kształtowanie jego prądu sieciowego niezależnie od warunków pracy, w szczególności niezależnie od odkształcenia przebiegu i niesymetrii napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia, od mocy zwarciowej w tym punkcie, a także od struktury sieci i rodzaju odbiorników przyłączonych do sieci w pobliżu przekształtnika. Sterowanie kompensatorem aktywnym wymaga dodatkowo możliwie wysokiej dynamiki regulacji prądu. Podstawowymi blokami funkcjonalnymi układu sterowania przekształtnikiem sieciowym są, w kolejności od bloków

nadrzędnych: regulator napięcia w obwodzie prądu stałego, algorytm wyznaczania prądu zadanego, regulator prądu oraz modulator impulsowy. Obserwowany na przestrzeni lat rozwój algorytmów sterowania przekształtnikami sieciowymi obejmuje każdy z jego, ściśle powiązanych ze sobą i wzajemnie zależnych od siebie, bloków funkcjonalnych, przy czym wydaje się, że najwięcej uwagi poświęcono jak dotąd rozwojowi algorytmów regulacji prądu. Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest w szczególności autorskim algorytmom wyznaczania prądu zadanego zarówno przekształtnika sieciowego jak i kompensatora aktywnego, zapewniających poprawną pracę przekształtnika bez względu na jakość napięcia zasilającego w punkcie przyłączenia, przy zastosowaniu znanych, możliwie prostych metod regulacji prądu (regulatory proporcjonalno-rezonansowe oraz proporcjonalno-całkujące). Wobec powyższego, pomimo istnienia wielu skutecznych, stosowanych w praktyce układów sterowania przekształtnikiem sieciowym, uważam opracowane i udokumentowane przez Doktoranta w rozprawie metody algorytmiczne za oryginalne. Autor swoją rozprawą niejako udowadnia, że zagadnienie sterowania przekształtnikami sieciowymi jest wciąż aktualne.

## 2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa ma formę cyklu 6. publikacji wydanych w renomowanych, recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Wszystkie artykuły zostały zredagowane w języku angielskim. Doktorant jest pierwszym autorem pięciu z sześciu wskazanych artykułów (drugim autorem tych artykułów jest Promotor recenzowanej rozprawy doktorskiej). Zadeklarowany przez Doktoranta udział w powstaniu tych artykułów jest większościowy (70% do 80%). Przedstawione do oceny artykuły, uszeregowane chronologicznie, dokumentują proces rozwoju przez Doktoranta autorskich metod sterowania przekształtnikiem sieciowym. Warto odnotować, że każdy z artykułów jest rezultatem przeprowadzenia przez Doktoranta oryginalnych badań zrealizowanych w pełnym cyklu, obejmującym analizę teoretyczną, badania symulacyjne oraz badania laboratoryjne na stanowisku fizycznym z przekształtnikiem sieciowym o mocy 4 KVA.

[P1] S. Wodyk, G. Iwański, "Three-phase converter power control under grid imbalance with consideration of instantaneous power limitations," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020.

W artykule zaproponowany został algorytm sterowania przekształtnikiem sieciowym, w którym zastosowano wspomaganie symetryzacji napięcia sieci poprzez wymuszanie niesymetrycznego prądu przekształtnika, zgodnie lub przeciwnie do asymetrii napięcia – zależnie od realizowanego przez przekształtnik kierunku przekształcania energii. Poziom niesymetrii wymuszanego prądu wybrano arbitralnie jako równy poziomowi niesymetrii napięcia. Algorytm oparto na reprezentacji wielkości fizycznych w nieruchomym, prostokątnym układzie współrzędnych  $\alpha\beta$ . Zastosowano proporcjonalno-rezonansowe regulatory składowych prądu. Warto odnotować zastosowanie w układzie sterowania regulacji napięcia DC z odsprężeniem jego tętnień, realizowanym z zastosowaniem filtracji, co

zwiększa dokładność kształtowania prądu AC przekształtnika przy zachowaniu wysokiej dynamiki regulacji tego napięcia. Zastosowano również dokładny algorytm ograniczenia prądu przekształtnika. Realizacja obydwu powyższych zadań jest istotna z punktu widzenia zastosowania przemysłowego, ale jest zwykle pomijana w literaturze przedmiotu.

[P2] S. Wodyk, G. Iwański, "Control of Three-Phase Power Electronic Converter With Power Controllers in Stationary Frame," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 56, No. 5, September/October 2020.

Układ sterowania zaproponowany w artykule stanowi bezpośrednie rozwinięcie układu przedstawionego w artykule [P1]. Zaproponowano i zastosowano metodę określania poziomu asymetrii prądu AC przekształtnika na podstawie punktu pracy przekształtnika w taki sposób, aby zapewnić maksymalizację mocy granicznej. Podejście takie jest słuszne z uwagi na fakt, że podstawową rolą przekształtnika sieciowego jest przekształcanie energii elektrycznej, natomiast realizowana pośrednio symetryzacja napięcia jest zadaniem dodatkowym.

