



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI



dr hab. inż. Jacek Klucznik, prof. uczelni
Katedra Elektroenergetyki

31.08.2021

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Sapuły
pt.: „Sterowanie generatorem synchronicznym posiadającym obwody wzbudzenia
w osiach d, q poprawiające stabilność systemu elektroenergetycznego”**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Łukasz Rajmund Nogal, prof. uczelni

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Sapuły pt.: „Sterowanie generatorem synchronicznym posiadającym obwody wzbudzenia w osiach d, q poprawiające stabilność systemu elektroenergetycznego”, została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 2 lipca 2021 r. (sygn. RPW/9671/2021), zgodnie z Uchwałą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 29 czerwca 2021 roku.

I Ocena ogólna pracy

1. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

W ogólnym ujęciu, recenzowana praca dotyczy trzech zagadnień elektrotechniki, którymi są:

- stabilność systemu elektroenergetycznego;
- tłumienie kołysań elektromechanicznych
- synteza układów regulacji maszyny synchronicznej

O ile trzy powyższe zagadnienia są szeroko dyskutowane w zasadzie od początku istnienia systemów elektroenergetycznych, to Doktorant, na podstawie przeglądu światowej literatury zauważył pewną niszę, w której postanowił ulokować swoją pracę. Zagadnienia stabilności, tłumienia kołysań i syntezy układów regulacji połączył z rzadko spotykanym typem maszyny synchronicznej wyposażonej w dwa uzwojenia wzbudzenia (maszyny *ASTG Asynchronous Synchronous Turbo Generator*). Układy takie pracują jedynie w Rosji i na Ukrainie. Doktorant wykazuje jednak, że (Rozdział 3) układy takie mają szereg zalet, z których najważniejsze to zwiększone możliwości poboru mocy biernej przez maszyny oraz lepsze tłumienie kołysań elektromechanicznych względem klasycznych generatorów synchronicznych. Przegląd literatury, pozwala zauważyć Doktorantowi, że układy sterowania wykorzystywane dla maszyn *ASTG* nie zawierają w swoich strukturach układów tłumienia kołysań elektromechanicznych jak ma to miejsce dla typowych turbo i hydro generatorów przyłączonych do systemu elektroenergetycznego. Układy takie nazywane są stabilizatorami systemowymi i powszechnie oznaczane są skrótem *PSS*. W efekcie dyplomant stawia w pracy następującą tezę:

„Możliwe jest wyprowadzenie algorytmu sterowania generatora synchronicznego z obwodami wzbudzenia w osiach d , q zapewniające dobre tłumienie kołysań elektromechanicznych, a tym samym poprawiające stabilność systemu elektroenergetycznego.”

W mojej opinii teza pracy nie do końca jest spójna ze wcześniejszymi rozważaniami Doktoranta. Przecież podaje On, zgodnie z cytowaną literaturą, że maszyny typu ASTG charakteryzują się dobrym tłumieniem kołysań elektromechanicznych. Zatem ten fragment w tezie wydaje się niepotrzebny. Recenzent uznaje, że celem do realizacji w pracy, jest synteza układu regulacji poprawiającego stabilność systemu elektroenergetycznego i (poprawiającego) tłumienie kołysań elektromechanicznych.

Warto tu dodać, że mimo niszowości podejmowanego problemu, zagadnienia poruszane w rozprawie mogą być istotne dla Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), ze względu na prowadzone analizy dotyczące wymiany energii elektrycznej między Polską a Ukrainą. Plany te uwzględniają połączenie synchroniczne KSE z tzw. Wyspą Bursztyńską, gdzie właśnie zainstalowane są generatory typu ASTG.

Na powyższej podstawie stwierdzam, że sformułowany przez Doktoranta problem naukowy został trafnie i jasno zaprezentowany i uznaję tematykę rozprawy za ważną, aktualną oraz wybraną prawidłowo, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym.

