

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

Wrocław 2019-04-02

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Gałęckiego pt.  
**Sterowanie 3-fazowym przekształtnikiem AC/DC przy zasilaniu napięciem  
odkształconym z wykorzystaniem liniowo-kwadratowego regulatora stanu**

Opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Elektrycznego  
Politechniki Warszawskiej

### 1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

W ostatnich latach dokonuje się swoista rewolucja energetyczna na świecie. W miejsce tradycyjnego modelu produkcji i dystrybucji energii elektrycznej, polegającego na istnieniu dużych elektrowni i rozległych sieci przesyłowych, wprowadza się coraz powszechniej energetykę prosumencką. Bazuje ona na szeregu rozproszonych mikro- i mini- instalacjach generujących energię elektryczną (układy fotowoltaiczne, wiatrowe czy inne) z własnymi magazynami energii. Taki model produkcji, promowany między innymi przez Unię Europejską, posiada szereg zalet. Zmniejsza ilość generowanych zanieczyszczeń do środowiska, zwiększa w pewnym zakresie niezawodność zasilania wybranych obiektów. Generacja energii ze źródeł odnawialnych zmusza jednakże do opracowania całego zbioru procedur określających zasady współpracy pomiędzy lokalnymi źródłami energii a siecią globalną. Elementem łączącym te dwa systemy są przekształtniki energoelektroniczne umożliwiające przesyłanie energii w obie strony.

W opiniowanej rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z zaawansowanymi metodami sterowania przekształtnika AC/DC. Zaproponowano zastosowanie oryginalnych struktur sterowania opartych na sprzężeniu od stanu. W mojej ocenie opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do najbardziej istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Elektrotechnika badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z pięciu rozdziałów podstawowych, streszczenia, spisu symboli i skrótów, spisu treści rysunków i tablic, załącznika oraz literatury. Całość pracy zawarta jest na 115 stronach. Spis literatury obejmuje 144 pozycje, z których większość ukazała się w ostatnich latach.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowanie i wszechstronne przebadanie układu sterowania opartego na liniowo-kwadratowym regulatorze stanu dla przekształtnika AC/DC pracującego przy odkształconym napięciu zasilania.

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

„W kaskadowym układzie regulacji projektowanym dla trójfazowego przekształtnika AC/DC możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości prądów wejściowych przekształtnika zasilanego z sieci o napięciu odkształconym, gdy w pętli podrzędnej układu regulacji występuje liniowo-kwadratowy regulator prądu z dodatkowym sprzężeniem od sygnałów z członów kompensujących a dobór macierzy  $Q$  i  $R$  dla metody LQR realizowany jest w procesie optymalizacji roju cząstek”.

Dowodząc tezy naukowej rozprawy przyjęto czytelny sposób postępowania. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki, omówiono podstawowe struktury sterowania wykorzystywane w przekształtnikach DC/AC w przypadku asymetrii czy odkształceń napięć. Zwrócono uwagę na podejścia wykorzystujące regulator stanu. Bazując na wnioskach płynących z krytycznej analizy literatury sprecyzowano tezę i zakres pracy. Opisano strukturę rozprawy.

Zagadnienia sterowania przekształtnikiem AC/DC przy zasilaniu z idealnego symetrycznego źródła napięcia przedstawiono w rozdziale drugim. Opisano podstawową strukturę sterowania składającą się z nadrzędnego regulatora napięcia DC typu PI oraz z podrzędnej pętli regulacji prądu z regulatorem stanu. Przedstawiono model matematyczny obiektu (trójfazowego przekształtnika AC/DC z indukcyjnym filtrem wejściowym). Następnie omówiono poszczególne algorytmy sterowania prądami w oparciu o regulator stanu: podstawowy układ ze sprzężeniem od wektora stanu, układ rozszerzony o macierz wzmocnień statycznych w torze sygnału referencyjnego, układ z dodatkowymi integratorami i sprzężeniem do przodu od sygnału referencyjnego. Kolejno opisano procedurę doboru wartości regulatora stanu w oparciu o rojowy algorytm optymalizujący. Przedstawiono również sposób projektowania nadrzędnego regulatora napięcia. Zamieszczone wyniki badań symulacyjnych potwierdziły przeprowadzone rozważania teoretyczne.

