

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska
ul Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław

Wrocław 2022-05-12

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Adama Strasia pt.
**Repetitive Control for a Three-Phase Grid-Tied Converter
Under Distorted Grid Voltage Conditions**

Opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego
Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Politechniki Warszawskiej

1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

W ciągu ostatnich dekad obserwuje się gwałtowny rozwój źródeł energii odnawialnej. Całkowity udział tzw. zielonej energii bilansach energetycznych stale wzrasta. Poszczególne kraje stawiają sobie coraz ambitniejsze cele związane ze znaczącym zwiększeniem udziału energii odnawialnej. Jest to spowodowane koniecznością dywersyfikacji źródeł energii, wprowadzaniem międzynarodowych norm, ograniczaniem emisji gazów cieplarnianych do atmosfery jak i spadkiem cen źródeł odnawialnych. Obecna sytuacja polityczna zmienia zapatrywania na bezpieczeństwo energetyczne krajów europejskich wymuszając szybkie odejście od gazu, węgla i ropy. Ograniczy to produkcję energii z wymienionych surowców. Powstała luka może być minimalizowana przez jeszcze szybszy rozwój źródeł energii odnawialnej.

Jednym z podstawowych elementów umożliwiających łączenie i przesyłanie energii elektrycznej są przekształtniki energoelektroniczne. Umożliwiają one zmianę poszczególnych parametrów energii elektrycznej (napięcie, częstotliwość) na inne a tym samym dopasowanie różnych źródeł energii do sieci zasilającej czy też odbiornika. Bez tych urządzeń elektrycznych nie sposób sobie wyobrazić nowoczesnej energetyki. Od układów przekształtników energoelektronicznych wymaga się uzyskiwania coraz lepszych właściwości dynamicznych i statycznych. Wymagania te dotyczą również konieczności eliminacji (minimalizowania) wpływu zakłóceń na przebiegi zmiennych stanu układu. Badane w pracy



układy mogą być stosowane nie tylko w energetyce ale również w układach napędowych czy magazynach energii.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z zaawansowanymi metodami sterowania przekształtników energoelektronicznych umożliwiającymi dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej. Proponowane algorytmy sterowania umożliwiają redukcje harmonicznych a tym samym zapewniają sinusoidalne przebiegi prądów przy jednoczesnej stabilizacji napięcia obwodu stałego. Opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do najbardziej istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

2. KRÓTKA SYLWETKA KANDYDATA

Pan mgr inż. Andrzej Adam Staś realizował studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym w Politechniki Warszawskiej w Zakład Napędu Elektrycznego Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej. Prace dyplomową obronił w dniu 23.11.2015 a tym samym uzyskał tytuł mgr inż. Studia doktoranckie realizował w okresie 03.2016-02.2022 na Politechnice Warszawskiej w macierzystym Instytucie. Równocześnie (od października 2016) został zatrudniony na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej na którym pracuje do dziś. W bazie Scopus zarejestrowanych jest 10 dokumentów autora cytowanych siedemnaście razy. H-index Kandydata wynosi 3. Podobne wskaźniki podaje baza Scholar.

3. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów podstawowych, spisu treści, rysunków, tabel i literatury. Całość pracy zawarta jest na 132 stronach. Autor odnosi się do 133 pozycji literatury. Oprócz pozycji klasycznych wymagających cytowania, większość zamieszczonych źródeł powstała w ciągu ostatnich lat.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowania i wszechstronne przebadanie układu regulacji opartego na sterowaniu powtarzalnym dla układu trójfazowego przekształtnika sieciowego zapewniającego sinusoidalne przebiegi prądów filtru wejściowego w warunkach odkształconego i asymetrycznego napięcia sieci, zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych.

Bazując na przedstawionym celu pracy w rozprawie zaproponowano następującą tezę naukową:

For a three-phase grid-tied converter which works under distorted grid voltage conditions it is possible to obtain sinusoidal input currents and high quality performance in transients states when a repetitive control is applied in the current control loop with parameters selected in the process of particle swarm optimisation.

