

Kraków, 16.07.2025

prof. dr hab. inż. Paweł Ocioń
Katedra Energetyki,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Krakowska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Badanie wykorzystania mikrosieci jako wysp energetycznych integrujących prosumentów,
producentów i odbiorców przy wykorzystaniu inteligentnej infrastruktury sieciowej
autorstwa mgr inż. **Michała Laskowskiego**

promotor rozprawy doktorskiej:

prof. dr hab. inż. **Jan Kiciński**, członek korespondencyjny PAN

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Praca liczy 180 stron i jest podzielona na 7 rozdziałów, podsumowanie oraz bibliografię, która obejmuje 82 pozycje literaturowe. Po spisie treści znajduje się dosyć obszerne wprowadzenie zawierające przegląd literaturowy. Scharakteryzowano w nim system elektroenergetyczny w Polsce, rynek energii elektrycznej oraz mikrosystemy elektroenergetyczne niskiego napięcia. Przedstawiono charakterystykę techniczną podstawowych urządzeń wchodzących w ich skład, takich jak źródła małej mocy, magazyny energii elektrycznej i cieplnej, odbiory sterowalne, przekształtniki oraz aparatura zabezpieczeniowa. Opisano podstawowe komponenty systemów Odnawialnych Źródeł Energii (panele fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, pompy ciepła, turbiny wodne itd.). Opisano również, jak te elementy współpracują ze sobą, aby zapewnić stabilność i niezawodność dostaw energii. Rozdział drugi oceniam jako bardzo wartościowy, gdyż dobrze przybliża kontekst pracy. Niemniej jednak pozycje literaturowe powinny być numerowane zaczynając od [1].

W rozdziale trzecim opisany zostały analizowany obszar do przeprowadzonego badania – wytypowanej mikrosieci elektroenergetycznej, jej strukturę, zapotrzebowanie na energię elektryczną. Podano również kryteria wyboru lokoalizacji. Opisano gminę Miastkowo w kontekście liczby odbiorców, zanieczyszczenia powietrza, struktury sieci elektroenergetycznej. Sieć docelowo ma zaopatrywać w energię elektryczną 261 odbiorców. Przedstawiono również na wykresie dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną w poszczególnych miesiącach roku. Rozdział czwarty opisuje definicje optymalizacji, nie jest dla recenzenta zrozumiałe dlaczego rozdział, który przedstawia definicję optymalizacji liczy tylko jedną stronę. Podczas gdy moim zdaniem wartościowy rozdział drugi dotyczący przeglądu wiedzy w zakresie mikrosystemów elektroenergetycznych liczy 50 stron. W takim przypadku oczekiwałbym od doktoranta żeby rozdział „Optymalizacja” był jednym z podrozdziałów.

Rozdział kolejny piąty zawiera cel pracy, który przedstawia cel i tezę pracy:

Celem rozprawy doktorskiej było *opracowanie oraz symulacyjna weryfikacja nowej, kompleksowej metody optymalizacji mikrosystemu elektroenergetycznego. Proponowana metoda ma na celu minimalizację krańcowego kosztu energii elektrycznej oraz śladu węglowego, przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości i jakości zasilania odbiorców. W pracy wykorzystane zostanie autorskie narzędzie Microgrid Design and Simulation (MDS).*

W celu realizacji postawionego celu rozprawy, autor formułuje następującą **tezę pracy**:

W procesie projektowania niskonapięciowego mikrosystemu elektroenergetycznego AC/DC, pracującego w trybie wyspowym, możliwe jest skuteczne zastosowanie narzędzia MDS, wykorzystującego algorytmy optymalizujące krańcowy koszt energii elektrycznej jako skutecznego rozwiązania umożliwiającego techniczną weryfikację techniczną funkcjonowania sieci w trybach pracy wyspowej. Otrzymane wyniki z wykorzystaniem narzędzia MDS, w rozpatrywanym problemie dla różnych kryteriów, są porównywalne co do jakości z rozwiązaniami uzyskanymi przy użyciu innych metod optymalizacji dynamicznej.

W celu udowodnienia powyższej tezy oraz osiągnięcia zakładanych celów rozprawy, niezbędne dla autora jest przeprowadzenie badań o charakterze teoretycznym i praktycznym.

Zakres części teoretycznej obejmuje:

1. Sformułowanie zadań optymalizacyjnych związanych z doбором konfiguracji i stanów pracy układu wyspowego w zaprojektowanej infrastrukturze mikrosystemu elektroenergetycznego,

2. Opracowanie modeli matematycznych umożliwiających wyznaczenie krańcowych kosztów energii elektrycznej w rozpatrywanej mikrosieci.

