

Dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. nzw. PL
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, 23.05.2018 r.

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. PIOTRA GAJEWSKIEGO

PT. „ANALIZA PRZEKSZTAŁNIKOWYCH UKŁADÓW STEROWANIA ELEKTROWNI WIATROWEJ Z GENERATOREM SYNCHRONICZNYM O MAGNESACH TRWAŁYCH”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki
Wrocławskiej z dnia 26 marca 2018 r.

1. Ocena problematyki rozprawy, tezy naukowej i celu pracy

Energetyka wiatrowa jest w ostatnich dwóch dekadach najbardziej dynamicznie rozwijającym się segmentem energetyki odnawialnej w Polsce. Nieunikniony jest też jej dalszy rozwój co prowadzi do sytuacji, że w niektórych rejonach udział energii pozyskiwanej z elektrowni wiatrowych stanowi istotny składnik w bilansie energetycznym. Z tego powodu, od kilkunastu lat, względem elektrowni wiatrowych stawia się wymagania analogiczne jak dla wymagań określanych wobec elektrowni konwencjonalnych. Wymagania te są niekiedy dość trudne do spełnienia ze względu na stochastyczny charakter źródła i nieliniowość charakterystyk turbiny wiatrowej. Spełnieniu tych wymagań sprzyja zastosowanie układów generacji wyposażonych w przekształtniki energoelektroniczne. Są to najczęściej rozwiązania oparte o tranzystorowe aktywne układy prostownikowe i falownikowe charakteryzujące się wysoką szybkością działania. W rozwiązaniach tych kluczową rolę odgrywają układy regulacji należące do wysoko zaawansowanej grupy przekształtników ze sterowaniem wektorowym.

Istnieje przy tym potrzeba prowadzenia dalszych badań zwłaszcza w zakresie odporności na zaburzenia sieci, zachowania normatywnych parametrów jakościowych napięcia i spełnienia wymagań operatorów sieci dystrybucyjnych i przesyłowych określonych instrukcją ruchu tych operatorów. Stąd badania rozwijane w tym zakresie mają duże znaczenie zarówno badawcze jak i aplikacyjne.

W związku z powyższym uważam, że problematyka rozprawy została wybrana trafnie: *"Zastosowanie przekształtnikowych układów sterowania elektrowni wiatrowej z generatorem synchronicznym o magnesach trwałych (PMSG) zapewnia dużą dokładność sterowania mocą generatora, sterowania przepływem mocy elektrycznej do sieci AC lub do odbiorników autonomicznych oraz zapewnia odporność układu sterowania na stany awaryjne i zakłócenia w sieci AC"*. Jest ona bardzo obszerna, co w dalszej konsekwencji ma wpływ na bardzo szerokie spektrum poruszanych w rozprawie zagadnień. Stąd znacząca liczba stron i mnogość problemów rozwiązanych przez Autora rozprawy. Takie postawienie



problemu wymagało od Autora całościowego zrozumienia poruszanych zagadnień, co zwykle pozytywnie wpływa na komplementarność wniosków i ich praktyczne znaczenie.

2. Struktura i ogólna charakterystyka rozprawy

Oceniana rozprawa liczy 198 stron oraz dwa załączniki przedstawiające treści uzupełniające, które znajdują się na stronach 199÷207. Praca podzielona jest na dziewięć rozdziałów numerowanych plus wykaz literatury. Układ pracy odpowiada strukturze rozpraw doktorskich. Wymagane elementy takie jak cel, zakres i teza pracy sformułowane są w rozdziale wstępnym. W kolejnych rozdziałach zawarty jest przegląd literatury, modele matematyczne, różnorodne aspekty sterowania pracą elektrowni wiatrowych, badania symulacyjne i laboratoryjne, analiza uzyskanych wyników oraz podsumowanie wyników rozprawy wraz z oceną autora rozprawy dotyczącą spełnienia postawionej tezy. Rozprawę kończy wykaz literatury liczący 175 pozycji.

