

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 30.04.2022 r.

RECENZJA

**ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGRA INŻ. ANDRZEJA STRASIA
PT. „REPETITIVE CONTROL FOR A THREE-PHASE GRID-TIED CONVERTER UNDER
DISTORTED GRID VOLTAGE CONDITIONS”
(STEROWANIE POWTARZALNE TRÓJFAZOWEGO PRZEKSZTAŁTNIKA SIECIOWEGO
PRACUJĄCEGO W WARUNKACH ZNIEKSZTAŁCONEGO NAPIĘCIA SIECI)**

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 15 lutego 2022 r.

1. Ocena problematyki rozprawy i układu treści

Rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Strasia dotyczy układów przekształtnikowych AC/DC stanowiących sprzęg energoelektroniczny pomiędzy obwodami stałoprądowymi a siecią elektroenergetyczną niskiego napięcia. Takie zastosowania przekształtników wykorzystywane są w szczególności do przyłączania do sieci układów napędowych pracujących w trybie generatorowym, układów fotowoltaicznych, elektrowni wiatrowych czy magazynów energii. Problemem, który pomimo licznych przykładów pozytywnego osiągnięcia wyników pozostaje nadal do w obszarze zainteresowań wielu ośrodków badawczych na świecie, jest opracowanie efektywnego układu sterowania zapewniającego niską wartość wyższych harmonicznych. Naukowcy poszukują rozwiązań, które charakteryzować się będą niską wartością THD napięć i prądów dla szerokiego zakresu obciążeń oraz przy występowaniu różnych stanów niesymetrii sieci elektroenergetycznej.

Do rozwiązania tego problemu stosuje się szereg metod, a najpopularniejsze z nich to zastosowanie układów rezonansowych w układach sterowania opartych na modelach zapisanych w stacjonarnych układach odniesienia, układów wielopoziomowych z zaawansowanymi metodami modulacji napięcia oraz układów ze sterowaniem od wektora stanu.

Liczne, liczone w tysiącach pozycje bibliograficzne, które znaleźć można w bazach literaturowych, potwierdzają ważność problematyki i potrzebę jej dalszego rozwijania. Dlatego uzasadnionym jest podjęcie tego tematu, zwłaszcza z wykorzystaniem metody sterowania powtarzalnego od wektora stanu z zastosowaniem nastaw realizowanych wg. optymalizacji rojowej (particle swarm optimisation).

Przytoczone argumenty potwierdzają ważność problematyki oraz ciekawy sposób rozwiązania problemu poprawy jakości parametrów przetwarzanej energii, który pozwala nieszablonowo spojrzeć na problem sterowania przekształtników współpracujących z siecią elektroenergetyczną.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

W wykazie bibliograficznym Autor zamieścił 133 pozycje, na które składają się głównie artykuły w czasopismach, referaty konferencyjne, książki oraz prace niepublikowane, w szczególności rozprawy doktorskie. Czas ich publikacji to, poza pojedynczymi pozycjami, lata XXI wieku, przy czym bardzo duża ich część obejmuje ostatnie pięć lat. Podkreśla to aktualność problematyki i jej powiązania z klasycznymi teoriami sterowania.

Większość pozycji dostępna jest w postaci elektronicznej i możliwa jest do pobrania w bazach IEEE Xplore, Science Direct lub otwartych repozytoriach uczelni. Umożliwia to łatwe sięgnięcie po tą literaturę i rozszerzenie wiedzy o wskazywane przez doktoranta źródła.

W spisie literatury są również przykłady wykorzystywania materiałów prac doktorskich. Dotyczy to głównie prac z Politechniki Warszawskiej, ale również dysertacji z uniwersytetów w Christchurch, Vigo, Karlsruhe i Helsinkach. Z obszaru książek naukowych i podręczników akademickich znaleźć można znaczące opracowania wydawnictw John Wiley & Sons, Prentice Hall, Academic Press czy Wydawnictwa Uczelnianego AGH. Uzasadnionym uzupełnieniem tej literatury są normy IEEE jakości energii oraz artykuły techniczne dotyczące dostosowania polskich przepisów w zakresie jakości energii elektrycznej.

