

Gdańsk, 21.11.2024 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: **Control of an AC-DC Converter with Increased Resiliency to Voltage Disturbances in the Power System** (Sterowanie przekształtnika AC-DC o zwiększonej odporności na zakłócenia napięcia w sieci elektroenergetycznej)

Autor rozprawy: **mgr inż. Grzegorz Wrona**

Rozprawa została napisana w języku angielskim, liczy 145 stron i została podzielona na 8 rozdziałów. Zawiera dwa dodatki: Dodatek A - listę publikacji autorskich i Dodatek B - schemat układu symulacyjnego wraz z opisem, a także spis symboli i skrótów oraz spis rysunków. Spis publikacji zawiera 116 pozycji, w tym 1 pozycje autorską i 12 pozycji współautorskich Doktoranta. Z 12 pozycji współautorskich dwie publikacje zostały wymienione w spisie publikacji dwukrotnie, co zostanie omówione w dalszej części recenzji. Oznacza to, że w spisie literatury powinno być 114 pozycji, w tym 10 pozycji współautorskich. Od pierwszych stron rozprawy Doktorant podkreśla swój udział w licznych projektach badawczych, w tym projektach we współpracy z przemysłem, przywołując tytuły 4 projektów we wstępie do rozprawy. Ponadto, w dalszej części rozprawy Doktorant przywołując tytuły artykułów współautorskich, będących efektem realizacji poszczególnych projektów bezpośrednio przy tytułach poszczególnych rozdziałów. Można stąd wywnioskować, że osiągnięcia Doktoranta przedstawione w rozprawie mają istotne znaczenie dla prac całego Zespołu badawczego oraz podmiotów przemysłowych współpracujących z Zespołem.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Transformacja energetyczna gospodarki do gospodarki bezemisyjnej, opartej na odnawialnych źródłach energii wiąże się z istotnym wzrostem znaczenia generacji rozproszonej w systemie energetycznym. Obserwowany gwałtowny wzrost liczby źródeł generacji rozproszonej, trójfazowych i jednofazowych powoduje wzrost wpływu tych źródeł na pracę sieci energetycznej oraz na jakość napięcia sieci. Zwłaszcza sieciach rozdzielczych niskiego napięcia, które są sieciami czteroprzewodowymi o istotnych wartościach impedancji linii, przyłączane jednofazowo mikroinstalacje fotowoltaiczne powodując asymetrię prądów fazowych linii powodują przepływ prądu o istotnej wartości w przewodzie neutralnym. W konsekwencji stają się przyczyną asymetrii napięć fazowych linii. Z kolei asymetria napięcia

sieci jest przyczyną zwiększonych strat oraz nieprawidłowej pracy transformatorów i przyłączonych odbiorników. Z transformacją energetyczną - w kontekście zwiększania efektywności energetycznej procesów przemysłowych - związana jest zwiększona liczba przyłączanych do sieci przekształtników energoelektronicznych. Coraz powszechniej przyłączane odbiorniki nieliniowe, w tym prostowniki diodowe i przekształtniki tyrystorowe napędów elektrycznych, ale również przekształtniki tranzystorowe, często o relatywnie niskiej częstotliwości przełączeń tranzystorów, są źródłem wyższych harmonicznym prądów, które przekładają się na występowanie wyższych harmonicznym w napięciu sieci. Kolejnym problemem są zapady napięcia, których źródłem mogą być zwarcia w sieci oraz tzw. flickery, których źródłem może być praca przyłączonych do sieci elektrowni wiatrowych, ale również praca stacji szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych. Wszystkie powyższe okoliczności przyczyniają się do wzrostu problemów z jakością napięcia sieci

Doktorant w swojej pracy zajmuje się problemem poprawnej pracy trójfazowych, dwupoziomowych przekształtników sieciowych AC-DC z filtrem sieciowym LCL, nazywanych z jęz. angielskiego *GCC* – *Grid Connected Converters* w warunkach występowania zakłóceń napięcia w sieci energetycznej. Istotna w przeprowadzonych przez Doktoranta badaniach jest obecność w przekształtnikach AC-DC filtrów sieciowych LCL. Filtr LCL posiada szereg zalet i korzyści w postaci eliminacji wysokoczęstotliwościowych rippli prądu, wynikających z modulacji napięcia PWM oraz zdolności zapewnienia sinusoidalnego kształtu prądów przy relatywnie małym gabarycie. Jednakże w porównaniu z filtrem LC wymaga zwiększonej uwagi podczas doboru elementów filtra, indukcyjności i pojemności dla zapewnienia stabilnej pracy, w tym zwłaszcza uniknięcia występowania rezonansów napięć i prądów.