Najważniejsza część pracy zawarta jest w rozdziale trzecim. Dotyczy ona algorytmów sterowania przekształtnikiem w obecności odkształconego napięcia zasilania. Rozdział ten

został podzielony na cztery główne części, w których omówiono poszczególne warianty układu sterowania. Jako pierwszy przebadano układ z regulatorem stanu z integratorami i dodatkowym sprzężeniem od zakłóceń. Omówiono przebieg procesu optymalizacji nastaw regulatora. Przeanalizowano uzyskane przebiegi i wskazano na niedoskonałości podstawowego rozwiązania (duża zawartość składowych oscylacyjnych). Następnie przebadano układ z dodatkowymi członami rezonansowymi ale bez sprzężenia od zakłóceń. Omówiono zasadę działania członów oscylacyjnych. Zwrócono uwagę na rozszerzenie problemu optymalizacji w tym podejściu. Uzyskane wyniki badań zilustrowano przedstawionymi przebiegami. Na ich podstawie stwierdzono o skutecznym tłumieniu składowych oscylacyjnych. Jako wadę układu wymieniono dość duże odchylenia wartości prądów od sygnałów referencyjnych. Następnie przebadano najpełniejszą wersję struktury regulacji (integratorami, sprzężeniem od zakłóceń i członami oscylacyjnymi). Na podstawie uzyskanych wyników badań dowiedziono jej efektywności w sterowaniu przekształtnika AC/DC. Kolejno omówiono algorytmy ograniczania stanu regulatora prądu z członami oscylacyjnymi.

Rozdział czwarty zawiera weryfikację eksperymentalną opracowanych struktur sterowania. Jej wyniki potwierdzają analizę teoretyczną i badania symulacyjne przedstawione we wcześniejszych częściach rozprawy. Jest to bardzo istotna część rozprawy, ponieważ potwierdza gotowość wdrożenia autorskich algorytmów sterowania w aplikacjach przemysłowych.

W ostatnim rozdziale pracy zawarto wnioski i uwagi końcowe. Wymieniono najważniejsze osiągnięcia i wyniki. Podkreślono oryginalne osiągnięcia Autora pracy.

### **3. OCENA PRACY**

W rozprawie przedstawiono zagadnienia zastosowania regulatorów stanu do sterowania przekształtnikiem AC/DC. Głównym zadaniem autora było zaproponowanie nowej struktury regulacji umożliwiającej na efektywną pracę układu w przypadku zakłóceń w sieci zasilającej. Osiągnięto to poprzez modyfikację klasycznej struktury regulatora przez wprowadzenie do układu dodatkowych elementów (członów oscylacyjnych i sprzężenia od zakłóceń) poprawiających w znaczącym stopniu jakość regulacji. W mojej ocenie, zarówno tematyka jak i prezentowane wyniki są oryginalne w skali nie tylko krajowej ale i światowej.

Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, iż opracowane struktury sterowania zostały wszechstronnie przebadane na stanowisku rzeczywistym potwierdzając tym samym swoje bardzo dobre właściwości. Dużą 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.

Najważniejsze oryginalne osiągnięcia rozprawy zostały wymienione poniżej:

- Zaprojektowanie i analiza teoretyczna układu sterowania przekształtnika AC/DC opartego na regulatorze stanu z integratorami w torze głównym, sprzężeniami do przodu od wartości referencyjnej, z torem sprzężenia od zakłócenia oraz członami rezonansowymi.
- Opracowanie metody strojenia układu sterowania opartej na algorytmie rojowym.
- Opracowanie algorytmu umożliwiającego pracę układu z członami oscylacyjnymi w przypadku występujących ograniczeń.
- Budowa układu laboratoryjnego oraz wszechstronna weryfikacja eksperymentalna zaprojektowanych układów regulacji w różnych warunkach pracy.

Rzeczą wartą podkreślenia jest wysoka zgodność przebiegów zmiennych stanu badanego obiektu uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym z przebiegami wygenerowanymi podczas badań symulacyjnych, co dowodzi zarówno poprawności przyjętego modelu obiektu jak również dużych umiejętności autora pracy. Zaprezentowana analiza oraz wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych udowadniają postawioną tezę.

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

1. W tezie pracy użyto sformułowania: „... występuje... regulator...” Moim zdaniem bardziej odpowiednim słowem jest np.: „jest zastosowany” czy „znajduje się”.
2. Oznaczenia na schematach modeli symulacyjnych nie odpowiada rysunkom w tekście głównym.
3. Mam wątpliwości, czy wyrażenie 2.24 poprawnie odnosi się do wzmożeń  $V_d/V_{dc}$  przedstawionych na rys. 2.12.
4. W podpisie pod rys. 2.13 nie ma informacji o przyłożeniu do układu obciążenia, co może zwiść niewprawnego czytelnika.

Należy podkreślić, że wymienione uwagi nie wpływają w żadnym stopniu na ogólną pozytywną ocenę pracy. Autor w sposób przejrzysty formułuje swoje myśli, co korzystnie wpływa na odbiór i zrozumienie pracy.