Zakres części praktycznej obejmuje:

1. Wykonanie przykładowych symulacji pracy mikrosystemu elektroenergetycznego w trybie wyspowym w horyzoncie czasowym 24 godzin,
2. Przeprowadzenie symulacji obciążeniowej zaprojektowanego układu sieciowego,
3. Analizę otrzymanych wyników obliczeniowych i symulacyjnych, w tym analizę wrażliwości uzyskanych rezultatów względem przyjętych parametrów wejściowych.

W rozdziale tym znajduje się także opis kryteriów obliczeniowych, metod obliczeniowych zarówno w oprogramowaniu NEPLAN jak i Homer Pro oraz we własnym dedykowanym arkuszu Excel. Przedstawiono metodykę rozwiązywania następujących zadań:

Zadanie 1: kryterium optymalizacji doboru mocy źródeł energii elektrycznej dla zbilansowania zapotrzebowania odbiorców w mikrosystemie elektroenergetycznym

Zadanie 2: kryterium minimalizacji obciążenia układu sieciowego przy zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa w mikrosystemie elektroenergetycznym

Zadanie 3: kryterium minimalizacji kosztów energii w mikrosystemie elektroenergetycznym.

Moim zdaniem podrozdział 5.4: „Modele matematyczne sformułowanych zadań optymalizacyjnych” powinien mieć nazwę „Ograniczenia dla zmiennych decyzyjnych”.

Rozdział szósty przedstawia mikrosystem testowy. Opisano m.in. magistralę SN, sposób bilansowania mikro sieci. Zdefiniowano tryby pracy mikro sieci, zestawienie jej funkcjonalności. Przedstawiono sposób integracji mikro sieci z KSE oraz schematy działania mikro sieci Miastkowo w 8 trybach pracy. Te algorytmy blokowe przedstawiające schematy działanie mikro sieci są moim zdaniem bardzo dobrze zilustrowane. Podano również parametry jednostek wytwórczych: paneli fotowoltaicznych oraz turbiny wiatrowej jak również parametry magazynu energii. Przedstawiono profile odbiorców.

Przedstawiono również rozwiązanie następujących zadań optymalizacyjnych:

Zadanie 1: optymalizacja doboru źródeł w mikro sieci

Zadanie 2: minimalizacja obciążenia układu sieciowego

Zadanie 3: opłacalność mikro sieci w ujęciu ekonomicznym

W rozdziale 7 dokonano analizy wyników

Autor pracy zauważa że:

- Koszt energii elektrycznej wynoszący 0,92 zł/kWh w mikro sieci jest efektem integracji lokalnych OZE, takich jak energia słoneczna i wiatrowa, z technologiami magazynowania energii. Dzięki temu możliwe jest dynamiczne dostosowywanie produkcji energii do zmieniającego się zapotrzebowania odbiorców, co ogranicza straty przesyłowe oraz zmniejsza konieczność zakupu energii z krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE). W rezultacie mikro sieci stają się bardziej elastyczne i niezależne, co przekłada się na większą stabilność oraz niższe koszty operacyjne.
- Mikro sieci mogą osiągać konkurencyjny koszt energii mimo relatywnie wysokich nakładów inwestycyjnych, co jest rezultatem rosnącej efektywności technologii OZE oraz systemów magazynowania. Coraz niższe ceny instalacji paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych oraz magazynów energii wpływają na obniżenie całkowitych kosztów produkcji energii, co pozwala osiągać niższe krańcowe koszty jednostkowe.

Niemniej jednak według recenzenta problemem jest długoterminowe magazynowanie energii elektrycznej i w tym przypadku potencjał mogą mieć dość kosztowne jeszcze i na dzień dzisiejszy niewystarczająco efektywne technologie wodorowe.

Autor rozprawy również zauważa, że mikrosieci dzięki lokalnej produkcji energii mogą stabilizować koszty i ograniczać ryzyko wynikające ze zmienności cen na rynku, co sprzyja ich długoterminowej opłacalności. Mikrosieci umożliwiają efektywne zarządzanie szczytowym zapotrzebowaniem na energię dzięki wykorzystaniu magazynów, co pozwala ograniczyć zakupy drogiej energii z zewnątrz. Zapewniają większą elastyczność, niezależność i odporność na wahania cen, co czyni je szczególnie wartościowym rozwiązaniem w dobie dekarbonizacji i rozwoju lokalnej energetyki.

