

Warszawa, 2 grudnia 2019

dr hab. inż. Krzysztof Siwek, profesor uczelni
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych
Wydział Elektryczny
Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpl. 16-12-2019
Rektor Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski
[Signature]
z up. prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński
Dziekan

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Tomasza Jarmudy
pt. „Optymalizacja struktury hybrydowego systemu zasilania typu
słoneczno-wiatrowego”

(zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej
z dnia 30 września 2019)

Ocena doboru tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska pana mgr inż. Tomasza Jarmudy dotyczy zagadnień projektowania i numerycznego modelowania oraz optymalizacji struktury hybrydowego systemu zasilania wykorzystującego OZE, tu energię wiatrową i słoneczną.

Praca jest bardzo obszerna, powiedział bym - zbyt obszerna, liczy bowiem aż 255 stron, z czego 183 to sama dysertacja, a pozostałe to cztery załączniki z wynikami optymalizacji przeprowadzonymi z uwzględnieniem różnych kryteriów.

Rozprawa zawiera zarówno wprowadzenie do tematyki OZE, wstęp do problematyki oceny lokalizacji elektrowni wiatrowych i słonecznych, jak również dosyć szczegółowo przedstawione zagadnienia optymalizacji i modelowania obwodów elektrycznych. Ponadto, zgodnie z tematem, w rozprawie znalazły się zagadnienia związane z elektroenergetyką i ekonomiką wytwarzania energii elektrycznej. Praca jest zatem interdyscyplinarna, obejmująca wiele powiązanych ze sobą zagadnień. Z uwagi na poruszane tematy pracę należy przypisać do dyscypliny Automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Rozprawa składa się z 9 rozdziałów, obszernego spisu literatury (221 pozycji podzielonych na kategorie: Książki, Artykuły, Dokumenty, Metadane) oraz 4 załączników.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem w tematykę OZE. Autor przypomniat znane aspekty energetyki odnawialnej i pokreślił, że energetyka odnawialna nie jest receptą na niedobory, lub wysoki koszt, energii ze źródeł klasycznych. Rozdział ten zawiera przegląd literatury. W rozprawie energetyka odnawialna traktowana jest jako uzupełnienie energetyki klasycznej i jednocześnie wymóg nałożony przez Protokół z Kioto. Autor porusza aspekty finansowe energetyki odnawialnej i podkreśla konieczność stosowania metod optymalizacji w szeroko pojętej działalności energetyki odnawialnej, poczynsz od projektowania turbin i łopat w wiatrakach, optymalizacji kąta pochylenia modułów fotowoltaicznych oraz lokalizacji elementów wytwórczych na mapie kraju. W rozdziale tym zdefiniowane są cele rozprawy oraz przedstawiona teza: **„Zastosowanie odpowiednio opracowanych modeli turbiny wiatrowej i modułu fotowoltaicznego oraz zmodyfikowanej metody algorytmu genetycznego pozwala na wyznaczenie optymalnej, pod względem wykorzystania dostępnej energii pierwotnej wiatru i słońca, struktury hybrydowego systemu zasilania typu on-grid, pracującego w ustalonej lokalizacji geograficznej i przeznaczonego do współpracy z odbiornikiem o zadanym profilu obciążenia”.**

Rozdział drugi przybliża wiedzę o probabilistycznym charakterze energii odnawialnej, w szczególności wiatrowej i słonecznej. Przedstawia analizę zasobów tej energii w Polsce i prezentuje metody pomiaru prędkości wiatru i irradancji do celów energetyki odnawialnej. W rozdziale tym przedstawiona jest ponadto szczegółowa analiza statystyczna pomiarów wspomnianych wielkości oraz zawarte wnioski z tej analizy.

W rozdziale trzecim Doktorant przypomniat zagadnienie optymalizacji. Zaprezentował wybrane metody optymalizacji: deterministyczne, stochastyczne i heurystyczne. Szczególny nacisk położył na optymalizację układów elektrycznych

Czwarty rozdział rozprawy zawiera szeroki przegląd i omówienie źródeł energii solarnej i wiatrowej. Doktorant zaprezentował różne rodzaje generatorów wiatrowych z podziałem na sposób pracy i moce. Omówił zasadę działania i podał wzory używane do obliczania uzyskiwanej mocy. W dalszej części rozdziału czwartego omówione są ogniwa fotowoltaiczne, przedstawiona ich zasada działania i charakterystyki pracy. Podane są również wzory pozwalające obliczyć wartość mocy maksymalnej modułu fotowoltaicznego PV. W tym rozdziale wprowadzone są systemy hybrydowe łączące ze sobą kilka rodzajów

źródeł i elementy dodatkowe (np. zasobnik energii, ogniwa paliwowe). Doktorant zdefiniował tutaj pojęcia on-grid i off-grid.