Po stronie operatorów systemów dystrybucyjnych istnieje obowiązek zapewnienia parametrów jakościowych napięcia zasilania przyłączonych odbiorców w zakresie określonym normami, m.in. PN-EN 50160. Z drugiej strony określone przepisy, tzw. kodeks sieci (z *ang. grid codes*) określają wymagania stawiane przekształtnikom AC-DC przyłączanym do sieci.

Zapady napięcia, asymetria napięć fazowych czy występowanie wyższych harmonicznym w napięciu sieciowym mają niekorzystny wpływ i zakłócają pracę przekształtników GCC. Asymetria i wyższe harmoniczne napięcia są przyczyną powstawania niepożądanych pulsacji napięcia w obwodzie DC przekształtnika AC-DC, powodują nieprawidłową pracę regulatorów układu regulacji i zakłócają pracę algorytmów synchronizacji (z *ang. PLL - phase locked loop*) przekształtnika z siecią. Doktorant poprawnie zidentyfikował i opisał powyższe problemy oraz sformułował następującą tezę: „Wdrożenie właściwych technik sterowania pozwala na dostosowanie ogólnych algorytmów GCC do pracy w warunkach różnorodnych zaburzeń napięcia sieciowego, poprawiając odporność GCC, zapewniając prąd sinusoidalny o niskim współczynniku THD po stronie napięcia przemiennego przekształtnika i napięcie wysokiej jakości z funkcją ograniczania drugiej harmonicznej po stronie napięcia stałego”. Brzmienie tezy w języku angielskim: "*The implementation of appropriate control techniques allows the adaptation of generic GCC algorithms to operate under various grid voltage disturbances, improving the resilience of the GCC, ensuring sinusoidal current with a low THD factor on*

the AC side of the converter and high-quality voltage with the second harmonic limitation function on the DC side". Teza pracy jednocześnie określa cel pracy, jakim jest opracowanie technik sterowania przekształtnikiem sieciowym AC-DC z filtrem LCL zapewniających zwiększenie odporności algorytmów regulacji przekształtnika na zakłócenia występujące w sieci i zapewnienie jego poprawnej pracy w warunkach występowania zakłóceń w sieci.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W rozdziale drugim zawarta została analiza literatury światowej w zakresie metod sterowania przekształtnikami sieciowymi AC-DC, stanowiącymi przedmiot rozprawy. Dodatkowo, w na początku rozdziału trzeciego autor uzupełnia przegląd o opis metod sterowania przekształtnikami sieciowymi AC-DC z kompensacją zapadów napięcia. Przywołuje publikację wiodących autorów w tej dziedzinie: A. Teodorescu, M.Liserre oraz P. Rodrigueza. Pewien niedosyt budzi brak najbardziej aktualnego podziału przekształtników sieciowych na przekształtniki formujące sieć, z *ang. Grid Forming Converters* oraz przekształtniki z *ang. Grid Following Converters*. Można przyjąć, że praca w całości dotyczy falowników podążających za siecią, które wymagają poprawnej pracy pętli synchronizacji fazowej PLL.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Doktorant przyjął słuszne założenie, że kluczem do prawidłowej pracy regulatorów przekształtnika AC-DC w warunkach występowania zakłóceń napięcia sieci jest prawidłowa synchronizacja przekształtnika z siecią. Doktorant opracował algorytm filtra grzebieniowego poprawiający pracę algorytmu synchronizacji przekształtnika sieciowego AC-DC przy bardzo dużych zakłóceniach w sieci energetycznej, na przykład asymetrii spowodowanej zapadem napięcia do 50% wartości znamionowej w jednej fazie. W badaniach prowadzących do udowodnienia tezy Doktorant zastosował pełen cykl badawczy obejmujący analizę teoretyczną w oparciu o wzory matematyczne, opracowanie modeli symulacyjnych, badania symulacyjne i analizę uzyskanych wyników oraz weryfikację eksperymentalną uzyskanych wyników na stanowisku laboratoryjnym. O ile liczba przeprowadzonych symulacji i przedstawionych wyników badań symulacyjnych nie budzi żadnych zastrzeżeń, wyniki badań eksperymentalnych, które przywołuje doktorant jako jedno ze swoich istotnych osiągnięć, są nader enigmatyczne. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych w pracy ograniczają się do dwóch rysunków z przebiegami z generatora sygnałów ortogonalnych i kilku rysunków przedstawiających wybrane przebiegi potwierdzające działanie algorytmu dekompozycji sygnału na składową zgodną i przeciwną z wykorzystaniem zaproponowanej metody, zamieszczonych w Rozdziale 3.7 oraz w Rozdziale 5.3. W rozprawie nie przedstawiono opisu stanowiska laboratoryjnego, na którym zarejestrowano pokazane przebiegi ani nie podano opisu parametrów użytego oscyloskopu i sond pomiarowych. Niedosyt powoduje brak opisu doboru parametrów filtra LCL zwłaszcza w Rozdziale 7, gdzie przedstawiono analizę teoretyczną zależności prądu sieci od prądu wyjściowego przekształtnika i prądu kondensatora filtra LCL.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność podejścia zaproponowanego w rozprawie zawiera się w zastosowaniu przez doktoranta w algorytmie pętli synchronizacji fazowej PLL (z ang. *Phase Locked Loop*) znanego z literatury algorytmu uogólnionego integratora drugiego rzędu (*SOGI*) rozbudowanego o filtr grzebieniowy (z ang. *comb filter*), znany dotąd z teorii sygnałów komunikacyjnych. Filtr grzebieniowy zawiera pętle sprzężenia wprzód, w której znajduje się blok opóźnienia próbek sygnału napięcia sieci o określonej liczbie kroków – co, przy zastosowaniu do algorytmu SOGI w algorytmie synchronizacji przekształtnika AC-DC z siecią, pozwala zapewnić prawidłową synchronizację przekształtnika z siecią i wyznaczenie aktualnego kąta wektora napięcia sieci przy występowaniu zakłóceń napięcia sieci, zwłaszcza przy zapadach napięcia sieci.