Dowodząc tezy naukowej rozprawy przyjęto czytelny sposób postępowania. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki przedstawiono przegląd literatury z zakresu badań. Następnie przedstawiono tezę, cel i zakres pracy. W rozdziale drugim zamieszczono przegląd metod sterowania trójfazowym przekształtnikiem sieciowym. Opisano podstawowe modele matematyczne obiektu badań oraz przedstawiono ich właściwości. Szczegółowo opisano źródła opóźnień w pętli regulacji prądu. Kolejno przedstawiono różne typy regulatorów i techniki wykorzystywane w tej pętli. Opisano regulatory proporcjonalno-całkujące, rezonansowe, stanu oraz możliwość sprzężenia od zakłóceń. Od rozdziału trzeciego zaczyna się najbardziej istotna część rozprawy doktorskiej. W trzecim rozdziale przedstawiono podstawy sterowania powtarzalnego. Zaproponowano sposób adaptacji do zmiennej częstotliwości procesu przez pomocy filtra aproksymującego opóźnienie. Umożliwiło to zaproponowanie struktury sterowania opartego na regulatorze powtarzalnym umożliwiającą dobrą jakość regulacji w przypadku okresowo zmieniających się zakłóceń. Proponowany algorytm był testowany zarówno w przypadku braku i z ograniczeniem sygnału sterującego (napięcie układu DC). W tym drugim przypadku zaproponowano dodatkową procedurę polegającą na przełączaniu wejścia regulatora powtarzalnego. Umożliwiło to dodatkową poprawę właściwości układu podczas zmiany warunku odgraniczenie/brak ograniczenia. Zastosowanie analizowanej struktury sterowania dla trójfazowego przekształtnika sieciowego zaprezentowano w rozdziale czwartym. Zwięźle opisano strukturę sterowania, regulator stanu i filtr. Następnie przedstawiono zastosowanie heurystycznej metody optymalizacji roju do doboru parametrów regulatora powtarzalnego. Opisano funkcje celu, przyjęte parametry procedury optymalizacji i warunki pracy układu. Następnie przebadano wpływ zmian parametrów filtra wejściowego na odporność układu. Zaproponowano procedurę projektowania układu umożliwiającą zwiększenie odporności na błędne parametry filtra. Kolejno omówiono projekt układu sterowania napięcia w obwodzie pośredniczącym. Do doboru parametrów układu wykorzystano metodę linii pierwiastkowych. Przeanalizowano również wpływ lokalizacji zera układu podczas procedury strojenia regulatora. W rozdziale piątym przedstawiono obszerne wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych proponowanej struktury sterowania. Opisano stanowisko laboratoryjne wykorzystane w testach eksperymentalnych. Następnie zaprezentowano wyniki badań trójfazowego przekształtnika sieciowego i ich analizę odnoszących się do proponowanych algorytmów

sterowania. Należy podkreślić znaczną ilość zamieszczonych testów. Pracę zakończono podsumowaniem w którym przedstawiono najważniejsze wyniki dotyczące pracy. Wskazano również na inne możliwe zastosowania regulatora powtarzalnego.

