

prof. dr hab. inż. Bernard Baron
Politechnika Opolska
Instytut Systemów Napędowych i Robotyki,
Katedra Robotyki i Zastosowań Informatyki.

Opole, 12.12.2022

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

09-01-2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Stanisława Mikulskiego WPŁYNEŁO

**p.t. „Optymalizacja parametrów i rozmieszczenia magazynów energii w sieciach
dystrybucyjnych ze źródłami niestabilnymi”**

Recenzję przygotowano na zlecenie prof. dra hab. inż. Wojciecha Szelaąga, Kierownika Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej zgodnie z Uchwałą Nr 43/2021-2022 z dnia 28.09.2022 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej.

1. Ocena tematyki rozprawy

Obserwowane zmiany w strukturze generacyjnej systemów elektroenergetycznych związane są między innymi z: wypełnianiem wielu zobowiązań międzynarodowych obejmujących zwiększanie mocy źródeł odnawialnych w całkowitej mocy zainstalowanej w Krajowym Systemie Energetycznym, poprawą bezpieczeństwa energetycznego kraju na drodze dywersyfikacji źródeł energii elektrycznej oraz ograniczeniem tzw. śladu węglowego. Największy udział w zachodzących zmianach struktury źródeł w KSE mają generatory typu solarnego i wiatrowego, nie tylko w formie dużych farm, ale także silnie rozproszonych źródeł prosumenckich. Trzeba zaznaczyć, że oba wymienione typy źródeł OZE (solarne i wiatrowe) należą do grupy tzw. źródeł niespokojnych, czego przyczyną są stochastyczne zmiany iradiacji i prędkości wiatru. Skutki ich integracji z systemem elektroenergetycznym obejmują wahania dostarczanej do systemu mocy w punkcie przyłączenia, znaczne prawdopodobieństwo niedyspozycyjności źródła lub ich grupy związane z niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi, czasowe zwiększenie obciążenia określonych linii przesyłowych oraz stochastyczne wahania napięcia węzłowego. Tematykę związaną z ww. obszarami podejmuje w swoich pracach wielu naukowców publikując wyniki badań w najlepszych czasopismach światowych z obszaru energetyki odnawialnej i elektroenergetyki. Wskazują oni nie tylko skutki zmian strukturalnych źródeł wytwórczych w systemach krajowych, ale także kierunki ewentualnych działań łagodzących lub likwidujących powstające problemy techniczne związane również z niedostosowaniem infrastruktury sieci do pracy w nowych warunkach generacyjnych.

Podjęta w recenzowanej rozprawie tematyka obejmuje grupę aktualnych zagadnień związanych z wykorzystaniem instalacji magazynujących energię elektryczną do przeciwdziałania lub łagodzenia skutków coraz większego nasycenia KSE źródłami niestabilnymi typu wiatrowego i fotowoltaicznego. Przeprowadzone w rozprawie badania mają charakter symulacyjny i obejmują wyszukanie optymalnych pojemności energetycznych oraz lokalizacji magazynów typu elektrochemicznego w węzłach systemu el.-en. pod kątem minimalizacji strat przesyłowych i wahań napięcia oraz niestabilności generacji w wielu węzłach systemu. Poruszane zagadnienia dotyczą zatem w ujęciu ogólnym poprawy parametrów pracy sieci dystrybucyjnych w aspekcie zmian struktury generacyjnej w KSE.

