

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. **PIOTRA HYLLI**

**pt „Hybrydowe Magazyny Energii-Analiza Możliwości Zwiększenia
Udziału OZE w Sumarycznej Produkcji Energii Elektrycznej”**

wykonanej w Katedrze Mechatroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki
Śląskiej w Gliwicach

pod kierunkiem **dr hab.inż.Tomasza Trawińskiego,prof. PŚ**

Promotor pomocniczy: **dr hab. Inż. Wojciech Burlikowski,prof.PŚ,**

Opiekun ze strony przedsiębiorstwa: **dr inż. Bartosz Polnik**

1. Podstawa formalno-prawna opracowania recenzji

Podstawę formalno-prawną opracowania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Hylli na temat: „Hybrydowe Magazyny Energii-Analiza Możliwości Zwiększenia Udziału OZE w Sumarycznej Produkcji Energii Elektrycznej” stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej dr hab.inż.Adama Gałuszki,, prof.PŚ z dnia 25.11.2025.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1 Wprowadzenie

Większość światowej produkcji energii elektrycznej oparta jest, jak dotychczas, na paliwach kopalnych takich jak węgiel , ropa naftowa czy gaz ziemny. Dynamicznie zmieniająca się jednak ,zwłaszcza ostatnio, sytuacja w Europie i na świecie skutkuje istotnymi problemami w produkcji energii elektrycznej z tych naturalnych surowców , głównie z uwagi na zakłócenia w dostępności i zwiększane koszty ich zakupu... Dodatkowo, rosnąca troska o środowisko naturalne, przejawiająca się odchodzeniem od paliw kopalnych, , zwiększa zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii ,zwłaszcza opartymi na energii wiatru i promieniowania słonecznego. W celu więc efektywnego ich wykorzystania konieczna staje się reorganizacja dotychczasowego systemu elektroenergetycznego. . Rozwiązaniem problemów związanych z produkcją energii elektrycznej może być stopniowe zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii OZE w sumarycznej produkcji energii przy równoczesnym stopniowym ograniczaniu udziału elektrowni konwencjonalnych.. Ze względu jednak na niestabilny i okresowy charakter pracy większości źródeł energii OZE ,zwłaszcza najpopularniejszych w Polsce fotowoltaiki oraz turbin wiatrowych ,konieczne jest zastosowanie dodatkowych elementów magazynujących energię oraz mechanizmów umożliwiających predykcję produkcji energii elektrycznej. Biorąc pod uwagę fakt, iż obecnie zdecydowana większość komponentów związanych z odnawialnymi źródłami energii, magazynowaniem energii oraz odbiornikami wykorzystuje prąd stały – bezpośrednio lub pośrednio –uzasadnionym jest

wprowadzenie dodatkowej instalacji prądu stałego umożliwiającej efektywne zarządzanie przepływem energii pomiędzy poszczególnymi elementami systemu. Ponieważ, nie istnieje możliwość nieograniczonego zwiększania OZE w systemie elektroenergetycznym, zaś infrastruktura elektroenergetyczna w Polsce nie jest obecnie przystosowana do efektywnego odbioru i zagospodarowania nadwyżek energii wytwarzanej z OZE to niezbędnym jest opracowanie i wdrażanie rozwiązań eliminujących te bariery. Autor biorąc więc pod uwagę powyższe oraz bazując na wynikach analiz tak teoretycznych jak i badań eksperymentalnych postawił sobie za cel rozwiązanie ciekawego problemu naukowego z istotnym aspektem praktycznym, jakim jest opracowanie, zbadanie oraz wdrożenie systemu do zarządzania przepływem energii pomiędzy zróżnicowanymi technologicznie zasobnikami energii, w formie tzw. rutera DC. Działanie innowacyjnego układu przeznaczonego do zarządzania przepływem energii elektrycznej, zwłaszcza w instalacjach obiektów mieszkalnych (domy jednorodzinne lub akademiki), oparto na algorytmach logiki rozmytej..

