

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Franciszka Sidorskiego

pt. „Wykorzystanie odnawialnych źródeł i magazynów energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych”.

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, zgodnie z uchwałą ww. Rady z dnia 20.06.2023 r.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska. Promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Bartosz Ceran, prof. PP.

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

W ostatnich latach obserwuje się ciągły wzrost udziału źródeł odnawialnych w całkowitej produkcji energii elektrycznej w Polsce. Szczególnie mocno obserwowany jest wzrost liczby małych i średnich instalacji fotowoltaicznych charakteryzujących się dużym rozproszeniem w terenie. Nie bez znaczenia pozostaje wpływ tych instalacji na sieć elektroenergetyczną, której charakter pracy w ostatnim czasie uległ radykalnej zmianie. Sieci te projektowano jako jednokierunkowe, których zadaniem było przesyłanie energii elektrycznej z elektrowni do odbiorców. Obecnie te same sieci realizują funkcję dwukierunkowe, umożliwiając również przesył energii wyprodukowanej w instalacjach prosumenckich do systemu elektroenergetycznego. Ze względu na trudności o charakterze sieciowym, coraz częściej występują wyłączenia odnawialnych źródeł energii (OZE) spowodowane problemami w zakresie zbilansowania energii w systemie elektroenergetycznym. Z powodu zmiany charakteru pracy sieci, jak również rosnące obciążenie konieczna jest jej rozbudowa lub modernizacja, co jest procesem bardzo kosztownym i długotrwałym. Dlatego koniecznym staje się poszukiwanie rozwiązań technicznych umożliwiających wykorzystanie energii elektrycznej z OZE na miejscu zainstalowania źródeł odnawialnych, bez konieczności przesyłania energii za pomocą sieci elektroenergetycznej.

Analizując pracę polskiego systemu elektroenergetycznego można zauważyć w okresie ostatnich 20 lat znaczący wzrost ilości zużywanej przez odbiorców energii elektrycznej. Prognozuje się, że w kolejnych latach tendencja wzrostowa w tym zakresie nie tylko się utrzyma, ale może również wzrosnąć. Nie bez znaczenia w tej kwestii pozostaje rozwój elektromobilności, która w obecnej rzeczywistości technologicznej bazuje w głównej mierze na wykorzystaniu energii elektrycznej z baterii



trakcyjnej pojazdu ładowanej z sieci elektroenergetycznej. Zwiększająca się ilość pojazdów elektrycznych wymusza zwiększenie liczby stacji ładowania, w tym szybkich stacji ładowania bardzo mocno oddziałujących lokalnie na infrastrukturę elektroenergetyczną. Zgodnie z przewidywaniami do końca 2030 roku w Polsce liczba stacji ładowania ma wzrosnąć z ok. 5000 do ok. 100000 jednostek.

Z ekologicznego punktu widzenia kluczowe znaczenie ma rozwój elektromobilności w dużych miastach, gdzie oddziaływanie spalin ma szczególnie negatywny wpływ na organizm człowieka. Zeroemisyjny transport publiczny jest jednym z filarów poprawy jakości powietrza oraz zmniejszenia hałasu w aglomeracjach miejskich. Z tego powodu obserwuje się bardzo dynamiczny wzrost wykorzystania floty pojazdów elektrycznych w transporcie publicznym i rozwój infrastruktury wykorzystywanej do ładowania autobusów elektrycznych. Wzrost liczby stacji ładowania powoduje zwiększenie zapotrzebowania na energię elektryczną w terenach silnie zurbanizowanych. Ze względu na wcześniej wspomniane problemy dotyczące sieci dystrybucyjnej konieczne jest poszukiwanie rozwiązań umożliwiających wykorzystanie OZE bezpośrednio w stacjach ładowania pojazdów elektrycznych. Będzie to stanowiło znaczące odciążenie istniejącej infrastruktury sieciowej.