Rozdział piąty jest dużym rozdziałem prezentującym zagadnienie modelowania w energetyce wykorzystującej OZE. W pierwszym rzędzie Doktorant opisał wykorzystywany w pracy hybrydowy układ typu słoneczno-wiatrowego pracujący w układzie on-grid. Wymienił jego części składowe i uzasadnił wybraną strukturę (Rysunek 5.1), wypunktował wady i zalety takiego rozwiązania, a ponadto opisał środowisko Matlab-Simulink jako bazową platformę obliczeniową dla rozwiązywania zadań optymalizacji. Na kolejnych stronach rozdziału Doktorant przedstawił w uporządkowany sposób modele matematyczne modułów fotowoltaicznych oraz turbin wiatrowych i finalne dwa modele hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego. Ostatni punkt tego rozdziału zawiera wyniki symulacji pracy opracowanych systemów w postaci graficznej i tabelarycznej wraz z omówieniem.

W rozdziale szóstym przedstawiona została analiza ekonomiczna budowy i eksploatacji systemu hybrydowego OZE z uwzględnieniem obowiązujących w Polsce przepisów.

Rozdział siódmy zawiera szczegółowe przedstawienie optymalizacji struktury hybrydowego układu generacyjnego typu on-grid. Doktorant zdefiniował trzy różne zadania optymalizacyjne:

- maksymalizacja wydajności energetycznej (stosunek energii wytwarzanej w okresie roku do jego mocy znamionowej);
- minimalizacja jednostkowego kosztu wytworzenia energii elektrycznej LCOE (jednostkowy zdyskontowany koszt wytworzenia energii elektrycznej);
- minimalizacja ilości energii elektrycznej kupowanej z sieci elektroenergetycznej w okresie jednego roku dla przyjętego profilu obciążenia i znanej lokalizacji geograficznej elektrowni;

z założeniem, że rozwiązanie optymalne poszukiwane jest dla zadanej mocy znamionowej układu będącej sumą mocy sekcji słonecznej i wiatrowej w danej lokalizacji. Należy podkreślić, że obliczenia przeprowadzane były na rzeczywistych danych pomiarowych z wybranych dwóch lat: 2011 – zawierającym najwyższe wartości średnioroczne z okresu pomiarów oraz 2012 – wartości średnioroczne bliskie średnim z okresu pomiarów.

Wszystkie trzy zadania optymalizacyjne zostały dokładnie zdefiniowane przez funkcje celu, ograniczenia i wektory zmiennych podlegających optymalizacji.

Doktorant spośród wielu metod optymalizacyjnych do rozwiązywania opisywanego problemu wybrał algorytmy genetyczne. Dalsza część tego rozdziału zawiera wyniki optymalizacji dla wymienionych trzech zadań optymalizacyjnych w postaci wykresów. Omówienie tych wyników zostało niestety umieszczone dopiero na końcu rozdziału.

Rozdział dziewiąty zawiera zakończenie z podsumowaniem i wnioskami. Przedstawione rozważania udowodniły postawioną tezę rozprawy.

W wyniku dobrze przeprowadzonej optymalizacji uzyskuje się wymierne korzyści techniczne i ekonomiczne: redukcja zużycia kupowanej energii elektrycznej, poprawa sprawności układu zasilania, stabilizacja parametrów pracy systemu. Należy podkreślić, że przy założeniu spełnienia wszystkich parametrów technicznych wymaganych przepisami, to właśnie korzyści ekonomiczne są najważniejszym kryterium przeprowadzanych optymalizacji.

Układ pracy jest prawidłowy i czytelny. Praca napisana jest w logiczny i uporządkowany sposób przy użyciu poprawnego języka. Zawiera tylko minimalną liczbę pojedynczych literówek i niezręczności językowych.

Omawiane zagadnienia są niezmiernie aktualne, dobrze zdefiniowane a sposób ich przedstawienia świadczy o dojrzałości naukowej Autora. Uzyskane wyniki posiadają dużą wartość praktyczną i aplikacyjną, mogą stanowić nieocenioną pomoc przy projektowaniu i budowie zaawansowanych systemów hybrydowych zawierających więcej elementów składowych.