Rozprawa doktorska mająca charakter koncepcyjno-eksperymentalny obejmuje 130 stron wraz z wykazem oznaczeń i wykazem literatury zawierającym 111 publikacji.. Składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu (zawierającego tezę i cel rozprawy) oraz 7-miu głównych rozdziałów. Rozdział 2 poświęcony jest przedstawieniu problemu naukowego z położeniem nacisku na ograniczenia w stosowaniu odnawialnych źródeł energii. Wyjaśnia ograniczenia w produkcji energii elektrycznej zarówno po stronie sieci dystrybucyjnej jak i po stronie prosumentów. Dokonuje przeglądu technologii magazynowania energii elektrycznej na podstawie badania aktualnego stanu wiedzy korzystając z dostępnych źródeł zarówno technicznych jak i naukowych. Zaczyna od wyjaśnienia zasady działania jednej z najstarszych i najpowszechniej stosowanych metod wykorzystujących wodę jako medium gromadzenia energii w elektrowniach szczytowo-pompowych. Inną technologią gromadzenia energii są kinetyczne magazyny energii wykorzystujące energię kinetyczną obracającego się obiektu. Aktualnie stosowane są magazyny energii z kołem zamachowym w szerokim zakresie mocy i pojemności od wielkoskalowych zasobników przeznaczonych dla sieci elektroenergetycznych do magazynów małej skali przeznaczonych dla klienta indywidualnego. Bardzo duże znaczenie mają bateryjne magazyny energii których dynamiczny rozwój wymusiło powszechne zastosowanie, zwłaszcza we wszelkiego rodzaju urządzeniach elektronicznych powszechnego użytku oraz w elektromobilności, w szerokim tego słowa znaczeniu. Obszar zastosowania poszczególnych rodzajów baterii różni się ze względu na cechy ich technologii. Na przykład najczęściej stosowane ogniwa litowe umożliwiają ich wykorzystanie w układach wymagających dużych chwilowych mocy oraz szybkiej reakcji. Niektóre z nich jednak są uważane za niebezpieczne w eksploatacji (np. litowo-jonowe) i wymagają szczególnej uwagi w zastosowaniach. Na osobną uwagę zasługują ogniwa przepływowe charakteryzujące się długim czasem pracy umożliwiając długoterminowe magazynowanie energii dzięki prawie nieistotnemu zjawisku samo-rozładowania. Autor część uwagi poświęca rozwijającej się przyszłościowej technologii magazynowania energii wykorzystującej wodór jako medium magazynujące. Prezentuje i omawia parametry rozwiązań wodorowych magazynów energii kilku wybranych firm zagranicznych. Porusza również problem aplikacji superkondensatorów jako odrębnej technologii magazynowania energii za pomocą kondensatorów elektrolitycznych o specjalnej budowie. Zasobniki bowiem energii wykorzystujące tą technologię charakteryzują się niską gęstością energii na poziomie 10 Wh/kg i jedną z największych sprawności gromadzenia energii na poziomie 95%. Dodatkowymi zaletami superkondensatorów w aplikacjach zasobników energii jest trwałość wynosząca 20 lat oraz duża liczba cykli ładowania i rozładowania (do 1 000 000 cykli). Zasobniki superkondensatorowe powszechnie uważane są jednak za magazyny krótkoterminowe, dlatego że umożliwiają szybkie ładowanie i rozładowanie. Obecnie najczęściej superkondensatory stosuje się w połączeniu z innymi technologiami magazynowania energii np. baterie, ogniwa paliwowe.

Należy jednak podkreślić, że dynamiczne zmiany w systemach elektroenergetycznych, praktyczny dostęp do różnych rodzajów odnawialnych źródeł energii oraz konieczność zapewnienia nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej wymusza stosowanie zasobników energii o zróżnicowanych właściwościach. Dodatkowo inwestycja związana z budową i eksploatacją magazynu musi być opłacalna i w pełni funkcjonalna tak aby zwiększyć komfort indywidualnego odbiorcy. Koniecznym więc staje się połączenie różnych technologii w taki sposób by zapewnić odpowiednią wszechstronność. Powstają w ten sposób hybrydowe systemy magazynowania energii łączące dwa lub większą ilość technologii zasobników energii o komplementarnych właściwościach. Przykładem tego mogą być, omawiane przez Autora, takie istniejące już rozwiązania jak hybrydowy magazyn energii w ramach projektu HyStore, magazyn zintegrowany z kondycjonerem kolejowym czy zastosowany w stacji szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych.