Współczesne daty publikacji potwierdzają aktualność problematyki rozprawy, a wybór literatury i zastosowane powołania są uzasadnione.

3. Ocena układu rozprawy i jej struktury

Rozprawa liczy 132 strony i jest napisana w j. angielskim. Składa się na nią sześć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem, wykazem terminów oznaczeń i skrótów. Zawiera wprowadzenie, w którym przedstawiona jest motywacja podjęcia tematu, charakterystyka aktualnego stanu wiedzy oraz cele i teza rozprawy. Kolejne trzy rozdziały to charakterystyka sieciowych układów przekształtnikowych i stosowanych w nich układach sterowania, wprowadzenie do metody sterowania powtarzalnego oraz określenie modeli tego sterowania dla układów przekształtnikowych. Zawartość merytoryczna tych rozdziałów i wnioski z nich wynikające pozwalają przedstawić kluczowy pod względem merytorycznym rozdział opisujący badania symulacyjne i eksperymentalne. Zawiera on również analizę wyników i opis procesu weryfikacji rezultatów. Pracę kończą konkluzje, w których autor wypowiada się w zakresie realizacji celów rozprawy oraz spełnienia hipotezy badawczej.

Praca zawiera wymagany spis bibliografii oraz zwiększające przejrzystość listy rysunków i tabel. Przedstawiona struktura wykazuje logiczny układ treści, wymaganą kolejność, co pozwala na stwierdzenie, że spełnia wymagania układu treści określone dla rozpraw naukowych.

4. Ocena tezy badawczej i celów naukowych

Problem badawczy sformułowany został w postaci tezy naukowej, która w j. polskim przyjmuje brzmienie: **Dla trójfazowego przekształtnika sieciowego pracującego w warunkach odkształconego napięcia sieci, możliwe jest uzyskanie sinusoidalnych prądów wejściowych oraz wysokiej jakości stanów przejściowych dla warunków, kiedy w pętli regulacji prądu zaimplementowane jest sterowanie powtarzalne, którego parametry dobrane są w procesie optymalizacji rojem cząstek.**

Badanie tej tezy Autor rozprawy zaplanował poprzez realizację celu głównego oraz dziewięciu celi szczegółowych, służących starannej realizacji podstawowego zadania. Jako cel główny przyjął opracowanie zaawansowanego systemu sterowania powtarzalnego dla przekształtnika sieciowego pracującego w warunkach odkształconego napięcia sieci, a jego realizację zaplanował poprzez wykonanie następujących celów szczegółowych:

- analiza konwencjonalnych metod sterowanie przekształtnikiem sieciowym,
- analiza sterowania powtarzalnego,
- synteza sterowania powtarzalnego z opóźnieniem niecałkowitym,
- zaprojektowanie regulatora ze sprzężeniem od wektora stanu, jako konwencjonalnego regulatora prądu,
- zaprojektowanie sterowania powtarzalnego niewrażliwego na zmianę sygnału referencyjnego,
- przeprowadzenie teoretycznej analizy oraz testów symulacyjnych weryfikujących zasadność proponowanych rozwiązań,
- synteza układu regulacji dla przekształtnika sieciowego ze sterowaniem powtarzalnym z opóźnieniem niecałkowitym,
- zaprojektowanie sterowania powtarzalnego dla przekształtnika sieciowego z wykorzystaniem optymalizacji rojem cząstek,
- eksperymentalna weryfikacja proponowanego układu regulacji.

W rozwoju nauki szczególną rolę odgrywa formułowanie tez naukowych oraz ich dowodzenie. Zwyczajowo w rozprawach doktorskich przedstawia się więc tezy definiowane na podstawie dotychczasowego stanu badań, a następnie dowodzi się je. Sposób dowodzenia z reguły określa się poprzez cele naukowe. W ocenianej pracy teza spełnia formalne wymagania, a cel główny jest poprawnie sformułowany. Analizując cele szczegółowe łatwo dostrzec, że ich realizacja wymaga zastosowania różnych metod badawczych wymaganych w naukach inżyniersko-technicznych. Znaleźć tam można odniesienie do określenia stanu wiedzy, studiów literaturowych, badań modelowych i eksperymentalnych, analizy i weryfikacji wyników, a w końcu do formułowania wniosków i ocen. Tym samym uważam, że poprawnie sformułowano tezę, a cele precyzyjnie określają sposób dowodzenia tezy.