4. OCENA PRACY

W opiniowanej pracy przedstawione zastały zagadnienia związane z zastosowaniem sterowania powtarzalnego do trójfazowego przekształtnika sieciowego. Tematyka i prezentowane wyniki są oryginalne zarówno w skali krajowej jak również światowej. Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, że Autor nie ograniczył się tylko do jednego rozwiązania ale zaprezentował krytyczną analizę porównawczą różnych podejść (rozdział piąty). Kolejną zaletą pracy jest podejście wybrane przez Autora i przedstawienie w rozprawie pełnego cyklu badawczego. Analiza teoretyczna jest poparta licznymi wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentem laboratoryjnym, dzięki czemu założony cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy w pełni udowodniona.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- Analiza różnych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym ze szczególnym uwzględnieniem sterowania powtarzalnego.
- Zaprojektowanie układu sterowania z regulatorem powtarzalnym dla przekształtnika sieciowego niewrażliwego na zmiany sygnału referencyjnego.
- Zaprojektowanie układu sterowania w którym w pętli wewnętrznej znajduje się dyskretny regulator stanu oraz regulator powtarzalny uwzględniający opóźnienie (*fractional delay repetitive controller*).
- Zastosowanie algorytmów rojowych do doboru parametrów regulatora powtarzalnego.
- Zaprojektowanie układu sterownia pracującego poprawnie zarówno w zakresie pracy z jak i bez ograniczenia sygnału sterującego.
- Opracowanie modeli symulacyjnych analizowanych układów regulacji.
- Uczestnictwo w pracach projektowych i wykonawczych stanowiska laboratoryjnego.
- Opracowanie programu sterowania dla stanowiska rzeczywistego.
- Wykonanie serii badań symulacyjnych i testów eksperymentalnych.
- Napisanie pracy w języku angielskim.

Redakcja pracy jest staranna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- Na rysunku 3.12 poszczególne linie dla identycznych wartości współczynnika powinny mieć ten sam kolor.

- Po wzorze 4.13 niepotrzebne wcięcie akapitowe.
- Często używa się dwóch oznaczeń następującego współczynnika: k_{RC} lub k_{rc} .
- W Tabeli 4.7 brakuje dwóch przypadków podanych w Tabeli 4.4.
- Tabela 4.4. oraz rysunki 4.6 i 4.7 powinny zostać przesunięte do sekcji 4.4.5
- W tekście sekcji 4.4.6 Autor używa zwrotów *stability* i *robustness* a przedstawione badania odnoszą się do stabilności. ‘... in order to check ... on the system stability’ i ‘...to check the robustness...’.

Moim zdaniem tych drobnych potknięć jest jednak znacznie mniej niż w standardowej pracy doktorskiej. Świadczy to dużej staranności w przygotowaniu rozprawy.

Po lekturze pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę o odpowiedź:

- W rozdziale drugim Autor opisuje cechy sprzężenia od zakłóceń. Wskazuje, że sprzężenie proporcjonalne nie jest efektywne ze względu na opóźnienie występujące w układzie. Dopiero dodanie do sprzężenia funkcji pierwszej i drugiej pochodnej umożliwia uzyskanie pożądanych właściwości. Jednakże przy aproksymacji opóźnienia za pomocą członu inercyjnego wydaje się, że dodatkowa funkcja pierwszej pochodnej jest wystarczająca. Jaka jest więc przyczyna konieczności użycia również drugiej pochodnej?
- W tym samym rozdziale Autor przytacza właściwości regulatora stanu. Stwierdza, że umożliwia on uzyskanie lepszych właściwości dynamicznych niż systemy z regulatorami PI. Moim zdaniem należałoby być bardziej ostrożnym przy takich stwierdzeniach. Zakładając układ liniowy (do jakiego odnosi się Autor) i dostępność identycznych sygnałów zmiennych stanu, moim zdaniem, właściwości struktur mogą być identyczne. Tutaj podstawowym zagadnieniem jest metodologia doboru parametrów struktur. Zwykle dla układu z regulatorami PI stosuje się podejście kaskadowe. I to może być przyczyną różnic.
- W równaniu 2.25 występuje współczynnik m . Należałoby wspomnieć jak go wyznaczyć.
- W pracy opisano regulator stanu przedstawiony na rys. 2.11. Czy użycie formy przyrostowej regulatora stanu zamiast bezpośredniej wprowadziłoby jakieś zmiany. Dodatkowo współczynnik K_I jest umieszczony za integratorem. Czy jest to poprawne w każdym przypadku? Wartość współczynnika w torze *anti-windup*’u wynosi $1/m$; dlaczego?
- Na stronie 48 przedstawiono trzy wskaźniki jakości sterowania mogące być wykorzystane jako funkcje celu w procesie optymalizacji. Autor zwięźle opisuje zamieszczone wskaźniki i wskazuje ich właściwości. Na koniec, do procesu optymalizacji decyduje się użyć najprostszego z nich (mimo posiadanych wad). Jako powód podaje konieczność ustawienia