Przedstawione treści obejmują bardzo szeroki zakres tematyczny. Autor porusza całe spektrum zagadnień dotyczących elektrowni wiatrowych poczynając od ich budowy, podstawowych własności aerodynamicznych, układów generacji obejmujących nowoczesne układy generatorowo przekształtnikowe, metody regulacji oraz warunki współpracy z siecią elektroenergetyczną. Te wszystkie zagadnienia są niezwykle ważne dla zrozumienia własności regulacyjnych elektrowni wiatrowych i określenia ich cech użytkowych. Autor konsekwentnie analizuje i bada te własności dla układu z generatorem synchronicznym, do którego zacisków przyłączone są kaskadowo dwa przekształtniki energoelektroniczne przedzielone obwodem prądu stałego o charakterze pojemnościowym. Zastosowany układ generacji służy Doktorantowi do regulacji parametrów pracy generatora i realizacji zadań współpracy z siecią elektroenergetyczną. Autor czyni to w taki sposób, aby zachować logiczną kolejność badań. Dzięki temu uzyskany efekt jest przejrzysty i daje czytelnikowi szeroką wiedzę nt. dość dużego obszaru wiedzy. Szczególną uwagę Autor poświęca badaniu układów przekształtnikowych. Jego zainteresowania dotyczą modelowania i badania wybranych stanów pracy zarówno przekształtnika maszynowego jak i przekształtnika sieciowego.

3. Uwagi ogólne i dyskusyjne

Oceniana praca mimo swojej obszerności nie rozwiązuje wszystkich problemów. Niektóre z poruszanych przez Autora zagadnień mogą budzić dodatkowe pytania, inne zaś generować wnioski i sugestie nt. dalszych zadań, które wymagają kolejnych prac badawczych. Przykładowe problemy to:

A.

Dość istotnym problemem są w przypadku badania elektrowni wiatrowych trudności z wykonaniem testów na modelu fizycznym. Autor ograniczył się więc do badań symulacyjnych i badań z emulatorem turbiny wiatrowej, nie uwzględniającym stochastycznych zdarzeń wpływających na laminarny bądź turbulencyjny charakter opływu powietrza wokół łopat. W opisie metod sterowania zastosował między innymi regulację kątem natarcia łopat, błędnie określając ją jako regulację kątem nachylenia oraz zastosował regulację momentu turbiny poprzez wprowadzenie sprzężenia zwrotnego od momentu.



Niektóre przyjęte uproszczenia wydają się jednak błędne. Autor określa, że moment bezwładności układu turbiny jest niewielki (str.122). Skąd wynika takie stwierdzenie? Łopaty turbiny dla elektrowni megawatowych mogą ważyć kilka ton i mają przy tym bardzo duży promień. Odpowiednio, nawet dla małych elektrowni wiatrowych, moment bezwładności turbiny jest znaczący i ma istotny wpływ na przebiegi przejściowe. Podobna refleksja nasuwa się dla regulacji kątem natarcia łopat. Regulacja ta należy do stosunkowo wolnych i nie jest stosowana do uzyskania dynamicznej reakcji na chwilowe zmiany prędkości wiatru. Proszę wyjaśnić, dlaczego moment bezwładności turbin i łopat określono jako mały?

B.

Bardzo trafne jest wykorzystanie możliwości absorpcji energii podczas zapadów napięcia poprzez zwiększanie prędkości obrotowej turbiny. Proszę oszacować do jakiej wartości ponad prędkość znamionową wzrosną obroty turbiny przy przykładowym poziomie zapadu napięcia do 50% czas trwania zapadu wynosi do 2 sekund. Ponadto proszę wyjaśnić stwierdzenie, że „*sterowaniu z optymalnym momentem turbiny towarzyszy wolna odpowiedź algorytmu (str. 65)*”. Wolna odpowiedź może dotyczyć regulowanej prędkości ze względu wspomnianą dużą bezwładność i zwiększenie ustepliwości charakterystyk mechanicznych ale nie algorytmu.