Jak słusznie potwierdza Doktorant w rozprawie, istotnym aspektem w pracy przekształtnika DC-AC jest wpływ zaburzeń napięcia na algorytm PLL synchronizacji przekształtnika z siecią. Algorytm PLL wyznacza aktualny kąt wektora napięcia sieci, który jest niezbędny do transformacji sygnałów napięć i prądów w układzie regulacji przekształtnika AC-DC. Niepoprawne wyznaczenie kąta położenia wektora napięcia sieci powoduje nieprawidłowe wyznaczenie regulowanych sygnałów w osiach d i q oraz niepoprawne działanie całego układu regulacji. Doktorant przyjmuje założenie o stałej częstotliwości napięcia sieci wynoszącej 50 Hz, stąd nie ma dużego problemu z doбором parametrów filtra grzebieniowego.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Do wykazania skuteczności zaproponowanej metody Doktorant wybrał dwie reprezentatywne znane z literatury metody sterowania przekształtnikiem AC-DC: metodę bezpośredniego sterowania mocą (z ang. *DPC – Direct Power Control*), stanowiącą rozwinięcie sterowania histerezy oraz metodę sterowania wektorowego z orientacją wirującego układu współrzędnych względem wektora napięcia sieci (z ang. *VOC – Voltage Oriented Control*), a następnie przeanalizował działanie wybranych metod przy występowaniu zakłóceń napięcia sieci z wykorzystaniem zaproponowanego algorytmu filtra grzebieniowego w algorytmie synchronizacji przekształtnika z siecią. Skuteczność metody została potwierdzona licznymi przeprowadzonymi badaniami symulacyjnymi z wykorzystaniem modelu symulacyjnego przekształtnika AC-DC opracowanego w programie symulacyjnym PLECS. Koncepcja i działanie zaproponowanego algorytmu zostały przedstawione w sposób przejrzysty i czytelny.

6. Uwagi ogólne.

(6.1) Proszę jak szczegółowo przybliżyć opis stanowiska eksperymentalnego, tzn. parametry falownika oraz w jaki i według jakiego klucza były generowane wyższe harmoniczne napięcia sieci w badaniach eksperymentalnych. Proszę podać parametry przetworników pomiarowych LEM, przetworników analogowo-cyfrowych oraz procesora sterującego, a także parametry

użytego oscyloskopu i sond, którymi zostały zarejestrowane przebiegi w Rozdziale 3.7 oraz w Rozdziale 5.3.

(6.2) Proszę podać parametry indukcyjności i pojemności filtrów LCL w poszczególnych badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych. W całej rozprawie brakuje parametrów zastosowanych filtrów LCL. W jaki sposób dobrano parametry filtrów LCL badanych przekształtników sieciowych AC-DC? Jaka była częstotliwość przełączania tranzystorów przekształtnika AC-DC?