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

Jak zauważono wcześniej, tematyka maszyn ASTG jest dość wąską dziedziną, charakteryzującą się względnie małą liczbą publikacji. Na tym tle wydaje się, że w pracy odwołano się do wszystkich ważniejszych publikacji z tej dziedziny, w tym wielu publikacji rosyjskojęzycznych. Doktorant pominął jednak interesującą publikację z roku 2019¹ poruszającą aspekty praktyczne zastosowania generatorów ASTG, w kontekście wspomnianej wcześniej Wyspy Bursztyńskiej. Z kolei, zakres literatury obejmujący elektromechaniczne stany przejściowe, zagadnienia stabilności oraz modelowania matematycznego obejmuje aktualny stan wiedzy i zawiera publikacje polskie i anglojęzyczne.

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

Autor rozwiązał właściwie postawione zagadnienia i problemy. Formułując nowy algorytm sterowania maszyną ASTG Doktorant wykorzystał do tego elementy analizy matematycznej oraz funkcję Lapunowa. Z kolei oceny zaproponowanego rozwiązania dokonał opierając się o symulacje w dziedzinie czasu oraz analizę modalną. Są to w zasadzie standardowe metody postępowania w przypadku rozwiązywania podobnych problemów. Proces analizy i oceny uzyskanych wyników został generalnie przeprowadzony właściwie, jakkolwiek pewne uwagi związane ze sposobem prowadzenia analiz zawarto w rozdziale recenzji II Szczegółowa ocena pracy.

¹ K. Pokrovskiy, A. Muzychak, O. Mavrín, V. Oliinyk. Analysis of modes of asynchronized generator in extra-high voltage power grid. Energy Engineering and Control Systems, 2019, Vol. 5, No. 2, pp. 57 – 65.

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.

W pracy przedstawiono nowatorski sposób sterowania maszyną ASTG. Jest to bez wątpienia autorskie rozwiązanie Doktoranta. Kolejnymi osiągnięciami autora są:

- opracowanie w środowisku Matlab/Simulink modelu matematycznego generatora synchronicznego z obwodami wzbudzenia w osiach d, q pracującego w trybie synchronicznym,
- opracowanie w środowisku Matlab/Simulink modelu jednomaszynowego generator – sieć sztywna, oraz wielomaszynowego, zawierającego trzy maszyny,
- implementacja nowego algorytmu sterowania generatora typu ASTG,
- optymalizacja parametrów układów sterowania mających na celu minimalizację wskaźnika jakości regulacji dla układu generator - sieć sztywna,
- wykonanie analizy porównawczej uzyskanych wyników, dotyczącej zdolności tłumienia kołysań przez wybrane rozwiązania,
- omówienie technicznej możliwości realizacji zaproponowanej metody sterowania.

Wśród osiągnięć Doktoranta wysoko oceniam budowę modeli symulacyjnych w programie Matlab/Simulink. Samodzielna budowa modeli elementów systemu elektroenergetycznego od podstaw tworzy solidny warsztat badawczy dla realizacji dalszych prac naukowych w dziedzinie elektroenergetyki.

Recenzowana praca nie odbiega od standardów w literaturze światowej pod względem stosowanych metod i technik obliczeniowych.

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

Praca napisana jest na dobrym poziomie językowym. Zachowane są zasady ortografii, gramatyki i interpunkcji. W pracy zdarzają się co prawda zdania, lub sformułowania, które można by skonstruować inaczej, aby polepszyć jakość przekazu, ale nie utrudniają one odbioru pracy. Doktorant sprawnie uniknął przeładowania pracy tabelami i rysunkami zawierającymi wyniki symulacji, prezentując jedynie najistotniejsze wielkości. Odwołania do rysunków i tabel w tekście pracy zrobione są prawidłowo. Również odwołania do literatury i jej spis zrobione są właściwie. Zauważone, najistotniejsze uchybienia w zakresie języka i strony edycyjnej pracy zawarto w rozdziale II recenzji.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych

Zaproponowany przez Doktoranta sposób sterowania generatorem typu ASTG pozwala na istotne poprawienie tłumienia kołysań elektromechanicznych i pozwala na pracę generatora przy zachowaniu stabilności w obszarze poboru znacznej mocy biernej przez generator. Być może podobne rozwiązanie mogłoby być zastosowane w Polskim Systemie Elektroenergetycznym w celu kompensacji mocy biernej. Obecne w tym celu stosuje się dławiki charakteryzujące się bardzo ograniczonymi możliwościami sterowania.