Badania naukowe wspierające poprawę bezpieczeństwa energetycznego, szczególnie w obecnych warunkach geopolitycznych, uważam za szczególnie istotne i cenne. Już od dłuższego czasu słyszane są głosy naukowców dotyczące konieczności modernizacji sieci elektroenergetycznej, której struktura i parametry nie jest przygotowana na transformację energetyczną i stosowanie rozproszonych źródeł OZE, szczególnie o dużych mocach sięgających

setek MW, w nasyceniu podawanym w dokumentach np. Unii Europejskiej. Obecna struktura systemu el.-en. wynika także z wieloletnich przekonań, że nie ma ekonomicznego uzasadnienia magazynowania energii w ramach systemu elektroenergetycznego, a podstawowy paradygmat funkcjonowania sieci wydzielał w jego budowie tylko trzy podstawowe warstwy: generacyjną, przesyłową i dystrybucyjną. Dodatkowo warstwa dystrybucyjna oparta była o źródła konwencjonalne o stosunkowo stabilnych mocach oraz szerokiej możliwości zarządzania nimi. Rzeczywistość zweryfikowała jednak teorię i obecnie powszechnie stosowane są źródła o niestabilnych mocach generacyjnych i otwarcie mówi się o konieczności magazynowania energii w specjalistycznych systemach bezpośrednio włączonych do sieci elektroenergetycznej. Jedną z warstw, która jest szczególnie podatna na pogorszenie parametrów pracy są sieci dystrybucyjne obejmujące także struktury pracujące z napięciami średnimi i wysokimi. Recenzowana rozprawa dotyka wskazanych powyżej zagadnień i tematycznie dobrze wpisuje się w aktualne trendy nie tylko badań naukowych, ale również praktycznych działań realizowanych w wielu wysokorozwiniętych krajach np. koncepcje budowy systemów magazynujących energię dużych mocy w niemieckim systemie elektroenergetycznym.

Z perspektywy zmieniającej się struktury generacyjnej współczesnych systemów elektroenergetycznych prowadzącej do włączania coraz większej liczby źródeł niespokojnych, a także poprawy bezpieczeństwa energetycznego podjęta przez mgra inż. Stanisława Mikulskiego tematyka rozprawy została wybrana trafnie. Posiada odpowiedni, dla pracy doktorskiej, potencjał naukowy i wpisuje się w najnowsze trendy badań w zakresie wykorzystania systemów magazynowania energii do poprawy warunków pracy sieci elektroenergetycznych, w tym sieci dystrybucyjnych.

2. Analiza i ocena zawartości, układu i języka rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 204 strony a w spisie literatury wykorzystano 160 pozycji. Trzy spośród nich są autorstwa lub współautorstwa mgra inż. Stanisława Mikulskiego. Dysertacja podzielona jest na 11 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz nienumerowanymi spisami bibliograficznym, ilustracji oraz tabel.

Układ pracy jest poprawny, choć można zauważyć pewną niekonsekwencję polegającą na wyjaśnianiu zastosowanych w tytułach skrótów. Raz autor je rozwija: „3.5.1 Metoda Newtona-Raphsona (NR)” a raz nie: „4 Zrównoleglenie analizy rozptywu mocy z zastosowaniem jednostki GPU”.

W pierwszym, wprowadzającym rozdziale autor uzasadnia podjęcie tematyki badań wskazując na obecne problemy dotyczące funkcjonowania krajowego systemu elektroenergetycznego a związane z rosnącym udziałem OZE w produkcji energii elektrycznej oraz rozwojem elektromobilności. Ponadto przedstawia przegląd literaturowy ze szczególnym uwzględnieniem pozycji dotyczącej generacji rozproszonej oraz magazynowania energii.

W rozdziale 2 przedstawiono cel, tezę, zadania szczegółowe i zakres pracy.

Dalsza część rozprawy (rozdziały 3 i 4) dotyczy analiz rozptywu mocy w systemie elektroenergetycznym. Przedstawione zostały podstawowe informacje dotyczące zasad funkcjonowania KSE, model admitancyjny sieci elektroenergetycznej, metody wyznaczania rozptywu mocy szczegółowo przedstawiając metodę Newtona-Raphsona. Zaprezentowano także możliwości wykorzystania obliczeń równoległych, tj. technologii CUDA oraz pokazano wpływ zrównoleglenia na czas obliczeń dla znormalizowanych systemów (IEEE 5 Bus, IEEE 9 Bus, IEEE 30 Bus i IEEE 118 Bus). Wykazano, że w poszczególnych etapach algorytmu obliczeniowego czas obliczeń może być ponad stukrotnie mniejszy niż dla algorytmu sekwencyjnego.