dodatkowego parametru α lub β którego wartość nie jest oczywista. Aby zabezpieczyć układ przed zbyt dużymi wzmocnieniami (możliwymi do osiągnięcia przy wybranym wskaźniku) klasyczny regulator zaprojektowany jest analitycznie. Można tutaj postawić kilka pytań. Np. czy dobór większej ilości parametrów (współczynniki regulatora) jest możliwy nawet przy przyjętej funkcji celu (np. przez ograniczenie maksymalnych wzmocnień regulatora) i czy może prowadzić to do lepszych właściwości układu? Czy można użyć inną funkcję celu a jako dodatkowy optymalizowany parametr dodać współczynnik α lub β i pozwolić na jego dobór przez algorytm?

- Na stronie 51 Autor podaje parametry optymalizatora (15 particles, 30 iterations) i stwierdza, że zostały one wyznaczone eksperymentalnie w serii prób. Oznacza to, że badano również algorytm o innych parametrach. Jeśli tak, to proszę o krótki komentarz jakie wówczas były rezultaty?
- Czy czas t_{sd} jest poprawnie zaznaczony na rys. 4.7?
- Dla układu ze zwiększoną odpornością na błędne parametry filtra (podrozdział 4.5) zmieniono parametry optymalizatora. Dlaczego? Z rysunku 4.9 wynika że po 10 iteracjach algorytm znalazł rozwiązanie bliskie optymalnego?
- W rozdziale trzecim przedstawiono badania ukazujące właściwości układu pracującego z i bez ograniczenia. Jak dodatkowy parametr projektowy przyjęto czas opóźnienia przełączenia równy 10ms. Czy ten parametr może być wyznaczony analitycznie czy też bardziej na zasadzie doświadczenia inżynierskiego?
- Podczas doboru parametrów układu regulacji napięcia analizuje się umiejscowienie zera na płaszczyźnie zespolonej. Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie dlaczego jest to takie istotne i jak wpływa to właściwości dynamiczne układu? Czy np. zastosowanie regulatora IP zamiast regulatora PI nie uprościłoby procedury projektowania?
- W Tabeli 4.4. zamieszczono parametry odnoszące się do badanych struktur. Przy zmniejszeniu wartości obu parametrów o 30% układ jest niestabilny, o 15% już stabilny. Dodatkowo rozważa się przypadek zmniejszenia L o 30% przy większym R (układ niestabilny) a odwrotna sytuacja nie jest zamieszczona w Tabeli. Dlaczego? Pojawia się pytanie o dokładne określenie obszarów stabilności układu. Czy można je wyznaczyć analitycznie?
- W podsumowaniu Autor wskazuje na inne możliwe obszary zastosowań regulatora powtarzalnego. Czy możliwe jest zastosowanie tego algorytmu do tłumienia drgań skrętnych o różnych częstotliwościach.

5. PODSUMOWANIE

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę rozprawy. Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Adama Strasia pt. *Repetitive Control for a Three-Phase Grid-Tied Converter Under Distorted Grid Voltages Conditions* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika a zwłaszcza z teorii sterowania, energoelektroniki, modelowania i programowania. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione poprzez badania eksperymentalne wykonane na stanowisku laboratoryjnym.

Należy podkreślić, że materiał zawarty w rozprawie był prezentowany na konferencjach krajowych i zagranicznych. Dodatkowo autor rozprawy publikował w uznanych czasopismach co podkreśla aktualność tematyki i wskazuje na wysoki poziom merytoryczny zagadnień poruszanych w rozprawie. Należy również podkreślić przygotowanie rozprawy w języku angielskim.

Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o tytule i stopniach naukowych i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Dodatkowo, biorąc pod uwagę wyżej wymienione czynniki (oryginalność tematyki, wysoki poziom merytoryczny rozprawy, pełny cykl badawczy, język angielski) wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Aleksy Suck