



Wrocław, 17.11.2024 r.

dr hab. inż. Robert Lis, prof. uczelni

robert.lis@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Michała Piekarza

„Analiza interakcji w morskich systemach elektroenergetycznych”

Promotor pracy: dr hab. inż. Sylwester Robak, prof. uczelni

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 15 października 2024 roku oraz zawiadomienie z dnia 23 października 2024 r. podpisane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego. Recenzja opiera się o postanowienia ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. z 2016 r. poz. 882). Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Michałowi Piekarzowi stopnia doktora nauk technicznych w zakresie dyscypliny elektrotechnika, wg nowej klasyfikacji w zakresie dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

1 Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa liczy 182 strony. Dysertacja zawiera 121 rysunków oraz 68 tabel. Rozprawa jest podzielona na 7 rozdziałów merytorycznych, w tym wprowadzenie oraz wnioski i uwagi końcowe. Spis literatury załączony w rozdziale nr 8 zawiera łącznie 102 pozycje, w tym 3 prace autorskie Kandydata, z których wszystkie opublikowano w czasopiśmie z IF. Praca jest napisana komunikatywnym językiem. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych błędów stylistycznych i gramatycznych. Układ pracy jest przykładem zastosowania poprawnej metody badawczej, rozumianej jako zbiór czynności niezbędnych do rozwiązywania problemu technicznego. W tym łańcuchu działań zawarto: (1) przedstawienie problematyki i tematu rozprawy w szerszej perspektywie, (2) prezentację stanu wiedzy, (3) rozważania teoretyczne, (4) badania symulacyjne (dla 3 wariantów konfiguracji systemu testowego) oraz (6) podsumowanie i wnioski końcowe. Na końcu pracy Autor zamieścił obszerne, 10 stronicowe zestawienie rysunków i tabel oraz załączniki z pozostałymi wynikami

wariantów II i III, także zestawienie ważniejszych symboli i akronimów. Materiały graficzne w pracy są staranne i czytelne.

2 Wybór tematu rozprawy

Tematem przedstawionej rozprawy jest opracowanie nowego sposobu doboru właściwych sygnałów wejściowych wielofunkcyjnych regulatorów dla elementów składowych morskiego systemu elektroenergetycznego w celu poprawy stabilności kątowej wielomaszynowego systemu elektroenergetycznego. Tak postawione zadanie wymaga nie tylko analizy pojedynczych elementów, ale także systemów złożonych z wielu elementów. Do analiz wybrane zostały układy stabilizatorów systemowych: regulator układu kompensacji SVC oraz regulator napięcia wzbudzenia generatora synchronicznego. Autor szczególną uwagę słusznie przykładą do kwestii doboru struktury regulacyjnej i analizy interakcji sygnałów wejściowych i wyjściowych regulatorów zdecentralizowanych, w tym wzajemnego oddziaływania pomiędzy sygnałami, które mogą dotyczyć układów regulacji różnych elementów systemu elektroenergetycznego. Głównym celem odpowiedniego strojenia parametrów regulatorów jest uzyskanie celów regulacyjnych przy minimalizacji interakcji pętli regulacyjnych. Istotnym elementem projektowania układów sterowania są identyfikacja i modelowanie. Z reguły przy tym zachodzi konieczność stosowania różnych metod identyfikacji interakcji, a zagadnienia te analizuje doktorant w rozprawie. Istotną cechą dysertacji jest próba opracowania analitycznego podejścia do zagadnienia metodyki badań interakcji związanych z oddziaływaniem układów regulacji w morskim systemie elektroenergetycznym i projektowania układów regulacji – do strojenia parametrów regulatorów dodatkowych pętli regulacyjnych. To jest bardzo interesujące i wartościowe, gdyż dominuje obecnie tendencja do wieloaspektowych badań symulacyjnych. Skuteczne narzędzia analityczne umożliwiają znacznie szybsze uzyskanie efektywnych rozwiązań problemu doboru parametrów regulatora. Zagadnienie jest ważne zarówno z poznawczego jak i zwłaszcza użytkowego punktu widzenia. Uważam, że tematyka podjęta w ocenianej rozprawie jest aktualna i wpisuje się w ten zakres prac. Tematyka jest nową propozycją, tym większa zasługa Autora i Promotora oraz zawiera się w obszarze badań dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