(6.3) Jaka była intencja dodatkowego przywoływania pełnym tekstem publikacji zespołu Doktoranta przy tytułach Rozdziału 3, Rozdziału 4 oraz Rozdziału 8? Przykładowo w publikacji [52], przywoływanej pełnym tekstem zaraz przy tytule Rozdziału 4 i Rozdziału 7, w przebiegach eksperymentalnych zarejestrowanych podczas występowania i ustąpienia zapadu napięcia widać cały czas asymetrię prądów. Jak można domniemać, dzięki zastosowaniu algorytmu opracowanego w rozprawie, prądy będą symetryczne. Nie pokazano jednak w rozprawie odpowiednich przebiegów eksperymentalnych potwierdzających przedstawione wyniki badań symulacyjnych.

(6.4) W jaki sposób został wybrany program badań symulacyjnych opracowanego algorytmu w zakresie występowania wyższych harmonicznnych w napięciu sieci?

(6.5) Doktorant zakłada, że zaproponowany algorytm synchronizacji przekształtnika z siecią działa prawidłowo przy stałej częstotliwości sieci wynoszącej 50Hz, co powinien zapewnić operator systemu dystrybucyjnego. Co zatem ze spełnieniem aktualnego kodeksu sieci dotyczącego wymogów NC RfG, który opisuje wymóg pracy przekształtników AC-DC przy występującej określonej odchyłce Δf częstotliwości sieci od 50 Hz.

7. Uwagi szczegółowe

(7.1) W całej rozprawie na wszystkich rysunkach przedstawiających przebiegi uzyskane w symulacjach nie ma podanych jednostek na osi czasu (Time) ani częstotliwości (Frequency). Dodatkowo na niektórych rysunkach podpisy osi są nieczytelne, np. na rysunku 6.1(c), 6.2(a), 6.2(b)

(7.2) Co oznacza podpis *Udiode* na rysunku 7.7(b)?

(7.3) Niewystarczający opis osi na rysunku 7.8.

(7.4) Publikacja: *G. Wrona and M. Jasinski, "AC-DC Converter with Asymmetrical Higher Harmonics Compensation Function in Sustainable AC Grid", Electrical, Control and Communication Engineering, vol. 2, no. 1, pp. 5-13, 2013* jest przywołana w Bibliografii dwukrotnie - na stronie 125 jako pozycja [60] oraz na stronie 126 jako pozycja [75]. Przez to myląco jest przywoływana w Rozdziale 4, najpierw na stronie 51 jako odnośnik [60], a następnie na stronie 61 na pod rysunkiem 4.8 jako odnośnik [75], następnie na stronie 62 pod rysunkiem 4.9 jako odnośnik [60] i na stronie 63 pod rysunkiem 4.10 jako odnośnik [75].

(7.5) Ta sama publikacja *M. Jasiński, G. Wrona, and S. Piasecki, Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives, ser. Studies in Computational Intelligence, T.*

Orłowska-Kowalska, F. Blaabjerg, and J. Rodríguez, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, vol. 531. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-03401-0>, jest przywołana w Bibliografii dwukrotnie najpierw jako [51] R. Kennel, *Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives*, ser. *Studies in Computational Intelligence*, T. Orłowska-Kowalska, F. Blaabjerg, and J. Rodríguez, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, vol. 531. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-03401-0>, następnie jako [53]. Przez to myląco jest przywoływana w Rozdziale 2 i Rozdziale 3, najpierw na stronie 18 pod rysunkiem 2.9 jako odnośnik [51], a następnie na stronie 21 jako [53], następnie na stronie 28 pod rysunkiem 3.6 jako [53], następnie na stronie 30 pod rysunkiem 3.9 jako [53], następnie na stronie 50 pod rysunkiem 3.30 jako odnośnik [51], a następnie na stronach 51, 101 i 115 jako [53]. W związku z tym powstaje pytanie czy jednak nie łatwiej było by Doktorantowi na nowo przeredagować rysunki 2.9, 3.6 i 3.9, a także 4.8, 4.9 i 4.10 niż wstawiać rysunki z uprzednich publikacji zespołu?

(7.6) Błędnie opisano przebiegi składowej zgodnej $U_{g_pos_beta}$ jako $U_{g_pos_alpha}$ na przebiegach na rysunkach 3.28, 3.29 oraz 5.14.