W ramach recenzowanej pracy doktorskiej opracowano model matematyczny rozbudowy stacji ładowania autobusów elektrycznych zasilanej z sieci elektroenergetycznej, o hybrydową jednostkę wytwórczą (HJW) składającą się z elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej oraz bateryjnego magazynu energii. W procesie modelowania wykorzystano trzy profile pracy stacji ładowania: dzienny – małej mocy, dzienny – dużej mocy, i nocny oraz wykonano długoterminową symulację działania układu. W procesie analizy rozpatrywano rzeczywiste warunki pracy poprzez uwzględnienie procesów starzeniowych jednostek wchodzących w skład HJW. Dla zoptymalizowania procesu doboru poszczególnych elementów HJW wyznaczono trzy kryteria: LPSP (ang. Loss of Power Supply Probability) – czyli prawdopodobieństwo utraty zasilania odzwierciedlające w jakim stopniu rozpatrywany układ jest niezależny od zasilania z sieci elektroenergetycznej, LCOE (ang. Levelized Cost of Electricity) – wskaźnik ekonomiczny uwzględniający uśredniony koszt energii elektrycznej oraz EEI (ang. Environmental Emissions Impact) – wskaźnik oceniający wpływ środowiskowy na podstawie ekwiwalentu emisji CO₂. Dodatkowo przeprowadzono wielokryterialną analizę porównawczą, której wynikiem jest wyznaczenie rankingu parametrów analizowanych układów HJW dla każdego z rozpatrywanych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych. Ponadto wskazano scenariusz Pareto-optimalny, który zajął pierwsze miejsce w rankingu rozwiązań i jest najbardziej rekomendowany na podstawie wartości wyznaczonych kryteriów i nadanych im wag.

Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest aktualna i ważna ze względu na jej znaczenie poznawcze i praktyczne.

W rozprawie sformułowano następujące cele pracy:

- opracowanie modelu matematycznego układu zasilania stacji ładowania autobusów elektrycznych, nadbudowanego o elektrownię fotowoltaiczną, elektrownię wiatrową oraz baterijny magazyn energii dla rozpatrywanych profili pracy stacji z uwzględnieniem pracy długoterminowej oraz spadku wydajności układów generacji oraz magazynowania;
- opracowanie algorytmu stanowiącego strategię zarządzania stacją;
- dla danych, charakterystycznych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych i założonych zakresów mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej oraz pojemności zainstalowanych magazynów energii wykonanie

długoterminowej symulacji pracy układu wraz z wyznaczeniem kryteriów oceny niezawodnościowych, ekonomicznych i środowiskowych dla każdej rozpatrywanej konfiguracji HJW;

- na podstawie wyznaczonych wartości kryteriów oceny, dla analizowanych charakterystycznych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych nadbudowanych o rozpatrywane konfiguracje HJW, wyznaczenie rankingów oraz rozwiązań Pareto- optymalnych za pomocą metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji i obiektywnej oraz subiektywnej metodyki nadawania wag kryteriów;
- wykonanie analizy wrażliwości wybranych parametrów;
- w ramach dyskusji wyników, na podstawie wyznaczonych rankingów, określenie zależności dla danych, charakterystycznych profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych.

Uważam, że cele pracy są ambitne i spełniające wymagania stawiane pracom doktorskim.

Autor przedstawił tezę pracy, którą sformułował w sposób jawny w rozdziale 2:

„Dobór parametrów urządzeń hybrydowej jednostki wytwórczej HJW, tj. mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej oraz pojemności baterijnego magazynu energii, stanowiącej nadbudowę stacji ładowania autobusów elektrycznych pracującej on-grid, można rozpatrywać jako zadanie, które jest możliwe do rozwiązania za pomocą metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji z uwzględnieniem aspektów energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych”.

Dodatkowo Autor przedstawił uzupełnienie ww. tezy, które sformułował następująco:

„Możliwe jest dobranie wartości wag kryteriów wielowariantowej analizy porównawczej, na podstawie których wartości parametrów urządzeń hybrydowej jednostki wytwórczej HJW, tj. mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej oraz pojemności baterijnego magazynu energii, stanowiącej nadbudowę do stacji ładowania autobusów elektrycznych o określonym profilu zapotrzebowania, będzie miało uzasadnienie energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe”.

Teza pracy jest poprawna i odpowiednio sformułowana.

2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 112 stron. Zawiera osiem rozdziałów, bibliografię, spis rysunków i spis tabel. Spis literatury zawiera 78 pozycji, wśród których znajdują się zarówno publikacje krajowe, jak i liczne publikacje międzynarodowe. Uważam, że literatura zacytowana w rozprawie doktorskiej została dobrana w sposób poprawny. Doktorant jest współautorem 3 cytowanych pozycji.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do podjętej tematyki. Przedstawiono w nim ogólne zagadnienia związane z OZE, magazynami energii oraz stacjami ładowania autobusów elektrycznych.

Scharakteryzowano również obecną sytuację sektora energetycznego w Polsce oraz jego aktualne wyzwania.

W rozdziale drugim sformułowano tezę rozprawy doktorskiej wraz z jej uzupełnieniem oraz przedstawiono oryginalne cele pracy i jej zakres.