Pytania i uwagi dyskusyjne

W tej części recenzji chciałbym postawić pytania oraz szerzej naświetlić pewne uwagi dyskusyjne, nie umniejszające jednak w istotnym stopniu osiągnięć autora rozprawy:

1. Autor na stronie 28 uzasadnił potrzebę stosowania krótszego okresu niż standardowe okresy uśredniania. Proszę o wyjaśnienie dlaczego przyjął różne wartości okresu uśredniania: $\Delta t=47s$ dla prędkości wiatru i $\Delta t=36s$ dla irradiancji (strona 35) jeśli i tak te wartości musiały być później ze sobą zsynchronizowane.
2. Błędne jest określenie „podział sygnałów wektorowych...” w odniesieniu do elementu Multiplexer (Mux) w Simulinku (str. 77).

3. We wzorze (8.1) ze str. 123 Autor zastosował standardowy wzór na błąd względny procentowy, jednak bez operatora wartości bezwzględnej. W wyniku można otrzymać ujemne wartości błędu procentowego, których znaczenie wyjaśnione jest dopiero w rozdziale 8 na str. 176. Czy w zamian nie można by podawać adnotacji „poprawa wyniku optymalizacji” zamiast używać nieintuicyjnego ujemnego błędu procentowego?
4. Użycie określenia „rozwiązanie optymalne” uzyskane w wyniku działania algorytmu genetycznego (GA) w moim odczuciu jest pewnym nadużyciem, ponieważ mimo, iż GA są metodami optymalizacji globalnej, to nigdy nie mamy pewności, że uzyskane rozwiązanie leży w minimum globalnym (str. 123).
5. Proszę o dokładne przedstawienie struktury chromosomów w badanych zadaniach optymalizacji genetycznej. Autor wyszczególnia na str. 113, że wartości genów x_1 do x_4 są całkowitoliczbowe, podczas gdy na str. 121 jest mowa o kodowaniu binarnym.
6. Proszę o uzasadnienie potrzeby krzyżowania dwupunktowego w przypadku tak krótkiego chromosomu (wektor 4 elementowy).
7. Ciekawe jest stwierdzenie Autora, że liczba osobników w populacji nie wpływa na uzyskane wyniki (str. 173). Może ma wpływ na czas obliczeń, w sensie ilości generacji? Poproszę o komentarz.
8. W pracy nie doszukałem się szczegółów implementacyjnych części programu napisanej w C#. Proszę o przedstawienie różnic tej implementacji w porównaniu do wcześniej omawianego modułu z Simulinka (str. 98).
9. Doktorant w pracy przedstawił wyniki trzech różnych optymalizacji. Proszę o uzasadnienie takiej strategii, gdy znane i popularne jest zagadnienie optymalizacji Pareto pozwalające na optymalizację wielokryterialną, obliczenie frontu Pareto i spośród niego wybranie rozwiązania spełniającego wszystkie trzy kryteria a jednocześnie najbardziej odpowiadającego projektantowi systemu OZE.

Główne osiągnięcia autora rozprawy

Do oryginalnych osiągnięć autora rozprawy należy zaliczyć:

1. Analiza statystyczna rzeczywistych danych pomiarowych prędkości wiatru i irradiancji z lat 2011-2014.
2. Opracowanie dwóch modeli numerycznych systemu słoneczno-wiatrowego z zastosowaniem oprogramowania Matlab-Simulink oraz programu Matlab z własnym rozszerzeniem napisanym w języku C#.

3. Przeprowadzenie szeregu symulacji pracy układu generacji wiatrowo-słonecznego bazujących na rzeczywistych danych pomiarowych prędkości wiatru i irradiancji z lat 2011-2012.
4. Opracowanie algorytmu optymalizacji struktury układów hybrydowych łączących generację wiatrową i słoneczną.
5. Zdefiniowanie i uzasadnienie różnych wariantów funkcji celu w optymalizacji.
6. Przeprowadzenie wielorakich badań potwierdzających poprawność zaproponowanego modelu układu hybrydowego w analizach optymalizacyjnych.
7. Przeprowadzenie wielu symulacji opracowanych modeli z różnymi wariantami funkcji celu, struktur i mocy układów zasilających, w tym do zasilania obiektu o znanych charakterystykach obciążenia.

Należy podkreślić, że Doktorant w rozprawie doktorskiej wykazał, że posiadał wiedzę i umiejętności samodzielnej pracy naukowej wymagane na tym stopniu rozwoju naukowca. Poprzez zaproponowanie i opracowanie nowych metod oraz ich dogłębne przetestowanie Autor wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej co jest podstawą do wystąpienia o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Uważam, że cele założone w pracy zostały spełnione a teza potwierdzona.

Sformułowane w recenzji uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają w żaden sposób wartości opracowanej metody ani wysokiemu poziomowi badawczemu rozprawy.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr inż. Tomasza Jarmudy pt. „Optymalizacja struktury hybrydowego systemu zasilania typu słoneczno-wiatrowego” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Krzysztof Siwek, prof. uczelni