(7.7) Skrót DSM jest rozwinięty na stronie 4 jako *Digital Signal Microcontroller*, a na stronie 137 jako DSM - *Delayed Signal Microcontroller*.

8. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia obszerne podejście do modelowania, analizy, i badań układów sterowania przekształtników AC-DC, przeznaczony do współpracy z siecią energetyczną o występujących poważnych zakłóceniach napięcia sieci.

Spośród szerokiego spektrum problemów dotyczących sterowania przekształtnikami sieciowymi AC-DC Doktorant skoncentrował się na problemie sterowania przy występowaniu zakłóceń napięcia sieci energetycznej niskiego napięcia, zwłaszcza zapadów napięcia, asymetrii napięć i występowania wyższych harmonicznnych w napięciu. Doktorant przyjął słuszne założenie, że podstawowym problemem sterowania przekształtnikiem sieciowym AC-DC przy zakłóceniu napięcia sieci jest nieprawidłowa synchronizacja przekształtnika z siecią oraz nieprawidłowe wyznaczanie aktualnego kąta położenia wektora sieci niezbędnego do transformacji zmiennych sterujących do układu wirującego aby uzyskać odpowiedniki trójfazowych napięć i prądów w postaci stałych sygnałów d i q . Prezentowane do tej pory w literaturze algorytmy sterowania były zbyt mało dokładne przy zakłóconym napięciu sieci. Prowadziło to nieprawidłowej pracy regulatorów i nie pozwalało zapewnić symetrycznych sinusoidalnych prądów pobieranych z sieci oraz stałego napięcia w obwodzie DC. Jak dowodzi w rozprawie Doktorant, kluczem do prawidłowej synchronizacji przekształtnika z siecią i prawidłowego wyznaczania aktualnego kąta wektora napięcia sieci jest odpowiednia filtracja zakłóconych przebiegów napięcia sieci. Opracowanie w rozprawie filtra napięcia sieci o strukturze filtra grzebieniowego, znanego wcześniej z teorii sygnałów komunikacyjnych **wymagało zatem oryginalnego wkładu Autora**. Doktorant, poprzez zastosowanie filtra grzebieniowego w algorytmie synchronizacji przekształtnika AC-DC z siecią energetyczną

niskiego napięcia **samodzielnie rozwiązał problem negatywnego wpływu zakłóceń napięcia sieci, zwłaszcza zapadów napięcia, asymetrii napięć i występowania wyższych harmonicznyc** na pracę układu sterowania przekształtnikiem sieciowym AC-DC, co jak do tej pory było przyczyną problemów z pracą przekształtników przyłączonych do sieci, a poprzez ich częste wyłączenia w stanach zakłóceń sieci miało wpływ zmniejszenie rentowności powiązanych procesów przemysłowych. Tym samym udowodniona została teza, postawiona w Rozdziale 1 rozprawy. Zastosowanie filtra grzebieniowego w algorytmie synchronizacji przekształtnika AC-DC z siecią, okazało się skutecznym rozwiązaniem problemu nieprawidłowego działania układu sterowania przekształtnikiem w stanach zakłóceń sieci. Ze względu na uzyskaną korzyść w postaci zwiększonej odporności algorytmów sterowania przekształtnikiem sieciowym AC-DC na niekorzystne zjawiska występujące w trójfazowej sieci rozdzielczej niskiego napięcia.

Za osiągnięcia własne Autora rozprawy uznaję:

- ✓ opracowanie nowej, udoskonalonej metody generacji sygnałów ortogonalnych oraz implementacja w algorytmie dekompozycji sygnału napięcia na składowe zgodną i przeciwną
- ✓ opracowanie metod kompensacji zakłóceń napięcia sieci dla przekształtnika AC-DC z filtrem LCL i czujnikami pomiarowymi umieszczonymi po stronie przekształtnika,
- ✓ opracowanie metod synchronizacji jednofazowej i trójfazowej w oparciu o zaproponowaną metodę generowania sygnałów ortogonalnych,
- ✓ opracowanie rozszerzonego regulatora napięcia stałego, który mógłby ograniczyć oscylacje drugiej harmonicznej poprzez sterowanie składowymi zgodną i przeciwną prądu przekształtnika w czasie zapadów napięcia,
- ✓ opracowanie modeli symulacyjnych i weryfikacją proponowanych rozwiązań.

9. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Grzegorza Wrony pt. „**Control of an AC-DC Converter with Increased Resiliency to Voltage Disturbances in the Power System** ” 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 przekształtników sieciowych AC-DC.

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.

Marek Adamowicz