[P3] G. Iwański, S. Wodyk, T. Łuszczuk, "Control of a Three-Phase Power Converter Connected to Unbalanced Power Grid in a Non-Cartesian Oblique Frame," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 37, No. 1, January 2022.

W artykule po raz pierwszy zaproponowano sterowanie określone w zmodyfikowanym, wirującym układzie współrzędnych  $d'q'$ . Układ ten jest niekartezjański (ukośny) i zapewnia regulację prądu AC przekształtnika sieciowego z dowolnym wymuszaniem jego niesymetrii, bez względu na niesymetrię napięcia zasilającego, z wykorzystaniem regulatorów prądu PI. Regulatory PI pracują w takim układzie w sposób identyczny jak w klasycznym układzie  $dq$  skojarzonym z symetrycznym, sinusoidalnym napięciem sieci oraz równokształtnym względem napięcia prądem AC. Idea ta opiera się więc na zastosowaniu relatywnie złożonego algorytmu wyznaczania prądu referencyjnego przy maksymalnym uproszczeniu regulacji tego prądu.

[P4] S. Wodyk, G. Iwański, "Vibrating Coordinates Frame Transformation Based Unity Power Factor Control of a Three-Phase Converter at Grid Voltage Imbalance and Harmonics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 69, No. 2, February 2022.

Układ sterowania przedstawiony w artykule [P4] stanowi rozwinięcie algorytmu pokazanego w artykule [P3]. Zastosowano zmodyfikowany układ  $d'q'$  który jest ukośny i oscylujący. Układ taki zapewnia niezależność pracy przekształtnika sieciowego nie tylko od niesymetrii składowej przeciwnej napięcia zasilającego, ale również od jego odkształceń. Transformacja wymaga zastosowania algorytmu SOGI oraz banku filtrów pasmowo-przepustowych. W sterowaniu zastosowano strategię kształtowania prądu

AC równokształtnego względem napięcia zasilania, co zapewnia pracę z jednostkowym współczynnikiem mocy.

[P5] S. Wodyk, G. Iwański, "Active Power Filter Control With Vibrating Coordinates Transformation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 38, No. 1, February 2023.

W artykule zaproponowano rozwinięcie koncepcji sterowania z zastosowaniem zmodyfikowanego przekształcenia do układu współrzędnych  $d'q'$  w aplikacji aktywnego kompensatora (filtra aktywnego) prądów harmoniczných. Uwzględniono i zaimplementowano kompensację selektywną prądu zasilającego z wykorzystaniem banku filtrów sygnałowych. W artykule zwrócono uwagę na problem opóźnień pomiędzy sprzężeniami a sterowaniem, właściwy dla układów sterowania realizowanych cyfrowo i szczególnie istotny przy kompensacji prądów harmoniczných.

[P6] S. Wodyk, G. Iwański, "Decoupled Control of an Active Power Filter in a Vibrating Reference Frame," *Power Electronics and Drives*, Vol. 9(44), 2024.

W artykule przedstawiono układ sterowania kompensatorem aktywnym łączący rozwiązania przedstawione we wcześniejszych opracowaniach, a także nowe rozwiązania algorytmiczne i funkcjonalne. Zastosowano wydzielenie prądów wyższych harmoniczných i prądu podstawowej harmoniczných, obejmującego kompensowany prąd bierny oraz prąd czynny odpowiadający za regulację napięcia DC. Zastosowano algorytm ograniczania prądu z wyborem priorytetów zadań realizowanych przez kompensator. Uwzględniono predykcję prądu zapewniającą kompensację opóźnień pomiędzy sprzężeniami i sterowaniem. Zaproponowany algorytm wyznaczania referencyjnego prądu przekształtnika jest złożony, natomiast zapewnia największą funkcjonalność spośród wszystkich poprzednich rozwiązań, przy zachowaniu prostej struktury regulatora prądu. Słusznie zauważono, że sterowanie kompensatorem aktywnym zapewnia największą elastyczność zastosowań przekształtnika.

### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

[P1.1] Kształtowanie asymetrycznego prądu przekształtnika zgodnie lub przeciwnie do asymetrii napięcia zasilającego (zależnie od kierunku przekształcania energii) wydaje się być uzasadnione i sprzyja symetryzacji tego napięcia, ale czy poziom asymetrii kształtowanego prądu powinien być wybierany arbitralnie?

[P3.1] Artykuł P3, rysunek 5b: sygnałem wejściowym filtrów górnoprzepustowych (HPF) jest sygnał wyjściowy filtrów dolnoprzepustowych (LPF), przy czym obydwa filtry są zaprojektowane na częstotliwość graniczną równą 50 Hz. Czy rysunek jest poprawny?