3 Ogólna ocena wartości naukowej rozprawy

W rozdziale drugim można znaleźć uzasadnienie podjęcia tematu badań oraz tezę rozprawy. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury tematu Autor zauważa, że zagadnienia związane z możliwością identyfikowania oraz charakteryzowania czynników mających wpływ na powstawanie i łagodzenie interakcji nie są wystarczająco zbadane. Dlatego też zbadanie możliwości zastosowania wieloetapowej metodyki badań identyfikacji interakcji w morskim systemie elektroenergetycznym Autor stawia sobie za cel rozprawy doktorskiej. Na tej podstawie Autor sformułował następującą tezę

pracy: „Możliwe jest opracowanie wieloetapowej metodyki badań interakcji w morskich systemach elektroenergetycznych, która wykorzystuje liniowe metody analiz interakcji, pozwala na wszechstronne badanie interakcji, umożliwia dobór sygnałów wejściowych układów regulacji oraz strojenie parametrów regulatorów pod kątem poprawy stabilności systemu elektroenergetycznego”. Zdaniem recenzenta cel i zakres pracy są dobrze i jasno zdefiniowane, natomiast forma postawionej tezy jest dyskusyjna. Sformułowanie „wszechstronne badanie interakcji” nie określa kryteriów oceny złożoności oraz stwierdzenie „pod kątem poprawy stabilności systemu elektroenergetycznego” sprawia wrażenie braku precyzji. Przez to weryfikacja tak sformułowanej tezy jest uznaniowa. Moim zdaniem, udowodnienie tezy może mieć znaczenie praktyczne dla poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego. Potrzebujemy narzędzi obliczeniowych i danych do przeprowadzenia analiz interakcji w oparciu o różne metody i dla różnych wariantów układów pracy systemów elektroenergetycznych, potrzebujemy metod pozwalających na wykorzystanie wyników tych modeli oraz metod do odpowiednich zastosowań praktycznych. W dalszej części Autor definiuje 6 zadań szczegółowych, które konsekwentnie realizuje w pracy.

Rozdział trzeci to opis konfiguracji morskich sieci elektroenergetycznych oraz omówione przyłączonych do nich źródeł wytwórczych i charakterystycznych odbiorników mocy. Dyskusyjny jest dobór konfiguracji układów przesyłowych, stanowiących część morskich sieci elektroenergetycznych i jedynie krótkie scharakteryzowanie rozbudowanej topologii sieci zamkniętych.

W rozdziale czwartym Kandydat przedstawia liczne metody identyfikacji interakcji sygnałów - par wejść/wyjść regulatorów oraz metody identyfikacji wzajemnego oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elementami systemu elektroenergetycznego. Dyskusyjny jest dobór metod identyfikacji, natomiast dla zadania zbadania interakcji sygnałów Autor korzysta z narzędzi pakietu MATLAB/Simulink (Simulink Control Design), które odpowiadają aktualnym uznanym metodom w tym zakresie. Zaprezentowane zostały metody analizy interakcji m. in.: metoda macierzy względnego wzmocnienia (RGA- *Relative Gain Array*), metoda dynamicznej macierzy względnego wzmocnienia (DRGA - *Dynamic Relative Gain Array*) oraz metoda uogólnionego względnego dynamicznego wzmocnienia (GDRG - *Generalized Dynamic Relative Gain*), które zostały zaimplementowane przez Autora.