5. Charakterystyka rozprawy i ocena zastosowanych metod badawczych oraz uzyskanych wyników badań

Udowodnieniu tezy naukowej podporządkowana jest cała rozprawa doktorska. Przystępując do tego zadania Autor przedstawił najważniejsze elementy teorii dotyczącej przekształtników sieciowych oraz ich sterowania. Zwięźle opisał ich modele matematyczne,

techniki regulacji prądu, przybliżając pojęcie sprzężenia do przodu od zaburzenia, regulatora rezonansowego oraz sterowania od wektora stanu. Względem dalszych części rozprawy rozdział ten ma charakter podstawowy i przeglądowy.

Wskazana w tezie metoda sterowania powtarzalnego scharakteryzowana jest w rozdziale trzecim, w którym Autor podaje konstrukcję układów sterowania i ich własności. Analizuje schematy blokowe, uwagę skupia na układzie regulatora dołączanego w sposób plug-in lub równolegle. Zwraca uwagę na różne metody adaptacji częstotliwości, poprawiające własności układu przy różnej od nominalnej częstotliwości sieci. Przytacza rozważania przy ułamkowym opóźnieniu względem funkcji filtra dolnoprzepustowego oraz regulatora prądu, wyjaśniając przy tym uzyskane warunki stabilności. Podaje przykład struktury niewrażliwej na zakłócenia okresowe wraz z metodyką projektowania.

Kluczową dla badań modelowych częścią dysertacji jest rozdział czwarty. Opisano w nim projekt układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym dla trójfazowego przekształtnika sieciowego pracującego w warunkach odkształconych i asymetrycznym układzie napięć sieci. Odkształcone napięcia powodują konieczność selektywnego doboru parametrów transmitancji regulatorów i filtra. W tezie rozprawy Autor zdecydował przebadać, czy strojenie algorytmu według roju cząstek przyniesie zadowalające rezultaty i pozwoli uzyskać cel, jakim jest uzyskanie odpowiedzi o zerowym błędzie w stanie ustalonym oraz wysokiej jakości działania w stanach nieustalonych. Realizując tak postawiony cel określony został model układu regulacji dla trójfazowego przekształtnika określonego w wirującym układzie odniesienia dq. Analizując parametry układu sterowania powtarzalnego przedstawiane są warunki dla określenia częstotliwości bazowej. Warunki te uwzględniają topologie przekształtnika i rodzaj pracy, mianowicie inną częstotliwość określa się dla stanu symetrycznego napięć sieci, a inną gdy występuje asymetria napięć. Wybór częstotliwości bazowej jest kluczowy dla eliminacji wyższych harmonicznych.

Przyjęto model do optymalizacji parametrów sterowania bazujący na kryterium minimalnej wartości średniej wartości błędu kwadratowego obliczanej według funkcji ISE (Integral Squared Error). Model ten zaprojektowany został w środowisku Matlab. Dane do projektu określono wielowariantowo uwzględniając opcje z/bez sprzężenia do przodu oraz symetrycznym/asymetrycznym układem napięć. Obliczenia optymalizacyjne służące wyborowi parametrów regulatora o ułamkowym opóźnieniu przeprowadzono dla różnej liczby iteracji oraz dla różnych wartości funkcji celu ISE. Uzyskane wyniki dały zbieżne rozwiązania potwierdzając dużą zależność poprawnych nastaw od liczby iteracji.