II Szczegółowa ocena pracy

1. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

1.1. Układy pokazane na rysunkach 5.2 i 5.3 nie będą dawały jednakowej odpowiedzi w przypadku gdy sygnał wejściowy u spowoduje wejście bloku całkowitego w nasycenie. Wskazane aby doktorant porównał odpowiedzi obu układów w dziedzinie czasu w stanie w jakim powinno wystąpić nasycenie. Czy w obu przypadkach sygnał wyjściowy zostanie ograniczony do przedziału $U_{A \text{ MIN}} \leq y \leq U_{A \text{ MAX}}$?

1.2. Wykorzystywanie wskaźnika jakości obliczanego na podstawie kilku zmiennych funkcji celu w optymalizacji zawsze budzi wątpliwości co do przyjętych wartości współczynników wagowych. W pracy zabrakło głębszej dyskusji dlaczego przyjęto współczynniki o wartościach 1, 10 i 100. Warto było pokazać ile wynoszą poszczególne składowe funkcji celu zależne od odchyłek mocy, odchyłek prędkości i odchyłek napięcia i na tej podstawie przeprowadzić dyskusję o doborze współczynników wagowych. Przy okazji nasuwa się wątpliwość, czy odchyłki prędkości $\Delta\omega$ wyrażane są faktycznie w jednostkach względnych, ponieważ w dalszej części pracy (rozdział 9.3) na rysunkach przedstawiających odpowiedzi układu w dziedzinie czasu prezentowane są one w rad/s.

1.3. Symulacje przeprowadzono dla dwóch początkowych stanów pracy generatora tj. przy napięciu znamionowym i przy napięciu wynoszącym $0,8 U_n$. W obu przypadkach generator pracował ze znamionową mocą czynną. Nie podano jakiemu poziomowi mocy biernej odpowiadały te stany. Zwłaszcza dla stanu obniżonego napięcia interesujące było by określenie jak duży był pobór mocy biernej przez generator. Czy analizowano efektywność tłumienia kołysań elektromechanicznych przy obciążeniu mocą czynną odbiegającym od znamionowego?

1.4 Z powyższą uwagą związane jest pytanie o dobór impedancji linii oraz mocy zwarciowej systemu elektroenergetycznego w układzie jednomaszynowym. Jakiej długości linii odpowiada założona impedancja i czy jest to przypadek realistyczny w warunkach polskich i światowych?

1.5. Czy zasadne jest porównywanie odpowiedzi generatora synchronicznego z maszynowym układem wzbudzenia z odpowiedzią generatora, którego uzwojenie wzbudzenia zasilane jest ze statycznego (tyrystorowego) układu wzbudzenia?

1.6. Z tabel a.11 i a.12 wynika, że w wyniku optymalizacji dla stabilizatora systemowego jednowejściowego uzyskano wartości stałych czasowych zbliżone do wartości wyjściowych (literaturowych), a zmianie uległ jedynie współczynnik wzmocnienia. Oznacza to, w mojej opinii, że metoda optymalizacyjna nie poradziła sobie z problemem, czego efektem jest słaba poprawa tłumienia kołysań. Uważam zatem, że prezentowane przebiegi w dziedzinie czasu i wskaźniki jakości dla generatora synchronicznego ze stabilizatorem typu PSS1A są zbyt pesymistyczne. Podobne wątpliwości dotyczą optymalizacji parametrów stabilizatora dwuwiejściowego. Szkoda, że doktorant nie wykorzystał metod optymalizacji opisywanych między innymi w pracy [54] polegających na dopasowaniu przesunięcia fazowego realizowanego przez człony korekcyjne stabilizatora do charakterystyki generatora.