C.

Analizę pracy przekształtnika sieciowego podczas zapadów napięcia ograniczono do zapadów symetrycznych. Jest to szczególnie przypadek, podczas gdy w rzeczywistości najczęściej występują niesymetryczne zapady, przy których pojawia duże niebezpieczeństwo utraty synchronizacji. O tym problemie należałoby również wspomnieć w rozprawie.

D.

Powołując się na literaturę [21 i 95] Autor twierdzi, że „*wstrzykiwanie prądu biernego pomaga stabilizować napięcie podczas zapadu (str. 143)*”. Z pewnością Autorowi chodzi o odbudowanie napięcia lub poprawienie jego jakości w przypadku chwilowych zaburzeń spowodowanych dużymi odbiorami o charakterze indukcyjnym. Wymagań w zakresie wstrzykiwania prądu biernego brak jest jednak w instrukcji ruchu polskich operatorów.

E.

Wykaz bibliograficzny obejmuje aż 175 pozycji. Jest to znacząca liczba świadcząca o dużym nakładzie pracy Autora. Nie wszystkie pozycje są jednak aktualne, a niektóre z nich w sposób odtwórczy omawiają problemy sterowania układów energoelektronicznych. Autorzy publikacji naukowych powinni wyszukiwać i powoływać się na materiały źródłowe, a nie na pozycje odtwarzające te materiały.

4. Uwagi szczegółowe

Dla tak obszernej pracy nietrudno znaleźć uchybienia, które istnieją niemal w każdej pracy twórczej. Wymienię więc tylko przykładowe drobne błędy, które pod względem formalnym nie są poprawne:

- a) str. 10 – „*50 GW energii ...*” to błędne określenie.

- b) str 10-11- „Stosowanie systemów z generatorami DFIG wynika głównie z dobrych właściwości regulacyjnych tych układów, uzyskiwanych przez sterowanie odpowiednimi zmiennymi elektromagnetycznymi generatora DFIG” - niestety to uproszczenie ważne tylko dla pracy bez zaburzeń w sieci. W przypadku zapadów napięcia układy DFIG generują duże problemy. Natomiast ich podstawową zaletą jest redukcja kosztów przekształtnika?
- c) Określenie "*W ostatnich latach*" (str 14) jest mylące. Niewiele to mówi a zwłaszcza dla czytelnika, który studiować będzie tę pracę za kilka lat.
- d) str. 22. - "*mniejsza sprawność ze względu na osiągnięcie mniejszych prędkości obrotowych*" - czy autor nie pomylił prędkości obrotowych z prędkościami wiatru? Elektrownie o pionowej osi obrotu posadowione są nisko, więc ich średnioroczne prędkości wiatru są niższe. Dodatkowo badania podstawowe wskazują osiągnięcie niższych wartości efektywności energetycznej C_p .
- e) str.23, tabela 2.1. , "*duże oscylacje momentu* " dla VAWT – wręcz odwrotnie, elektrownie VAWT charakteryzują się małymi oscylacjami momentu, co predestynuje je do montowania na dachach domów.
- f) str.23, "*Obecnie najliczniejszą grupę generatorów stosowanych w elektrowniach wiatrowych stanowią generatory indukcyjne klatkowe SCIG i generatory dwustronnie zasilane DFIG [36]*" - niestety to już historia, a wskazane źródło podaje informacje na podstawie wcześniejszych opracowań, jest więc nieaktualne. Dla uzyskania aktualnych danych warto spojrzeć na raporty niezależnych instytucji europejskich np. Instytutu „Leonardo Energy”.
- g) str. 24, "*Zasadniczą wadą generatorów SG jest konieczność zasilania uzwojenia wzbudzenia przez zewnętrzne źródło prądu stałego. Obwód wzbudzenia generatora SG jest zasilany przez szczotki lub bezszczotkowo przez zastosowanie wirującego prostownika [161].*" - generatory ze wzbudzeniem obcym nie są maszynami wolnoobrotowymi. Maszyny wolnoobrotowe budowane są z magnesami trwałymi, a ich liczba par biegunów, dla konstrukcji megawatowych, znacząco przekracza 100.
- h) str. 150, "*Zmiana kąta nachylenia β powoduje zmniejszenie współczynnika mocy turbiny wiatrowej C_p , co powoduje zmniejszenie mocy turbiny wiatrowej. W przypadku, gdy działanie tego układu jest niewystarczające, następuje załączenie sterownika impulsowego i wytracanie nadwyżki energii na rezystorze R_d .*" – Autor nieadekwatnie do poruszanych problemów przytacza starą regulację za pomocą rezystancji w obwodzie wirnika.
- i) str. 151, "*Podczas zapadów napięcia moc generatora jest obniżana, a moment turbiny wiatrowej pozostaje na tej samej wartości. Powstająca wtedy nadwyżka energii mechanicznej zostaje przetworzona i powoduje przyspieszenie prędkości kątowej ω_m generatora PMSG podczas zapadu napięcia sieci AC.*" – jak interpretować to stwierdzenie, jeżeli wcześniej pisano, że obniżamy moc turbiny poprzez zmianę kąta natarcia łopaty?
- j) str.182, w wierszu 5 i 7 od góry pojawiają się bardzo ogólne określenia „odpowiedniego” i „odpowiednie”. Określenia te są zbyt ogólne i nie wnoszą żadnych informacji. Autor winien wyjaśnić co oznaczają te określenia.