Rozdział 3 stanowi istotną część pracy dotyczącą pomiarowej weryfikacji bilansu energetycznego wykonanej dla trzech rzeczywistych obiektów mieszkalnych. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów dokonano analizy obejmującej dobór parametrów dodatkowej instalacji fotowoltaicznej (PV) z wyznaczeniem parametrów tzw. autokonsumpcji oraz niezależności energetycznej dla obiektu bez dodatkowych magazynów energii. Przeprowadzono analizę doboru parametrów dobrego magazynu energii opartego na najpopularniejszych obecnie ogniwach litowych. Uzupełniono ją o dobór sezonowego magazynu energii umożliwiającego magazynowanie energii w skali roku w ramach hybrydowego magazynu wraz z dobowym zasobnikiem energii. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy porównawczej dla 3-ch przypadków tj.: obiektu wyposażonego jedynie w instalację PV, w instalację PV oraz dobowy magazyn energii, oraz w instalację PV wraz z hybrydowym magazynem energii. Kolejny rozdział 4 poświęcony jest opracowaniu modelu symulacyjnego rutera energii, który przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie dokonano implementacji poszczególnych elementów składowych rutera energii w postaci źródeł (PV oraz turbiny wiatrowe), magazyny energii (baterie litowe, superkondensatory), w środowisku MATLAB Simulink. W drugim natomiast przystąpiono do integracji wcześniej zaimplementowanych komponentów w ramach rutera energii z rzeczywistymi danymi zużycia energii. Jako element integrujący poszczególne elementy na wspólnej szynie DC dobrano dwukierunkowy przekształtnik BUCK/BOOST. Testy symulacyjne rozpoczęto od układu źródło-przekształtnik-bateria stopniowo rozbudowując układ do postaci zasilanego z paneli fotowoltaicznych integrujący w swojej budowie dwa zróżnicowane technologicznie magazyny energii oraz odbiorniki zasilane poprzez falownik. Z uwagi na konieczność uwzględnienia potrzeb partnera przemysłowego zmieniono koncepcję rozwiązania rutera energii z postaci sprzętowego urządzenia umożliwiającego integrację poszczególnych komponentów oraz zarządzania przepływem energii pomiędzy nimi do postaci algorytmu umożliwiającego integrację zróżnicowanych technologicznie źródeł OZE ze zróżnicowanymi technologicznie magazynami energii w celu osiągnięcia wysokiego stopnia autokonsumpcji i niezależności energetycznej. Prace związane z realizacją prototypu rutera energii rozpoczęte od doboru ogólnej konfiguracji oraz analizy algorytmów sterowania przepływem energii przedstawiono w rozdziale 5. Biorąc pod uwagę ilość dostępnych parametrów jak również możliwości ich praktycznego wykorzystania zdecydowano o zastosowaniu algorytmów logiki rozmytej. W efekcie zaprezentowano specyfikę podejścia do opracowania regulatora opartego na algorytmach logiki rozmytej. W ramach ww. prac zadeklarowano funkcje przynależności dla poszczególnych parametrów wejściowych i wyjściowych. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki pomiarów w instalacji elektrycznej niskiego napięcia z odnawialnymi źródłami energii, magazynami energii oraz odbiornikami energii sformułowano 81 pojedynczych reguł stanowiących odpowiedź na wszystkie możliwe stany mogące powstać w układzie z 4 modułami wejściowymi (PV, baterijny magazyn energii, superkondensatory, odbiorcy energii). Następnie regulator logiki rozmytej opracowany w środowisku MATLAB zintegrowano w ramach całego modelu symulacyjnego w środowisku Simulink. Wyniki działania regulatora przepływu energii po zintegrowaniu wszystkich komponentów i po dokonaniu odpowiednich korekt działania z uwzględnieniem różnych metod defuzyfikacji przedstawiono w rozdziale 6. Biorąc pod uwagę prawidłowość działania układu za najlepszą metodę defuzyfikacji uznano bisektor.