Rozdział piąty przedstawia uniwersalny model testowy morskiego systemu elektroenergetycznego 110 kV i 33 kV, który obejmuje opis systemu złożonego z pojedynczych obiektów takich jak: turbiny wiatrowe, farmę wykorzystującą energię prądów morskich, generatory synchroniczne, układy kompensacji mocy biernej, odbiory statyczne i dynamiczne, a także linie, transformatory i regulatory. Wykorzystany został formalizm opisu czwórników, które są łączone kaskadowo. W celu poprawnego zamodelowania elementów, w pierwszym etapie zostały przygotowane modele dynamiczne,

a po weryfikacji zachowania pojedynczego obiektu jego równania zostały zlinearyzowane. Dwuetapowa weryfikacja polegała najpierw na przeprowadzeniu symulacji stanu przejściowego na skutek skokowej zmiany momentu/mocy i obserwacji wynikowych przebiegów, następnie Autor przeprowadził analizę wartości własnych np. częstotliwości charakterystycznych, które uzyskał po wykorzystaniu funkcji szybkiej linearyzacji modelu nieliniowego. Po linearyzacji poszczególne układy zostały podzielone na bloki i powiązane ze sobą odpowiednimi sygnałami wejściowymi i wyjściowymi. Dla każdego z obiektów sporządzono zestawienie wektorów zmiennych stanu oraz sygnałów wejściowych i wyjściowych.

Obszerny rozdział szósty przedstawia implementację wybranych metod z rozdziału czwartego dla wybranych obiektów z rozdziału piątego: regulatora układu kompensacji mocy biernej SVC oraz regulatora napięcia wzbudzenia generatora synchronicznego elektrowni gazowej. Rozważania teoretyczne zweryfikowano na drodze symulacji w trzech etapach: 1. wstępne statyczne obliczenia rozpliwów mocy i napięć węzłowych w testowej sieci morskiej (PowerFactory) dla trzech różnych konfiguracji (warianty I, II, III) na potrzeby obliczenia stanu normalnego/początkowego; 2. symulacja interakcji z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania z zaimplementowanymi liniowymi metodami tj.: analiza wrażliwości, charakterystyki amplitudowo – fazowe, prosta metoda macierzy relatywnego wzmocnienia RGA, metody DRGA i GDRG; 3. etap przeprowadzenia procesu optymalizacji parametrów regulatorów w celu dostrojenia pętli regulacyjnych wybranych obiektów z wykorzystaniem oprogramowania Matlab/Simulink/Control Design.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie, wnioski oraz wskazanie dalszych kierunków badań.

Podsumowując ocenę zawartości pracy stwierdzam, że głównymi osiągnięciami Kandydata są:

- Opracowanie i weryfikacja koncepcji wieloetapowej analizy interakcji w morskim systemie elektroenergetycznym bazującej na liniowych metodach analizy interakcji, która ukierunkowana jest na identyfikację niekorzystnych zjawisk w aspekcie zagrożenia utratą stabilności kątowej lokalnej oraz dobór sygnałów wejściowych stabilizatorów systemowych generatora synchronicznego oraz kompensatora SVC.
- Opracowanie autorskiego oprogramowania i przeprowadzenie szeregu badań symulacyjnych, weryfikujących analizy teoretyczne, dla różnych liniowych metod analizy interakcji (RGA, DRGA, GDRG).
- Zmodyfikowanie oryginalnej metody DRGA poprzez wprowadzenie dodatkowej filtracji cyfrowej, w celu wygładzenia przebiegów wartości DRGA i dokładniejszej analizy przebiegów wybranych par sygnałów wejściowych i wyjściowych.
- Uogólnienie uzyskanych wyników dla różnych wariantów układu pracy morskiej sieci zastępczej.

4 Wątpliwości i uwagi dyskusyjne

W trakcie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań i wątpliwości. Większość z nich ma charakter dyskusyjny, dlatego proszę o odpowiedź na nie w trakcie publicznej obrony.