[P3.2] Artykuł P3, równania 22a do 22d: Czy wartości progowe dla „strefy martwej” algorytmu transformacji do układu  $d'q'$  zostały określone arbitralnie?

[P5.1] Wydaje się, że obwód sprzęgający przekształtnik z siecią w postaci dławika jest niewystarczający w aplikacji aktywnego kompensatora prądów harmonicznyc. Nie jest możliwe uzyskanie właściwego kompromisu pomiędzy dynamiką regulacji prądu kompensacyjnego a zawartością tętnień od modulacji impulsowej. Czy Doktorant rozważał zastosowanie odvodu sprzęgającego LCL i niezbędną modyfikację algorytmu sterowania?

[P6.1] Podział na harmoniczne kolejności zgodnej i przeciwnej zależnie od ich rzędu jest słuszny jedynie dla harmonicznyc obecnych symetrycznie we wszystkich trzech fazach. Założenie takie jest jednak niewystarczające w zastosowaniach praktycznych.

[P6.2] W rezultacie przyjętego przez Doktoranta uproszczenia wskazanego w uwadze P6.1 zastosowano predykcję prądu poprzez selektywny obrót poszczególnych harmonicznyc zależnie od ich rzędu (artykuł 6, równania 7 i 8). W praktyce takie podejście może być niewystarczające, ponieważ w ogólnym przypadku prąd kompensowanych odbiorników nie jest symetryczny.

[P6.3] Dlaczego zastosowanie kompensacji opóźnień pomiędzy sprzężeniami a sterowaniem obniża skuteczność kompensacji 11-tej harmonicznyc prądu (artykuł 6, rysunek 13)?

[P6.4] Czy Autor rozważa rozszerzenie struktury obwodowej przekształtnika i odpowiednią modyfikację algorytmu sterowania w celu umożliwienia pracy przekształtnika w układzie zasilania z 4-przewodami roboczymi (z przyłączonym przewodem neutralnym)? Rozwiązanie takie umożliwiłoby kompensację prądu odbiorników przyłączonych jednofazowo, a także pracę przekształtnika w charakterze źródła dla sieci autonomicznej z przewodem neutralnym.

#### 4. Ocena rozprawy

Doktorant sformułował następujący cel rozprawy (w tłumaczeniu z języka angielskiego):

„Opracowanie metod sterowania trójfazowych przekształtników sieciowych pracujących w warunkach asymetrii i harmonicznyc napięcia sieciowego”. Cel ten, czego dowodzą wyniki pokazane w artykułach przedstawionych do oceny, został przez Doktoranta osiągnięty w sposób oryginalny i zapewniający wysoką jakość pracy przekształtnika sieciowego, z uwzględnieniem pracy w charakterze kompensatora aktywnego, przyłączonego do sieci o niskiej jakości napięcia zasilającego. Do oryginalnych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam w szczególności opracowanie:

- algorytmów sterowania przekształtnikiem sieciowym w układzie  $\alpha\beta$ , z regulatorami PR,
- transformacji wielkości fizycznych układu trójfazowego do niekartezjańskiego układu współrzędnych  $d'q'$  (ukośnego i oscylującego),
- algorytmów wyznaczania prądu referencyjnego w układzie  $d'q'$
- układu sterowania przekształtnikiem sieciowym w układzie  $d'q'$  z regulatorami PI ze wspomaganie symetryzacji napięcia sieci, pracującym w warunkach niesymetrii i odkształcenia napięcia zasilającego,
- sterowania kompensatorem aktywnym w układzie  $d'q'$ ,

- oryginalnych algorytmów ograniczenia prądu przekształtnika sieciowego.

Każdy z opracowanych przez Doktoranta algorytmów sterowania został zbadany, co warto jeszcze raz podkreślić, w pełnym cyklu uwzględniającym analizę teoretyczną, badania symulacyjne i badania laboratoryjne.

Dodatkowym osiągnięciem Doktoranta, wykazanym w rozprawie, jest publikacja 4. artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych oraz 1. artykuł konferencyjny. Doktorant otrzymał ponadto następujące nagrody: nagrodę za najlepszy artykuł konferencyjny (2019), nagrodę Rektora PW za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2019/2020, a także jest Laureatem nagrody programu START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2024).

Uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie umniejszają mojej oceny rozprawy.

## 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa mgra inż. Sebastiana Wodyka pt. „**Control methods of three-phase power electronic converters operating under distorted supply voltage conditions**”, stanowi istotny wkład Autora w rozwój metod sterowania przekształtnikami sieciowymi. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i mogą stanowić podstawę dla dalszych prac dotyczących tej tematyki.

Stwierdzam, że **opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023, poz. 742) w odniesieniu do Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Sebastiana Wodyka do publicznej obrony.**

Ponadto, mając na uwadze wyróżniający poziom merytoryczny rozprawy, szeroki zakres przeprowadzonych badań i udokumentowanych wyników stawiam wniosek o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Daniel Wojtkowski