2.2 Wybór tematu i poprawność jego sformułowania

Biorąc pod uwagę znaczenie analizowanego problemu, wybór tematu recenzowanej rozprawy doktorskiej jest trafny i jak najbardziej aktualny. Poruszone zagadnienie jest istotne nie tylko ze względów poznawczych, ale przede wszystkim ze względów utylitarnych. Temat rozprawy jest sformułowany w miarę jasno i czytelnie. Przeprowadzone przez Autora rozważania poparte wynikami badań eksperymentalnych i analizy symulacyjnej w ramach przewodu doktorskiego, wskazują na oryginalne podejście do sposobu rozwiązania systemu do zarządzania przepływem energii pomiędzy zróznicowanymi technologicznie zasobnikami energii w formie tzw. rutera DC. Recenzowana rozprawa doktorska dobrze się więc wpisuje w nurt prac badawczych dotyczących aktualnych i ważnych zagadnień w tym zakresie. Na podstawie uzyskanych wyników własnych rozważań, oraz wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz analizy symulacyjnej Autor udowodnił prawidłowość rozumowania i praktyczną przydatność własnej koncepcji, wykazując tym samym słuszność postawionej tezy.

2.3. Określenie celu i jego realizacja

Recenzowana rozprawa doktorska ma wprowadzić charakter głównie aplikacyjny, ale do jej realizacji Autor musiał wykazać się również odpowiednią wiedzą teoretyczną i podejściem naukowym do sposobu rozwiązania postawionych problemów. Głównym celem rozprawy było opracowanie, zbadanie oraz wdrożenie systemu do zarządzania przepływem energii pomiędzy zróznicowanymi technologicznie zasobnikami energii, w formie tzw. rutera DC. W celu pozyskania rzeczywistych danych wejściowych parametrów fizycznych do dalszej analizy teoretycznej Autor przeprowadził odpowiednie pomiary bilansu energetycznego w skali roku dla rzeczywistych obiektów mieszkalnych bez i z dodatkową instalacją fotowoltaiczną. Biorąc pod uwagę ilość dostępnych parametrów, jak również możliwości stosowania w układach do zarządzania energią z OZE Autor w analizie teoretycznej zdecydował o wykorzystaniu algorytmów logiki rozmytej. Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły przydatność zaproponowanego rozwiązania umożliwiającego jak najlepsze wykorzystanie energii z OZE oraz uniezależnienie się w dużym stopniu od sieci w okresie całego roku.

2.4 Oryginalny dorobek Autora rozprawy

Rozprawa jest wynikiem kilkuletniej pracy Autora w tym zarówno rozważań koncepcyjnych, badań eksperymentalnych jak i teoretycznych analiz symulacyjnych na podstawie których zostały opracowane założenia projektowe i wytyczne do opracowania systemu do zarządzania przepływem energii w formie tzw. rutera DC. Uzyskanie obiecujących wyników jest niewątpliwie oryginalnym dorobkiem Autora rozprawy. Za najważniejsze osiągnięcia można uznać:

- opracowanie procedury pomiarowej oraz przeprowadzenie badań bilansu energetycznego w okresie rocznym dla 3-obiektów mieszkalnych w celu wyznaczenia stopnia autokonsumpcji i niezależności energetycznej,
- opracowanie modelu symulacyjnego hybrydowego magazynu energii wraz z implementacją komponentów OZE (PV, turbina wiatrowa, baterie litowe) i ich integracją

-dobór konfiguracji rutera DC wraz z analizą metod sterowania opartych na algorytmach logiki rozmytej,

-opracowanie regulatora logiki rozmytej w środowisku MATLAB zintegrowanego następnie w ramach całego modelu symulacyjnego w środowisku SIMULINK wraz z przeprowadzeniem testów funkcjonalnych modelu rutera energii.

Trudno jest Recenzentowi ocenić dorobek publikacyjny Autora na podstawie skromnych 4-ech pozycji literaturowych zamieszczonych w Bibliografii rozprawy. W niczym nie umniejsza to jednak ,w moim odczuciu, wartości rozprawy doktorskiej oraz osiągnięć Autora.

2.5.Ocena poziomu naukowego rozprawy oraz uwagi dyskusyjne

Podjęcie próby praktycznego zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej w systemie z hybrydowymi zasobnikami energii poprzez wykorzystanie dodatkowej stałoprądowej instalacji stanowiącej tzw Ruter DC wymagało od Autora zarówno dobrego przygotowania technicznego, doświadczenia jak i odpowiedniej wiedzy teoretycznej. Podczas realizacji pracy Autor wykazał się wystarczającą znajomością literatury przedmiotu, umiejętnością logicznego formułowania i rozwiązywania zadań badawczych, korzystania z niezbędnych programów komputerowych oraz organizowania i przeprowadzania badań eksperymentalnych tak w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistych,. Stwierdzam zadowolający poziom naukowy recenzowanej rozprawy ze szczególnym podkreśleniem jej aspektu praktycznego z przewidywanym docelowym wdrożeniem wyników do realizacji regulatora przepływu energii w ramach Platformy Zarządzania Energią.