Rozdział trzeci zawiera przegląd literatury. Omówiono w nim zagadnienia dotyczące rozwoju elektromobilności w transporcie publicznym dużych miast i wpływu stacji ładowania autobusów elektrycznych na sieć elektroenergetyczną. Przedstawiono również zagadnienia związane z wykorzystaniem OZE i magazynów energii w celu zbilansowania energii wyprodukowanej za pomocą źródeł odnawialnych i konsumowanej przez odbiorców. Scharakteryzowano także zagadnienia wpływu OZE na pracę sieci elektroenergetycznej oraz doboru HJW w kontekście ich współpracy z systemem elektroenergetycznym i możliwości ich zastosowania w stacjach ładowania pojazdów elektrycznych. Przedstawiono również uzasadnienie nowości zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej badań na tle innych doniesień literaturowych.

W rozdziale czwartym scharakteryzowano rodzaje i budowę stacji ładowania autobusów elektrycznych. Omówiono trzy rodzaje stacji: typu plug-in, pantografowe oraz stacje ładowania indukcyjnego.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały piąty, szósty i siódmy, zawierające wyniki oryginalnych badań Doktoranta.

Rozdział piąty zawiera charakterystykę rozpatrywanych w rozprawie profili pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych. Przedstawiono trzy główne profile: dzienny – małej mocy, dzienny – dużej mocy oraz nocny. Ponadto omówiono modele matematyczne elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej oraz baterijnego magazynu energii. W procesie modelowania uwzględniono średnie roczne natężenie promieniowania słonecznego, temperaturę otoczenia i prędkość wiatru. W końcowej części rozdziału zaprezentowano strategię zarządzania HJW pracującą w ramach mikrosieci wraz z algorytmem zarządzania układem.

W rozdziale szóstym zdefiniowano sposób wielokryterialnego wspomaganie decyzji oraz przedstawiono wybraną metodę, z wykorzystaniem której porównano kryteria oceny dotyczące parametrów HJW tj. mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznej, wiatrowej oraz baterijnego magazynu energii, stanowiących nadbudowę dla pracujących on-grid stacji ładowania autobusów elektrycznych. W pracy przyjęto trzy kryteria służące do oceny ww. parametrów: LPSP – prawdopodobieństwo utraty zasilania, LCOE – uśredniony koszt energii elektrycznej, a także EEI – wpływ środowiskowy. Opisano również zastosowaną do wyznaczania rankingu rozpatrywanych konfiguracji metodę analizy wielokryterialnych rozwiązań TOPSIS.

Rozdział siódmy zawiera szczegółowe wyniki badań Doktoranta. Przedstawiono w nim dane wejściowe do przeprowadzonych symulacji oraz wyniki kryteriów oceny poszczególnych scenariuszy zaprezentowane w postaci trójwymiarowych wykresów i tabel. Ponadto zaprezentowano wyniki wykonanej analizy wrażliwości wybranych parametrów wejściowych.

Rozdział ósmy zawiera podsumowanie wyników badań wykonanych w ramach prac nad rozprawą doktorską. W rozdziale tym scharakteryzowano również możliwe kierunki dalszych badań.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- opracowanie modelu matematycznego układu zasilania stacji ładowania autobusów elektrycznych, zawierającego elektrownię fotowoltaiczną, elektrownię wiatrową oraz magazyn energii dla trzech profili pracy stacji uwzględniający parametry pracy długoterminowej oraz zmniejszenie wydajności układów generacji oraz magazynowania,
- wykonanie symulacji pracy układu stacji wyposażonej w HJW z uwzględnieniem zdefiniowanych kryteriów: energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych dla każdej rozpatrywanej konfiguracji,
- opracowanie algorytmu sterowania pracą stacji ładowania autobusów elektrycznych wyposażonych w HJW,
- wyznaczenie rankingów oraz rozwiązań Pareto-optymalnych rozpatrywanych układów za pomocą metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji i obiektywnej oraz subiektywnej metodyki nadawania wag kryteriów.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy, w oparciu o dobre rozeznanie problemów obliczeniowych i inżynierskich związanych tematyką rozprawy. Potrafił przeprowadzić eksperyment z wykorzystaniem symulacji komputerowej oraz wykonać wielowariantową analizę uzyskanych wyników.

Stwierdzam, że doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy w zakresie szeroko rozumianej energetyki.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Styl oraz poziom językowy jest dobry. Szata graficzna jest staranna i dopracowana. Sposób przekazywania treści jest zadowalający. Wszystkie symbole zostały precyzyjnie objaśnione. Informacja jest dość dobrze wyważona. Jedynym mankamentem od strony edytorskiej jest nieuwzględnienie w treści rozprawy trzech pozycji literaturowych 56, 67 i 78.

Czytając lekturę pracy odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autora, który potrafi dodatkowo przedstawić swoje wyniki w sposób przyjazny dla czytelnika. W pracy można znaleźć niewielką ilość błędów edytorskich, stylistycznych, gramatycznych. Nie wpływają one w żadnym stopniu na wysoką ocenę redakcji rozprawy.