1.7. Komentarz na stronie 97 akapit 2 jest niewłaściwy. To wartości oznaczone na zielono, a nie na czerwono związane są ze zmiennymi stanu opisującymi ruch wirnika. Potwierdzają to wartości współczynników udziału prezentowane w tabelach c.5. – c.8.

2. Uwagi o charakterze redakcyjnym

- 2.1. Należy unikać odwołań do literatury w streszczeniu.
- 2.2. Dyskusja na temat nazewnictwa generatora posiadającego obwody wzbudzenia w osiach d i q jest zasadna, ale niepotrzebnie powtórzono ją w spisie ważniejszych skrótów (Rozdział 1).
- 2.3. Chyba niepotrzebnie doktorant używa dwóch wielkości M – współczynnika bezwładności i T_m – stałej czasowej turbiny. Wartości te stosowane są zamiennie, czego doktorant nie komentuje.
- 2.4. Poślizg generatora oznaczany jest w pracy jako s oraz $\Delta\omega$. Jaki jest cel stosowania różnych oznaczeń?
- 2.5. Sformułowania „moc bierna na wyjściu generatora”, „napięcie na wyjściu generatora” brzmią slangowo.
- 2.6. W oznaczeniach wielkości związanych z generatorem widać pewną niekonsekwencję: napięcie stojana oznaczono U_g , Moc czynną P_e , natomiast moc bierną Q . Uważam, że wskazane byłoby tu ujednoczenie indeksów
- 2.7. Str. 19 – brak wyjaśnienie symbolu β
- 2.8. Str. 22 Czy doktorant rozróżnia lawinę napięcia i lawinę częstotliwości?
- 2.9. Str. 23 określnie „obwód wzbudzenia” i „układ wzbudzenia” nie są tożsame.
- 2.10. Str. 24 maszynowe układy wzbudzania typu AC1 są coraz rzadziej stosowane w KSE. Często w ramach modernizacji są one zastępowane statycznymi układami wzbudzenia.
- 2.11 Str. 45 Co doktorant rozumie pod pojęciem „kąta generatora”?
- 2.12 Doktorant niekonsekwentnie stosuje jednostki względne w odniesieniu do mocy generatora. W przypadku rysunku 3.12 moc czynna i bierna odniesione są do znamionowej mocy pozornej, a w przypadku przebiegów symulacyjnych wartość odniesiona jest do znamionowej mocy czynnej.
- 2.13 Doktorant powinien podawać wyniki obliczeń z zachowaniem jednego poziomu dokładności – ta uwaga dotyczy tabel 8.4 i 9.1.
- 2.14. Część danych w tabeli a.17 budzi wątpliwości. Straty obciążeniowe transformatorów wyrażono w kV, a ponadto nie zachowane są proporcje pomiędzy mocą znamionową transformatorów a wartością strat obciążeniowych. Napięcie znamionowe transformatora blokowego jednostki G3 nie jest dopasowane do poziomu 220 kV, jakie jest napięciem znamionowym linii elektroenergetycznych tworzących sieć.
- 2.15 Dlaczego część tytułów i nazw czasopism w spisie literatury pisana jest wielkimi literami?

III Podsumowanie i wniosek końcowy

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań; b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania;
- c) zadowalająco spełniająca wymagania; d) wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem; e) wybitna?

Recenzent zalicza niniejszą Rozprawę do zadowalająco spełniającej wymagania.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Sapuły podejmuje ważny i aktualny temat badawczy. Ponadto, oceniam ją jako spełniającą w zadowalającym stopniu wymagania, wynikające z Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) dotyczące rozpraw doktorskich i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania.

A. Klucznik