2.6. Ocena doboru literatury

Wykaz literatury zawiera 111 pozycji publikowanych oraz stron internetowych dotyczących analizowanego problemu. Dobór i wykorzystanie źródeł jest prawidłowe, świadcząc zarazem o dobrej znajomości przedmiotu Autora w tym zakresie. Recenzowana praca doktorska porządkuje i poszerza aktualny stan wiedzy oraz wskazuje kierunki dalszych działań mających na celu zwiększenie niezależności od sieci elektroenergetycznej. W efekcie w skali kraju może to skutkować realnym zwiększeniem udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej.

2.7. Ocena układu pracy i jej strony edytorskiej

Wprawdzie struktura i układ pracy w zasadzie nie odbiegają od powszechnie przyjętych w rozprawach doktorskich jednak ocena strony edytorskiej jest daleka do zadowalających. Praca robi wrażenie zredagowanej delikatnie mówiąc " nonszalancko". Słownictwo używane często jest potoczne/slangowe. Na przykład::

-współczynnik idealności diody (str7)

-świeża technologia (str22)

-wpięto monitor (str37)

-zrealizowane zostały poprzez monitor,(str44)

-wartości RMS (str48,49)

-promień czastkowy (str73)

-pik prądowy (np. str76)

-Rys85 ...układu w trakcie napięcia

-Rys 97 prądu produkcji

-stanowiąc wynik sumę? (str62)

-silnie oddziaływanie również ? (str80)

We wstępie brak jest zakresu pracy. Szkoda, że na początku nie podano definicji „stopień autokompensacji i niezależności energetycznej”. W tekście wielokrotnie powołuje się na te wielkości w różnym kontekście.

Ogólnie kolory na rysunkach nie wyróżniają się, a podpisy są zbyt małe (np. Rys 48 i dalsze). Podpisy pod rysunkami też są niejasne np. Rys45: jest współczynnika mocy fazowej...?, dalej kolorami oznaczono kąty przesunięcia fazowego...? na koniec akapitu wyjaśnia się, że jest to tangens?

Rys 46... fazy L2 według wybranego pomieszczenia?

W pracy zazwyczaj najpierw podaje się wnioski szczegółowe a na końcu podsumowanie a nie odwrotnie.

Bibliografia jest napisana dowolnie : tzn albo są strony ,albo nie, albo małe litery albo duże (np.[42])-dowolnie?

Szkoda, że tak mało zwrócono uwagi na stronę edytorską pracy, bo to robi złe wrażenie i może wpłynąć na jej ocenę końcową.

Pragnę w tym miejscu jednak podkreślić , że moja krytyczna ocena strony edytorskiej nie umniejsza wartości naukowej recenzowanej rozprawy.

3.Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska pt: *Hybrydowe magazyny energii-Analiza możliwości zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej* oparta o własną koncepcję rozwiązania, wyniki własnych rozważań, analizy teoretycznej i badań eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu**

badawczego (ze znacznym aspektem praktycznym) z dyscypliny automatyka,elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Zaprezentowane wyniki analizy oraz badań eksperymentalnych poszerzają wiedzę w ww zakresie a ponadto świadczą o przyzwoitym doświadczeniu zawodowym popartym odpowiednią wiedzą teoretyczną. Uwzględniając duże znaczenie podjętych badań, ich nowatorski charakter, kompleksowość, wartości poznawcze, zwłaszcza aplikacyjne pracy oraz wystarczającą znajomość przez doktoranta podjętej problematyki badawczej, umiejętność pozyskiwania oraz wykorzystania zdobytych informacji i prawidłowego wyciągania wniosków stwierdzam, że rozprawa doktorska pt:” *Hybrydowe magazyny energii-Analiza możliwości zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej*” **w pełni spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim** (Przepisy Ustawy z 20.07,2018 Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce(Dz. U. z 2022 poz.574 z późniejszymi zmianami).