5. Uwagi merytoryczne

1. W pracy brakuje informacji przy pomocy jakich narzędzi informatycznych Doktorant przeprowadził swoje badania. Czy Autor rozważał w przyszłości możliwość zastosowania narzędzi sztucznej inteligencji do wspomaganie procesu predykcyjnego związanego

z zarządzaniem pracą hybrydowej stacji ładowania, a także w zakresie doboru optymalnych parametrów HJW współpracującej ze stacją ładowania pojazdów elektrycznych?

2. Podczas przeprowadzania symulacji pracy hybrydowej stacji ładowania autobusów elektrycznych Doktorant wykonał obliczenia dla 15 lat pracy badanego układu. W swoich obliczeniach uwzględnił wskaźniki rocznej degradacji modułów fotowoltaicznych (d_{PV}) i elektrowni wiatrowej (d_{EW}). Wartości te zostały podane na podstawie przykładowej karty katalogowej i doniesień literaturowych. W jakim stopniu przyjęte współczynniki są uniwersalne dla poszczególnych typów elektrowni fotowoltaicznych, jak również elektrowni wiatrowych. Dlaczego dla pierwszego roku eksploatacji w przypadku generatorów wiatrowych współczynnik ten jest taki sam jak dla kolejnych lat eksploatacji, natomiast w przypadku elektrowni fotowoltaicznych wynosi 1? Czy proces starzenia ww. elementów układu ma charakter liniowy?
3. Na potrzeby prowadzonych symulacji ustalono wartości graniczne następujących parametrów: mocy elektrowni fotowoltaicznej, mocy elektrowni wiatrowej i pojemności bateryjnego magazynu energii. W jakim stopniu założone parametry są w stanie pokryć zapotrzebowanie na przeprowadzenie pełnego procesu ładowania przykładowego miejskiego autobusu elektrycznego, a w jakim stopniu założono konieczność wspomaganie procesu ładowania energią z sieci przy uwzględnieniu trzech rozpatrywanych profili pracy ładowarki.
4. W tabeli 7.2 przedstawiono wagi dobrane dla poszczególnych kryteriów. Jakimi przesłankami kierował się Autor podczas ich doboru?
5. Na rys. 5.5, 5.6 oraz 5.8 przedstawiono profile nasłonecznienia, temperaturę otoczenia i prędkość wiatru. Dane te mają uogólniony charakter i są wartościami średnimi przyjętymi dla całej Polski. Wiadomo, że te parametry różnią się dla poszczególnych części naszego kraju. Czy Doktorant prowadził analizy dotyczące wpływu zmian ww. parametrów uwzględniając położenie geograficzne układu ładowania na wyniki prowadzonych badań?
6. Jakie rodzaje turbin wiatrowych można wykorzystać w proponowanych rozwiązaniach HJW, które z jednej strony będą spełniały założone wymagania techniczne, a z drugiej strony nie będą negatywnie oddziaływały na otoczenie, które w przypadku stacji ładowania miejskich autobusów elektrycznych jest silnie zurbanizowane?

Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną do recenzji rozprawę należy zaliczyć do grupy prac o charakterze badań modelowych. Autor przeprowadził bardzo ciekawe z punktu widzenia poznawczego i praktycznego badania w obszarze możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych. Jego prace zmierzały do opracowania wielokryterialnej metodyki wspomaganie procesu podejmowania decyzji w zakresie doboru parametrów urządzeń HJW przy uwzględnieniu aspektów energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych. Na podstawie swoich badań opracował scenariusze Pareto-optymalne mocy zainstalowanej elektrowni wiatrowej, elektrowni fotowoltaicznej oraz pojemności bateryjnego magazynu energii. Doktorant przeprowadził również ciekawą analizę wrażliwości, w której uwzględnił znaczące obniżenie dochodów ze sprzedaży energii elektrycznej do sieci oraz jej ceny zakupu, jak również zmniejszenie wskaźnika emisji na 1 kWh energii pobranej z sieci elektroenergetycznej.

Przeprowadzone badania wymagały od Doktoranta dużej wiedzy z zakresu prowadzenia badań, tworzenia modeli matematycznych i wykonywania symulacji komputerowych. Doktorant posiada umiejętność szczegółowej analizy danych oraz wykorzystania metodyki wielokryterialnego wspomaganie decyzji w procesie doboru parametrów HJW.

Doktorant wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązał w sposób oryginalny zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe z punktu widzenia możliwości przyszłego zastosowania w praktyce. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny Doktoranta.

Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Franciszka Sidorskiego do publicznej obrony przedłożonej pracy.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Cichoń