Po dyskusji wyników, Autor rozszerzył badania, uwzględniając w nich możliwość zmiany parametrów LR filtra wejściowego. Dane te znacząco rozszerzyły zakres wyników. Dało to zwiększone wartości błędów, których ograniczenie wymuszało wprowadzenie kilku częstotliwości bazowych. Podczas dalszych badań zmierzających do zwiększenia odporności układu, parametry regulatora określono za pomocą zmiany biegunów macierzy stanu. Uzyskane wyniki stanowiły kompromis pomiędzy dążeniem do uzyskania dużej dynamiki a odpornością układu. Wyniki zilustrowano na wykresach wskazujących na najwyższą zbieżność oraz wykresach przebiegu zmian prądu w funkcji czasu. Wybór nastaw oceniono wg. miar zapasów fazy i amplitudy określanych na podstawie charakterystyk Bode.

Uzyskane wyniki pokazały, że zaprojektowany system sterowania umożliwia szybką reakcję zarówno na zmiany wielkości zadanej, jak i zakłócenia. Zapewnia on przy tym dobrą stabilność, nawet przy odchyleniu parametrów filtra wejściowego, a współczynnik THD prądu fazowego wynosi zaledwie ok. 1,3-1,5% dla wariantu z badaną asymetrią napięć. Podobnie jak w układzie z regulatorem dead-beat, najlepszą jakość prądu uzyskuje się w układzie ze sprzężeniem do przodu napięcia sieci.

Duże znaczenie dla ostatecznej weryfikacji układu sterowania, modelu i metody optymalizacji mają wyniki badań przedstawione w rozdziale piątym. Do przeprowadzenia badań wykorzystano stanowisko laboratoryjne z podzespołami opisanymi w części modelowej. Dodatkowo stanowisko to wyposażono w układ wprowadzający asymetrię oraz napięcia o dużej zawartości wyższych harmonicznych.

Wykorzystując doświadczenie projektowe opisane we wcześniejszym rozdziale, przeprowadzono serie badań dla różnych konfiguracji układu sterowania. Badania eksperymentalne powtarzały badania symulacyjne, chociaż wielkości odkształcenia napięcia nie były identyczne z uwagi na rzeczywisty charakter sieci. Uzyskane wyniki potwierdziły rezultaty z badań symulacyjnych poświadczając, że zastosowanie sterowania powtarzalnego zdecydowanie zmniejsza zawartość wyższych harmonicznych prądu, przy czym wprowadzenie sprzężenia w przód zawsze daje korzystne rezultaty. Zgodnie z przewidywaniami, zawartość wyższych harmonicznych dla układów o podwyższonej odporności jest nieco wyższa w porównaniu z układem z regulatorem dead-beat, co jest spójne z wynikami symulacji przedstawionymi w rozdziale 4.

6. Możliwości praktycznego zastosowanie uzyskanych wyników oraz perspektywy dalszego doskonalenia metody

Przedstawione w pierwszej części recenzji argumenty odnośnie aktualności tematyki, określają również możliwości praktycznego zastosowania wyników. Autor rozprawy opisuje je we wprowadzeniu przedstawiając jak ważną rolę w tworzeniu energetyki rozproszonej spełniają przekształtniki współpracujące z siecią elektroenergetyczną. W dużej mierze rozwój tej energetyki i jej własności kształtowane są przez przekształtniki sieciowe, a jakość pracy zależy m.in. od sterowania układów przekształtnikowych, które są tematem niniejszej rozprawy. Dalsze perspektywy rozwoju tego kierunku badań mogą polegać na doskonaleniu własności adaptacyjnych oraz zastosowaniu przekształtników wielopoziomowych.

Inne ciekawe zastosowanie przedstawił Autor w ostatnim zdaniu rozdziału „Conclusions”, przewidując możliwość zastosowania sterowania powtarzalnego i metody optymalizacji wg roju cząstek do ograniczenia momentu elektromagnetycznego w przełączalnej maszynie reluktancyjnej. To bardzo ciekawy pomysł, warty z pewnością rozszerzonych badań.