1. W rozdziale 3.4 Autor przedstawia możliwości zwiększenia potencjału istniejących sieci morskich o topologię sieci zamkniętej. Dlaczego Autor tej pracy pominął ją i nie zastosował w modelu testowym o „uniwersalnym” charakterze? Dlaczego nie uwzględnił jej w dalszych kierunkach badań w 7 rozdziale? Czy wnioski sformułowane dla wariantów I-III nt. interakcji w zakresie oscylacji elektromechanicznych (np. strona 77, akapit 3) można uogólnić dla wariantu sieci morskiej w układzie zamkniętym?
2. Klasyfikacja różnych metod analiz interakcji w wersji przedstawionej w pracy jest dowodem erudycji Autora, lecz jej wartość informacyjna dla czytelnika jest ograniczona. Lepiej byłoby dokonać wyboru metody i uzasadnić ten wybór przedstawiając zalety stosowanej dalej techniki badań w relacji do innych możliwych i znanych narzędzi analizy. Autor nie uzasadnił dokonanego wyboru. W rozważanym przypadku charakter danych oraz cel analiz jest dokładnie zdefiniowany, a więc wybór rekomendowanej metody powinien być możliwy. Badania powinny potwierdzić lub zanegować trafność wyboru.
3. W treści pracy Autor zamiennie posługuje się określeniem: „stabilność systemu elektroenergetycznego”, „stabilność statyczna (lokalna)”, „stabilność kątowna”, które jest nieprecyzyjne. Jaki rodzaj stabilności systemu elektroenergetycznego Autor wziął pod uwagę formułując wnioski w zakresie modelowania morskiego systemu elektroenergetycznego? Bez precyzyjnego wskazania trudno jest zgodzić się z wnioskiem o uznaniu skuteczności proponowanej metody przy strojeniu parametrów regulatorów.
4. Którą wersję oprogramowania do analizy systemów elektroenergetycznych tj. PowerFactory wykorzystano do obliczeń rozplądów mocy i napięć (strona 72, akapit 3)? W jakim środowisku opracowano autorski program (strona 18, pkt. 4)? Jakie są czasy obliczeń potrzebne na realizację jednego scenariusza? (tutaj warto podać także na jakiej platformie sprzętowej wykonywane są obliczenia – parametry jednostki obliczeniowej). Której wersji oprogramowania Matlab/Simulink używano podczas strojenia parametrów regulatora (strona 107, akapit 2)? Jakie są czasy obliczeń potrzebne na realizację jednego scenariusza? (tutaj warto podać także na jakiej platformie sprzętowej wykonywane są obliczenia – parametry jednostki obliczeniowej) – podobnie jak powyżej.
5. Dobór par sygnałów wejściowych i wyjściowych do badania interakcji został dokonany na podstawie wiedzy eksperckiej i przeglądu literatury. Dlaczego zestawy sygnałów różnią się w zależności od zastosowanej metody analizy interakcji (Tabela 6.5 i Tabela 6.14)?

6. W zakresie dotyczącym strojenia regulatorów: w jaki sposób poszczególne kryteria wpływają na stabilność całego morskiego systemu elektroenergetycznego? Czy istnieją dodatkowe kryteria, które mogłyby poprawić efektywność strojenia na poziomie systemowym, ale nie zostały uwzględnione (strona 105, akapit 2)?
7. Funkcja celu opisana w dziedzinie częstotliwości opiera się jedynie o dwa podstawowe kryteria: zapas wzmocnienia i zapas fazy. Uzasadnione jest zastosowanie kryterium wrażliwości (ang. *maximum sensitivity*) w tego typu analizach lub przybliżone obliczenie na podstawie zapasów wzmocnienia i fazy (strona 106, akapit 4).
8. Na jakiej podstawie dobrano wartości zapasu wzmocnienia i zapasu fazy (strona 106, akapit 5)?
9. Na jakiej podstawie dobrano wartość współczynnika tłumienia? Czy w materiale nie znajduje się błąd, aktualnie współczynnik tłumienia wynosi 0.05, co wskazuje na możliwość uzyskania wyników bliskich granicy stabilności (strona 107, akapit 2).
10. W jaki sposób różne funkcje celu wpływają na siebie nawzajem? Czy i jak zmienia się wektor funkcji polioptymalizacyjnych w różnych warunkach pracy systemu? Jak oceniana jest skuteczność wybranych funkcji celu dla analizowanego morskiego systemu elektroenergetycznego (strona 106, akapit 1)?
11. Wnioski przedstawione w pracy mają charakter opisu uzyskanych wyników z małym udziałem rekomendacji i zaleceń użytkowych/praktycznych. Warto by zatem przedstawić tabelaryczne zestawienie uzyskanych wyników, o charakterze jakościowym (nie ilościowym), uzyskanych analiz interakcji dla wybranych metod i wariantów konfiguracji sieci testowej.