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

1. W rozdziale drugim Autor prezentuje schematy blokowe rozważanych układów regulacji. Można łatwo zauważyć, że współczynniki wzmocnień integratora umieszczone są za członem całkującym (np. rys. 2.5 i dalsze). Czy takie podejście jest poprawne? Czy w takim przypadku skokowa zmiana nastaw układu regulacji nie spowoduje powstania dodatkowych stanów przejściowych. Utrudnia to również wprowadzanie ograniczeń.
2. Na stronie 35 Autor opisuje zagadnienia związane z określeniem dynamiki sygnału zadanego. Stwierdza, że jest ona określona przez projektanta dla danego przypadku i w pracy została modelowana przez człon pierwszego rzędu o stałej 2ms. Następnie Autor wspomina, że dana stała została wybrana metodą prób i błędów w postaci wielokrotnie przeprowadzonego procesu optymalizacji. Prosiłbym o podanie kryteriów wpływających na końcowy wybór wartości filtrów.
3. W podrozdziale 2.4 opisana jest procedura strojenia układu za pomocą algorytmu roju. Optymalizowane są dwie wartości  $q$  i  $q_p$  występujące w wyrażeniu 2.21. Upraszcza to problem optymalizacji biorąc pod uwagę, że w ogólnym przypadku występują cztery wartości na przekątnej macierzy  $Q$  i dwie na macierzy  $R$ . Założenie jednakowej wartości dla zmiennych bezpośrednich i związanych z integratorami wydaje poprawne. Zabrakło mi jednak komentarza odnośnie wartości związanych z macierzą  $R$ .
4. Na stronie 38 Autor przedstawia odpowiedź układu na skokową zmianę wartości zadanej przy różnej wartości stałej czasowej filtra w zadajniku. Stwierdza, że w stosunku do układu bez filtra, jego wprowadzenie ograniczyło przeregulowanie do 10%. Może to stworzyć wrażenie, że dalsze zmniejszenie tej wielkości jest już niemożliwe. Dodatkowo prosiłbym o komentarz, czy możliwa jest dalsza poprawa odpowiedzi układu na zmianę zakłócenia. Przedstawienie przebiegów z regulatorem IP ułatwiłoby mi ocenę układu.
5. Problem wprowadzenia ograniczeń do układu sterowania jest zagadnieniem istotnym poruszonym zwłaszcza w przypadku implementacji praktycznej systemu. W moim przekonaniu sposób zaproponowany przez Autora jest dyskusyjny (rozważmy układ bez członów oscylacyjnych). Może on doprowadzić do powstania dodatkowych oscylacji w przebiegach zmiennych stanu. W układzie występują dwa ograniczenia jedno na wyjściu, drugie na integratorze. Sygnał przed blokiem ograniczenia wyjściowego składa się z wielkości zarówno ograniczonych (w torach z integratorami) jak i nieograniczonych. Czy takie składowanie sygnałów jest poprawne? Być może

- zastosowanie układu z przesunięciem integratora na wyjście (postać przyrostowa) poprawi właściwości układu podczas pracy w ograniczeniu?
6. Na stronie 48 Autor opisuje zależności pomiędzy wartością opóźnienia występującego w torze zakłóceń a uchybem regulacji prądu w stanie ustalonym. Nie zamieszcza jednak przebiegów obrazujących tę tezę. Prosiłbym o ich przedstawienie.
  7. W opiniowanej rozprawie Autor wyznacza wartości macierzy  $Q$  determinujące wartości współczynników w regulatorze stanu. Chciałbym poznać opinię Autora na temat alternatywnego podejścia – bezpośredniego wyznaczania wartości wzmacnień tego regulatora za pomocą algorytmu optymalizacyjnego.

#### **4. PODSUMOWANIE**

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy. Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Andrzeja Gałęckiego pt. *Sterowanie 3-fazowym przekształtnikiem AC/DC przy zasilaniu napięciem odkształconym z wykorzystaniem liniowo-kwadratowego regulatora stanu* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dziedziny Elektrotechniki a zwłaszcza z energoelektroniki, teorii sterowania, oraz informatyki. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione poprzez wszechstronne badania eksperymentalne wykonane na istniejącym stanowisku badawczym.

Należy podkreślić, że opiniowana rozprawa doktorska była współfinansowana przez NCBiR w ramach projektu „Nadprzewodzący magazyn energii z interfejsem energoelektronicznym do zastosowań w sieciach dystrybucyjnych”. Autor rozprawy publikował w uznanych czasopismach, co podkreśla aktualność tematyki i wskazuje na wysoki poziom merytoryczny zagadnień poruszanych w rozprawie. Należy również podkreślić wysoki edytorski poziom pracy. Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska 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.