Rozdział 5 dotyczy magazynów energii, zawiera ich szczegółowy podział i zasady działania, a także strategie wykorzystania magazynów energii w systemie elektroenergetycznym, w tym ich współpracę z OZE. Przedstawiono także model matematyczny oraz opis magazynu możliwy do zaimplementowania w systemie informatycznym.

Rozdział 6 to przedstawienie szczegółowych zasad modelowania pracy źródeł wiatrowych i solarnych w zakresie analizy produkcji energii elektrycznej przez te źródła.

Zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej, w tym klasyfikację metod, opis wybranych metod klasycznych i ewolucyjnych z podaniem ich algorytmów zawarto w rozdziale 7.

Rozdziały od 8 do 10 stanowią autorską część pracy. W rozdziale 8 doktorant przedstawia kryteria prowadzonych przez niego optymalizacji: straty energii w liniach elektroenergetycznych, napięcie w węzłach systemu, energię wykorzystaną na wtórną regulację częstotliwości oraz sumaryczną pojemność instalacji magazynującej energię. Omawia także wykorzystywane profile obciążeniowe i generacyjne i algorytmy zarządzania pracą magazynów energii. Pokazuje także wyniki badań wstępnych na bazie których dokonuje wyboru metody optymalizacji.

W rozdziale 9 charakteryzowany jest obiekt badań czyli Poznański System Elektroenergetyczny (POSE), przedstawiona jest jego struktura: główne linie przesyłowe oraz istniejące źródła energii. Dodatkowo wskazano w nim założenia dotyczące rozważanych punktów przyłączenia OZE do systemu. Rozdział 10 to zestawienie wyników eksperymentów: wpływu dołączenia OZE do POSE oraz magazynów energii na poszczególne kryteria optymalizacji. Analizy dotyczą przypadków o różnym udziale (i podziale wiatrowe/fotowoltaika) OZE a także obecności magazynów lub ich braku. Testowane w ramach przeprowadzonych badań były różne strategie pracy magazynów.

Pracę kończy rozdział 11 podsumowujący badania.

Przedstawiona do recenzji praca zarówno w formie jak i w treści spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Spis literatury zawiera 160 pozycji i w większości zawiera kilku-, kilkunastoletnie pozycje co potwierdza popularność podjętej tematyki. Selekcja literatury, szczególnie w przypadku zastosowań optymalizacyjnych, jej metod i parametrów jakościowych nie jest zadaniem łatwym. Dlatego można uznać, że wybrana literatura jest wystarczająca w kontekście wymagań dla rozpraw doktorskich, choć.

Od strony językowej recenzowana rozprawa nie zawiera znaczących niedociągnięć. Jednakże w pewnych fragmentach, szczególnie w opisie części eksperymentów/symulacji autor odwołuje się do numerów węzłów oraz numeracji kryteriów co niekiedy wymusza powrót do poprzednich stron. Niedociągnięcia te nie mają jednak istotnego znaczenia na ogólną ocenę rozprawy.

3. Najważniejsze wyniki uzyskane w pracy

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie moim zdaniem należy zaliczyć:

- opracowanie koncepcji i algorytmu wielokryterialnej optymalizacji rozmieszczenia i pojemności magazynów energii w systemie dystrybucyjnym celem ograniczenia strat przesyłowych, poszerzenia możliwości regulacyjnych w zakresie częstotliwości i napięć węzłowych, kształtowania profili produkcyjnych źródeł odnawialnych oraz minimalizacji wymiany energii z pozostałą częścią systemu elektroenergetycznego, przy jednoczesnym ograniczeniu sumarycznej pojemności stosowanych magazynów,
- zaplanowanie i przeprowadzenie cyklu eksperymentów numerycznych z uwzględnieniem zróżnicowanych mocy i struktury źródeł odnawialnych włączonych w strukturę sieci dystrybucyjnej oraz sumarycznej wielkości magazynów energii,
- zaproponowanie autorskich wskaźników sprawności relatywnej i własnej pozwalających na jakościowe porównanie wyników optymalizacji wielokryterialnej otrzymanych różnymi metodami,
- opracowanie modelu profili generacyjnych na podstawie archiwalnych danych meteorologicznych z zastosowaniem analizy częstotliwościowej FFT,
- przeprowadzenie analiz wpływu mocy źródeł niestabilnych i ich struktury na pracę sieci dystrybucyjnej,

- analiza wpływu rozmieszczenia magazynów energii, ich łącznej pojemności oraz algorytmu sterowania na wartości przyjętych kryteriów jakości i poprawę wybranych parametrów pracy sieci dystrybucyjnej,
- określenie korelacji między strategią sterowania magazynami (kryterium oceny jakości) a lokalizacją i wielkością magazynów w przykładowej sieci dystrybucyjnej 110 kV,
- implementacja numeryczna i opracowanie autorskiej aplikacji do optymalizacji wielokryterialnej rozmieszczenia i pojemności magazynów energii w węzłach systemu dystrybucyjnego z włączonymi źródłami odnawialnymi typu wiatrowego i fotowoltaicznego,
- realizacja zrównoleglenia obliczeń rozptywu mocy na procesory graficzne (GPU) i wprowadzenie modyfikacji operatora mutacji do metody BRKGA,
- opracowanie aplikacji pozwalającej na wizualizację struktury i parametrów sieci dystrybucyjnej 110 kV rozmieszczonej na terenie miasta Poznania oraz powiatu poznańskiego

4. Uwagi szczegółowe, pytania

- Na ile uzyskane z podanych w rozprawie źródeł dane dotyczące parametrów linii Poznańskiego Systemu Elektroenergetycznego, obciążeń w węzłach i mocy generatorów są wiarygodne i na ile ich błędy wpływają na ogólne wnioski zamieszczone w rozprawie?
- W jaki sposób ustalono szczegółowe parametry zastosowanej do rozwiązania głównego zadania optymalizacyjnego metody BRKGA-PM? Jaki wpływ na stabilność uzyskiwanych frontów Pareto ma zmiana parametrów metody?
- Czy doktorant potrafi wyjaśnić dlaczego zaproponowana przez niego modyfikacja metody BRKGA wpływa na poprawę uzyskiwanych rezultatów?
- W rozprawie brakuje informacji, które parametry techniczne magazynów decydują o wpływie zoptymalizowanego systemu magazynowania energii na warunki pracy i parametry analizowanej sieci. Czy w ramach opracowanych algorytmów możliwa jest zatem zmiana stosowanego typu magazynu energii np. z elektrochemicznego na mechaniczny bez utraty uzyskanych efektów np. zmniejszenia wahań napięcia w węzłach i ograniczenie strat przesyłowych?
- Dlaczego do rozwiązania analizowanego zagadnienia nie zastosowano deterministycznych metod optymalizacyjnych, a w szczególności takich, które stosowane są w zadaniach typu optymalizacja rozptywu mocy OPF w sieciach elektroenergetycznych? Jeżeli istnieje możliwość zastosowania metod deterministycznych to jaki miałoby to wpływ na jakość i szybkość obliczeń w rozpatrywanym w rozprawie zadaniu?
- Praca pod względem analizowanych zagadnień jest obszerna. Dlaczego zdecydowano o tak szerokim ujęciu realizowanego w rozprawie tematu tj. badaniach w zakresie efektywności metod obliczeń rozptywu mocy, zrównolegleniu obliczeń, badaniach doboru metody ewolucyjnej do wyznaczania frontu Pareto zamiast ujęcia węższego zakresu badań – tylko w obszarze badań właściwych? Ta wielowątkowość rozprawy jest z jednej strony zaletą, z drugiej natomiast utrudnia analizę wpływu magazynów na zachodzące w systemie zjawiska i zmiany parametrów i warunków pracy rozpatrywanej sieci.
- Jako węzeł bilansujący przyjęto GPZ (Plewiska). Jakie czynniki przesądziły o tym wyborze i czy analizowano inne lokalizacje? Jak ten wybór wpływa na wyniki optymalizacji?
- Dla analizy porównawczej metod analizy rozptywu mocy wykorzystano modele IEEE, w modelach tych nie ma źródeł niestabilnych ani magazynów energii. Czy istnieją