Bardzo proszę, aby w trakcie obrony Doktorant odniósł się do wszystkich powyższych uwag oraz wskazał, w przypadku których z przeprowadzonych badań otrzymane wyniki zaskoczyły Autora, tzn. były inne niż oczekiwane.

5 Dodatkowe uwagi krytyczne o charakterze redakcyjnym

W pracy są nieliczne błędy redakcyjne, językowe i interpunkcyjne. Chciałbym zwrócić uwagę na kilka z nich:

1. W języku formalnym i pisanym należy trzymać się zasady dotycząca stosowania słów "liczba" i "ilość", która jest związana z rozróżnieniem między rzeczownikami policzalnymi i niepoliczalnymi (np. strona 15 akapit 1, strona 35 akapit 4).
2. Warto pamiętać o tzw. zasadzie sierotek i nie pozostawić na końcu linii pojedynczych liter, takich jak spójniki (np. "i", "a"), przyimków (np. „w”, „z”) lub innych krótkich wyrazów, ponieważ powoduje to nieestetyczny wygląd tekstu.
3. Na stronie 36, we wzorze (4.1) omyłkowo pominięto oznaczenie liczby wejść - „r”.

4. Zwrot "tylko i wyłącznie" jest uznawany za tautologię, czyli zbędne powtórzenie tej samej treści za pomocą różnych słów (pierwsza linia wiersza tekstowego na stronie 41).
5. Na stronie 78 omyłkowo podano zły opis sygnału prędkości kątowej generatora synchronicznego – Tabela 6.5 - wiersz lp. 1.
6. Opis wyników pracy na stronie 89: „Dla pary nr 1 ($U_{pss} - \omega_{sg1}$) zarówno zmiana długości, jak i zmiana obciążenia miała wpływ na wartości amplitudy z obu rozpatrywanych zakresów częstotliwości.” – jest nieprecyzyjny w kontekście zapisu na stronie 78 - ostatni akapit .
7. Opis Tabeli 6.13 na stronie 92 jest nieprecyzyjny.
8. W rozdziale 11.6 Autor nie podaje wielkości i wartości bazowych zastosowanych do przeliczenia na jednostki względne parametrów zastępczych testowego systemu.
9. Szkoda, że Autor nie poświęcił więcej czasu na eliminację wielu błędów typograficznych np. na stronach 32, 35, 42, 63, 115.

Pomimo powyższych uwag stwierdzam, że Autor potrafi redagować teksty techniczne i odbiór całości rozprawy jest pozytywny pod względem redakcyjnym.

6 Podsumowanie i wniosek końcowy

W podsumowaniu powyższych uwag uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Piekarza pod tytułem „*Analiza interakcji w morskich systemach elektroenergetycznych*” zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Zapowiadane tytułem i sformułowane w rozdziale drugim cele zostały osiągnięte. Przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy z wyraźnym nadmiarem w zakresie dyscypliny elektrotechnika oraz wg nowej klasyfikacji w zakresie dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Autor wykazał się także dobrym opanowaniem metod badań empirycznych i symulacyjnych co świadczy o posiadaniu kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Przedstawione uwagi krytyczne, często dyskusyjne nie podważają tej oceny.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Piekarza pod tytułem „*Analiza interakcji w morskich systemach elektroenergetycznych*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Zgodnie z obowiązującymi przepisami stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Piekarza do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

Robert Lis