7. Uwagi problemowe

Rozprawę studiuję się z dużym zainteresowaniem. Jej klarowny układ i precyzyjne sformułowania nie budzą zastrzeżeń. Miejscami oczywiście, trzeba sięgnąć do literatury uzupełniającej, ale Autor umiejętnie ją wskazuje. Mimo to, wydaje się, że można było niektóre elementy pracy rozszerzyć i lepiej zredagować. Nie będę przedstawiał zarzutów,

które zwykle w takim miejscu się stawia, a którymi są pytania, dlaczego nie zrealizowano jeszcze kolejnych dodatkowych badań przy większej zmienności parametrów lub przy odmiennie dobranych zaburzeniach sieci elektroenergetycznej. Takie pytania na pewno mogą być uzasadnione, ale rozprawa doktorska to działo stosunkowo zwarte, a na monografię przyjdzie jeszcze dla doktoranta czas.

Mam natomiast uwagi dotyczące dość skromnej interpretacji i ilustracji uzyskanych wyników. Dotyczy to zwłaszcza stanów nieustalonych. Przedstawione przebiegi pokazują widoczne różnice, ale Autor nie zaproponował obiektywnej oceny tych przebiegów. Nie podał również, według jakich kryteriów należy oceniać te przebiegi. Czy priorytetem jest duża szybkość i małe przeregulowania, a może możliwość zwiększenia inercji odpowiedzi, jak to się często robi w układach przekształtnikowych pracujących na sieć?

O odpowiedź na problem kryteriów i interpretacji wyników w stanach nieustalonych proszę doktoranta podczas obrony pracy doktorskiej.

8. Ocena rozprawy

Oceniana praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Opisane osiągnięcia stanowią dużą wartość merytoryczną. Za szczególnie istotne uznaję między innymi:

- Przeprowadzenie analizy powtarzalnego sterowania układu niewrażliwego na zmiany sygnału odniesienia;
- Zaprojektowanie kaskadowego układu sterowania przekształtnika, który zawiera dyskretne sterowanie od wektora stanu oraz sterowanie powtarzalne o ułamkowym opóźnieniu;
- Opracowanie modeli numerycznych i skryptów do zbadania i optymalizacji układu sterowania powtarzalnego;
- Opracowanie kodu programu z proponowanym systemem sterowania i jego implementacja na cyfrowym procesorze sygnałowym;
- Weryfikację opracowanego rozwiązania poprzez eksperymenty na układzie laboratoryjnym i modelu symulacyjnym;
- Udział w projektowaniu, budowie i uruchomieniu laboratoryjnego stanowiska energoelektronicznego.

Wymienione dokonania dowodzą, że teza rozprawy została potwierdzona, a cel główny i cele szczegółowe zostały osiągnięte.

Rozprawa jest dziełem oryginalnym. O oryginalności naukowej wskazuje jej teza i całość dowodzenia tej tezy. Opracowanie dla przekształtnika sieciowego o sterowaniu powtarzalnym nie jest jeszcze osiągnięciem, które nie było wcześniej opisywane, ale za to optymalizacja nastaw według algorytmów roju cząstek jak i wszystkie działania zmierzające do tego rezultatu są ważnymi osiągnięciami doktoranta.

Pod względem sposobu przedstawiania osiągnięć praca jest zwięzła, nie ma zbędnych treści a pod względem redakcyjnym nie mam istotnych uwag wartych do przedstawienie w recenzji.

9. Podsumowanie i wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Strasia stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz szczegółową wiedzą w zakresie projektowania przekształtników sieciowych o niskiej zawartości wyższych harmonicznych i wysokiej jakości pracy w stanach przejściowych. Dowiódł umiejętności formułowania tez, określania celów i ich realizacji, przy zastosowaniu różnych metod badawczych. Wykazał, że potrafi dokonywać analizy wyników i formułować wnioski. Świadczy to o posiadaniu wysokich kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgr inż. Andrzeja Strasia uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika (wg klasyfikacji, określonej w Rozporządzeniu MNiSW z 2018), a wcześniej dyscypliny elektrotechnika.

Biorąc pod uwagę, że przewod doktorski był wszczęty przed dniem 30.04.2019r, a postępowanie prowadzone jest zgodnie z § 6.4 Rozporządzenia MNiSW z dnia 19 stycznia 2018 r., wskazującym, że procedura przeprowadzana jest według wymagań określonych w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882), **stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wobec tego stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Strasia do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.**