5. Ocena rozprawy

Bardzo wysoko oceniam nakład pracy i całościowe rezultaty uzyskane przez Doktoranta. Uznaję, że wskazane przez Niego na str. 183 najważniejsze osiągnięcia za w pełni uzasadnione. Za szczególnie istotne uważam:

- Opracowanie modeli matematycznych przekształtnikowych układów sterowania elektrowni wiatrowej z generatorem synchronicznym o magnesach trwałych PMSG;
- Opracowanie projektu i wykonanie stanowiska laboratoryjnego do badań eksperymentalnych przekształtnikowych układów elektrowni wiatrowych z generatorami PMSG;
- Wykonanie badań eksperymentalnych i symulacyjnych przekształtnikowych układów elektrowni wiatrowych;
- Analiza, weryfikacja i synteza wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych;

Uznaję również, że teza rozprawy została w pełni uzasadniona.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

W rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Piotr Gajewski wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w **dyscyplinie naukowej elektrotechnika** oraz szczegółową wiedzą w zakresie sterowania i regulacji układów elektrowni wiatrowych. Dowiódł posiadania umiejętności w zakresie modelowania i symulacji, analizy wyników, projektowania, budowy i badania fizycznego stanowiska doświadczalnego. Wykazał, że potrafi formułować problem badawczy i przeprowadzić pełen tok postępowania badawczego. Ponadto poprawnie interpretuje uzyskane wyniki i formułuje własne wnioski, co świadczy o posiadaniu wysokich kwalifikacji do prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgra inż. Piotra Gajewskiego uznać za istotny wkład Autora w rozwój metod sterowania i regulacji nowoczesnymi układami elektrowni wiatrowych.

Na tej podstawie stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 13 pkt.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późn. zm.) a także w stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Gajewskiego do publicznej obrony przed komisją doktorską Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.

Uwzględniając przy tym wysoki poziom merytoryczny rozpraw oraz zaprojektowanie i uruchomienie oryginalnego wielowariantowego stanowiska badawczego, jak również potwierdzenie wysokiego poziomu badań poprzez publikacje w czasopiśmie Archives of Electrical Engineering (2016), Przegląd Elektrotechniczny (2016 i 2017) oraz artykuł w bazie IEEEXplore (2017), w przypadku pozytywnego przyjęcia i nadania stopnia naukowego doktora, wnioskuję o wyróżnienie pracy.