Rozdział ósmy obejmuje podsumowanie i wnioski. Przeprowadzona przez autora rozprawy analiza obciążalności linii elektroenergetycznych wykazała, że maksymalne obciążenie linii nie przekroczyło 12% wartości dopuszczalnej, co potwierdza wystarczający margines bezpieczeństwa operacyjnego. Warto podkreślić, że zastosowane strategie zarządzania obciążeniem oraz dobór automatyki zabezpieczeniowej odegrały kluczową rolę w utrzymaniu stabilności systemu.

2. Uwagi redakcyjne

1. Rysunki przedstawiające strukturę linii energetycznych powinny mieć większe czcionki, gdyż po wydruku są niewystarczająco czytelne
2. Brakuje odniesienia w tekście do części rysunków i tabel. Zazwyczaj rysunki i tabele są dość dokładnie opisywane w tekście pod tabelą czy rysunkiem. Natomiast powinno być w tekście odniesienie do numeru rysunku np. „na rys. 60 przedstawiono”.
3. Przedstawione są bardzo dobrze schematy blokowe algorytmów działania mikro sieci. Te rysunki (np. Rys. 48-54) są bardzo czytelne i zrozumiałe, natomiast dla lepszej czytelności dobrze by było w tekście w kilku zdaniach opisać poszczególne algorytmy.
4. Zdarza się błędna numeracja rysunków np. str. 136 rys. 6.1 powinno być Rys. 55
5. W kilku miejscach pominięto indeksy górne np. str. 138, Tabela 10, jest „przerój kabla 4 mm 2”. Powinno być „przekrój kabla 4 mm²”. Podobnie dla Tabeli 11 dla parametru gęstość mocy który powinien mieć wartość 297 W/m².
6. Na niektórych rysunkach brakuje jednostek dla wartości przedstawionych na osi „y” – np. rys. 30 czy też rys. 58. Oczywiście recenzent może się domyśleć że chodzi o „kWh” natomiast uważam, że na każdym z rysunków powinny być podane jednostki dla wartości przedstawionych na osi „y”.
7. Czasami występują też błędne odniesienia do rysunków np. str. 152 „Jak można zauważyć na rysunku 61” a powinno być „na rysunku 63”.

3. Uwagi szczegółowe

1. Cel pracy moim zdaniem przedstawiony zbyt późno – Cel pracy został sformułowany dopiero w rozdziale 5, co utrudnia czytelnikowi zrozumienie kierunku rozważań od samego początku. Zaleca się umieszczenie jasno określonego celu badawczego po krótkim wprowadzeniu, co pozwoli lepiej ukierunkować dalszą analizę i uporządkować strukturę tekstu. Dodatkowo warto by było skrócić lub bardziej syntetycznie ująć część wprowadzającą, która jest bardzo obszerna i miejscami zawiera informacje nie w pełni związane z głównym problemem badawczym. Nie mniej jednak część wprowadzająca dobrze przedstawia kontekst integracji systemów OZE z krajowym systemem elektroenergetycznym, natomiast mogłaby być trochę krótsza.
2. Ograniczenie analizy do kontekstu krajowego – Praca skupia się głównie na uwarunkowaniach i przykładach dotyczących jedynie polskiego kontekstu. Choć jest to zrozumiałe, biorąc pod uwagę charakter danych lub lokalne uwarunkowania tematyczne, warto byłoby rozważyć, w jaki sposób poruszany problem może być odniesiony do

szerszego, międzynarodowego kontekstu. Ujęcie porównawcze mogłoby wzbogacić analizę, uwypuklić uniwersalne aspekty problemu oraz wskazać, które wnioski mają charakter ogólny, a które wynikają z lokalnej specyfiki. Np. jak zaproponowane w pracy rozwiązania sprawdziłyby się we Włoszech czy w Finlandii. Czy byłyby bardziej czy mniej opłacalne niż w Polsce.

3. Kwestie długoterminowego magazynowania energii elektrycznej dla mikro sieci. Czy jest skuteczne i efektywne rozwiązanie tego problemu ?