standardowe sieci zawierające analizowane przez doktoranta elementy? W jaki sposób autor weryfikował poprawność i dokładność opracowanego algorytmu?

- Jako kryteria optymalizacji doktorant wskazuje pojedyncze parametry: straty energii, napięcie w węzłach, energia potrzebna na regulację częstotliwości, pojemność magazynu. Częstokroć w systemie w procesie regulacji biorą udział pary parametrów. Przykładowo napięcie w węzle powiązane jest z mocą bierną, w jaki sposób uwzględniane w algorytmie są tego typu zależności?
- Dlaczego w rozdziale „8.6.4 Porównanie metod optymalizacji” na wykresach z wynikami przedstawiano zawsze zależność f_4 od zależności f_1 , f_2 lub f_3 ?
- Dlaczego do analizy wyników optymalizacji (np. na str. 128) wybrano metodę korelacji Spearmana?
- W rozdział 8.6 autor często pisze o pojemności magazynu dla „szyny” (np. tab. 8.11). Jak należy to rozumieć? Czy mowa o pojemności magazynu podłączonego do węzła? Czy określenia węzeł i szyna są tożsame?
- Dlaczego w tabeli 5.2 nie przedstawiono zależności na „bezwładność potencjału” oraz „maksymalną energię” (powinno się to nazywać „pojemnością energetyczną”) baterii elektrochemicznych. Czy przepływ w tabeli 5.2 na pewno jest wyrażony w [A]? Jeśli tak, to dlaczego nie nazwano tego prądem?
- Na str. 57 pracy, wspomniano o awarii łańcucha ogniów podając jako przykład zwarcie doziemne. W jakim aspekcie należy rozumieć zwarcie ogniwa fotowoltaicznego z uziemieniem?

Drobne błędy i błędy edycyjne:

- Na rysunku 5.1 przedstawiono skróty tylko wybranych magazynów energii elektrycznej. Należałoby umieścić wszystkie albo nie umieszczać skrótów.
- We wzorach na str. 62 i na rysunku 6.10 różnie oznaczono prędkość wiatru (we wzorach „ v ”, a na rysunku „ vw ”),
- Na rysunku 6.4 błędnie (odwrotnie) oznaczono schemat jedno- i dwudiodowy.

5. Wniosek końcowy

Mgr inż. Stanisław Mikulski zdefiniował w rozprawie tezę: *„Zastosowanie wielokryterialnej metody optymalizacji do ustalenia lokalizacji, parametrów i strategii pracy magazynów energii w sieciach dystrybucyjnych z generacją niestabilną pozwala na poprawę warunków pracy sieci dystrybucyjnej i parametrów jakościowych energii elektrycznej, szczególnie ograniczenie strat przesyłowych, wartości napięć węzłowych oraz wahań mocy bilansującej”*, która pod względem naukowym jest poprawna i nie budzi zastrzeżeń. Samodzielnie opracował zagadnienie naukowe i osiągnął wyniki o wartości poznawczej, przydatne w praktyce. Wykazał się rozległą wiedzą z elektrotechniki, metod obliczeniowych oraz umiejętnością wykorzystania technik komputerowych w pracy naukowej.

Rozprawa doktorska którą przedstawia mgr inż. Stanisław Mikulski spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego wnosząc zatem o skierowanie rozprawy p.t. *„Optymalizacja parametrów i rozmieszczenia magazynów energii w sieciach dystrybucyjnych ze źródłami niestabilnymi”* do publicznej obrony.