4. Wnioski i ocena końcowa

Przedstawione wyżej uwagi nie zmieniają mojej opinii o przedstawionej rozprawie, która jest pozytywna. Praca doktorska dotyczy analizy opłacalności mikro sieci elektroenergetycznych. Bazując na autorskim arkuszu doktorant przeprowadził badania opłacalności, w którym analizowano krańcowy koszt energii elektrycznej dla odbiorców w porównaniu do kosztu zakupu energii elektrycznej z rynku. Doktorant uwzględnił wszystkie składowe inwestycyjne, poczynając od urządzeń wytwórczych, sieciowych, urządzeń magazynowych, jak również koszty obsługi, operatorstwa i bilansowania. Opłacalność wdrożenia liczono w projekcji 15-letniej. Przeprowadzona przez doktoranta analiza wykazała konkurencyjność zaprezentowanego rozwiązania, co potwierdziło skuteczność metod optymalizacyjnych przy doborze źródeł oraz przyłączenia urządzeń oraz samego operatorstwa i pracy sieci.

Doktorant przeprowadził całoroczne symulacje pracy urządzeń wytwórczych bazujących na rzeczywistych danych pogodowych, uwzględniając straty sieciowe. Wyniki symulacji uzyskane przez doktoranta potwierdziły skuteczność proponowanych przez niego algorytmów optymalizacyjnych.

Co warto pokreślić, uzyskane przez doktoranta wyniki symulacji pokazują, że budowa mikro sieci elektroenergetycznej w lokalizacji Miastkowo jest technicznie wykonalna i ekonomicznie uzasadniona.

Najważniejsze osiągnięcia pracy to:

1. Opracowanie autorskiego arkusza badania opłacalności mikro sieci

Doktorant wykonał obliczenia bazujące na autorskim arkuszu badania opłacalności, w którym analizowano krańcowy koszt energii elektrycznej dla odbiorców w porównaniu do kosztu zakupu energii elektrycznej z rynku. Uwzględniono wszystkie składowe inwestycyjne, poczynając od urządzeń wytwórczych, sieciowych magazynowych, jak

również koszty obsługi, operatorstwa i bilansowania. Doktorant wykazał konkurencyjność zaprezentowanego rozwiązania, co potwierdziło skuteczność zaproponowanych przez niego metod optymalizacyjnych i symulacyjnych.

2. Analiza obciążalności linii elektroenergetycznych

Doktorant w przeprowadzonej analizie wykazał, że maksymalne obciążenie linii elektroenergetycznej nie przekroczyło 12% wartości dopuszczalnej, co potwierdza wystarczający margines bezpieczeństwa operacyjnego. Zastosowane przez doktoranta strategie zarządzania obciążeniem oraz dobór automatyki zabezpieczeniowej miały kluczową rolę w utrzymaniu stabilności systemu.

3. Symulacje pracy urządzeń wytwórczych

Doktorant przeprowadził całoroczne symulacje pracy urządzeń wytwórczych bazujących na rzeczywistych danych pogodowych, uwzględniając straty sieciowe. Wyniki symulacji potwierdziły skuteczność proponowanych przez niego algorytmów optymalizacyjnych.

4. Opracowanie koncepcji struktury sieciowej

Doktorant opracował strukturę sieciową opartą o dwusekcyjną magistralę, która osiąga wysoki zapas możliwości przyłączeniowych zarówno źródeł wytwórczych, jak i dużych odbiorców. Wyniki przeprowadzonych przez doktoranta symulacji potwierdziły skuteczność proponowanych algorytmów optymalizacyjnych.

5. Optymalizacja doboru źródeł energii

Doktorant opracował algorytmy doboru źródeł energii elektrycznej do mikro sieci, w celu zaspokojenia potrzeb odbiorców, zarówno mocy, jak i energii elektrycznej. Analiza obejmowała obliczenia dotyczące osiągania optymalnej mocy urządzeń na przestrzeni 12 miesięcy.

6. Weryfikacja współpracy mikro sieci z krajowym systemem elektroenergetycznym

Doktorant przeprowadził analizę porównawczą produkcji energii w źródłach w korelacji z zapotrzebowaniem na energię elektryczną odbiorców. Badania te były oparte o rzeczywiste dane o zużyciu energii elektrycznej.

Uważam, że doktorant osiągnął cel pracy którym było:

- opracowanie metody optymalizowania mikrosystemu elektroenergetycznego, która minimalizuje krańcowy koszt energii elektrycznej oraz ślad węglowy, jednocześnie zaspokajając potrzeby odbiorców.

Wniosuję do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie ocenianej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Doktorant w moim przekonaniu osiągnął cel rozprawy doktorskiej. Rozprawa spełnia również wymagania stawiane przez odpowiednie ustawy (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm).