

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Roberta Raczkowskiego

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej
Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 02.07.2021 r.

Tytuł rozprawy

**„Zwiększenie udziału generacji wiatrowej w systemie elektroenergetycznym
poprzez optymalizację pracy systemu magazynowania energii”**

1. Wybór tematu rozprawy

Zarówno temat pracy, jak również sformułowany przez mgr inż. Roberta Raczkowskiego jej cel oraz teza nie budzą wątpliwości zarówno co do praktycznego zastosowania, jak też w zakresie naukowego charakteru postawionego problemu. Rozwój generacji wiatrowej w Polsce powstrzymany ustawą określaną jako „ustawa 10H” w 2016 r. spowodował zahamowanie rozwoju tej gałęzi OZE. Moc zainstalowana przez szereg lat utrzymywała się na poziomie 5900 MW, po ostatnich aukcjach przekroczyła 6500 MW, w planach dokumentu PEP 2040 szacowana jest na 9500 MW. Zarówno branża wiatrakowa jak i niezależne firmy consultingowe szacujące możliwości jej rozwoju określają tę wielkość na 2 lub nawet 3 razy więcej w perspektywie 2040 roku. Mowa oczywiście tylko o segmencie lądowym tej generacji, albowiem morska energetyka wiatrowa cieszy się wielkim poparciem władz, przynajmniej w zakresie deklaracji. Ostatnie zapewnienia Ministerstwa Rozwoju i Technologii pozwalają na optymizm w zakresie znacznej liberalizacji przepisów 10H, co spowoduje zauważalny wzrost mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej na lądzie. Niezależnie od tego czy będzie to wielkość 9000 MW czy 18 000 MW należy rozpatrywać możliwości systemowe akceptacji takich przyłączeń.

Drugi aspekt tematyki rozprawy to magazynowanie energii. W Polsce powstały i dalej powstają bateryjne magazyny energii o mocach jednostkowych od kilku do kilkudziesięciu megawatów i pojemności odpowiadającej od 1 do 4 godzin (w przeliczeniu na moc znamionową). Ich funkcja i lokalizacja bywają czasami bardziej wynikiem determinacji i skuteczności działań menagerów sektora niż oceną faktycznych potrzeb systemu, ale i tak stanowią one ważny element szerszego wprowadzania technologii magazynowania energii do praktyki elektroenergetycznej. Wsparta medialnie teza o możliwości szybkiej dekarbonizacji energetyki dzięki zastosowaniu energetyki odnawialnej wspartej magazynowaniem energii jest powszechnie znana i akceptowana przez społeczeństwo.

Dlatego też wybór tematyki pracy mgr inż. Roberta Raczkowskiego obejmujący problematykę zastosowania magazynowania energii w znoszeniu utrudnień związanych z energetyką wiatrową należy uznać jako niezwykle udany, aktualny i ważny dla problematyki elektroenergetycznej kraju.

Postać tezy przedstawionej na stronie 19 rozprawy jest dość zawiła i niezbyt zręczna. Można jednak bez problemu zgodzić się z jej myślą przewodnią: dzięki optymalnemu doborowi wielkości, lokalizacji i trybu pracy magazynów energii możliwe jest zniesienie niektórych trudności (ograniczeń) związanych z rozwojem energetyki wiatrowej w Polsce. Rozwiązanie tego problemu poprzez odpowiedni algorytm analizy i działań inwestycyjnych to ambitny problem badawczy i inżynierski, który z pewnością może być celem rozprawy doktorskiej.

Można dyskutować jak powyższy problem ma być postawiony – moim zdaniem rozwój energetyki wiatrowej jest przesądzony, o ile deklaracje o woli dekarbonizacji kraju są poważne i prawdziwe. Jak poradzić sobie z tym rozwojem w sensie pracy systemu elektroenergetycznego to zadanie operatorów sieci, natomiast algorytm przedstawiony przez Doktoranta jest w tej kwestii ważnym narzędziem.

2. Zawartość rozprawy oraz jej ogólna ocena

Opiniowana rozprawa zawiera 140 stron tekstu wraz z ilustracjami i wzorami (od strony 128 opis modelu) oraz spisem literatury obejmującym 128 pozycji.

Pozycje literatury zostały zestawione prawidłowo, co więcej są one Autorowi znane, ponieważ cytuje je obszernie i w odpowiednich miejscach rozprawy.

Praca jest napisana w sposób staranny, prostym technicznym językiem, stosunkowo łatwym do zrozumienia, o ile ma się pod ręką wcześniej wydrukowany wykaz symboli, akronimów i fachowych skrótów, których Doktorant często i obficie używa.

W rozdziale 2 Autor omawia typy magazynów energii (SMEE) i określa skupienie się w pracy na magazynach bateryjnych. Rozdziały 3 oraz 4 poświęcone są budowie modelu systemu, dla którego mają zostać przeprowadzone zasadnicze obliczenia optymalizacyjne. Rozdział 3 (formalnie poświęcony budowie modelu) zawiera bardzo profesjonalną analizę sektora wytwórczego KSE, ze szczególnym uwzględnieniem relacji pomiędzy mocą generowaną energetyki wiatrowej oraz pracą jednostek JWCD. Autor podaje dane liczbowe potwierdzające obserwację, że generacja JWCD musi istotnie wspierać zmiany mocy generowanej w LFW, aby zachować równowagę bilansową KSE. Zestawienia, wykresy i tabele choć bazują na danych statystyki energetycznej zredagowane są w sposób oryginalny i interesujący. W rozdziale 4 Doktorant dokonał swoistej ekwilibrystyki bowiem jako model sieci przyjął liczący 118 węzłów model sieci IEEE. Tym samym nie odwzorował sieci krajowej, a oryginalną sieć IEEE 118 dodatkowo modyfikował. Można zrozumieć motywy takiego postępowania, jest ich kilka, ale to po stronie Autora powinno leżeć wytłumaczenie jego genezy. Pierwsze trzy rozdziały zapowiadały bowiem, że praca będzie swoistym studium pracy KSE. Warto w tym miejscu wspomnieć rozprawę o podobnej tematyce, w której zastosowano jednak uproszczone modele KSE (habilitacja Romana Koraba, doktorat Agaty Koczorowskiej). Do tak wybranego modelu sieciowego Autor „podpina” dane węzłowe KSE, tu także można zrozumieć Jego intencję, ale w interesie Autora byłoby szersze wytłumaczenie takiego postępowania, aby niezyczliwy i niekompetentny adwersarz (w odróżnieniu od recenzenta) nie określił tych działań jako „pomieszanie z poplątaniem”.

Podstawowe badania symulacyjne opisano w rozdziale 5 (strona 58). Zasadniczym elementem jest tu rozwiązanie zadania optymalizacyjnego SCOPF, dla którego funkcję celu określa się jako sumę operacyjnych kosztów zmiennych pracy SEE. Trudność rozwiązania zadania polega na konieczności spełnienia (dla każdej godziny) złożonego zestawu ograniczeń równościowych i nierównościowych, bo jak wiadomo system elektroenergetyczny musi się cały czas bilansować - to jego zasadnicza cecha. Poza tym przejścia od godziny do godziny, które dla jednostek OZE mogą być

bardzo dynamiczne, muszą być równoważone zdolnościami generacyjnymi jednostek JWCD. Do tego dochodzą ograniczenia obciążeniowe linii elektroenergetycznych (inne dla zimy inne dla lata). To zadanie optymalizacyjne Doktorant rozwiązywał za pomocą programu o nazwie PLEXOS będącego zaawansowanym produktem informatycznym amerykańskiej firmy Energy Exemplar. Jest to bardzo rozbudowane i złożone narzędzie, które jak się wydaje Doktorant perfekcyjnie opanował. Przyjął jednak błędne założenie, że wszyscy czytelnicy rozprawy zaliczają się grona użytkowników tego programu. Obliczenia zostały wykonane dla dwóch zasadniczych wariantów – bez uwzględniania sieci (miedziana płyta) i przy jej uwzględnianiu. W wyniku obliczeń wyznaczono wartości mocy i energii, które wystąpią jako nadpodaż (nadwyżki z OZE) jak też jako brak możliwości zbilansowania. Autor porównuje wyniki uzyskane dla wariantu sieciowego i miedzianej płyty. Niestety bez wyjaśnienia pozostawia fakt, że sumaryczna energia nadpodaży jest dla modelu sieciowego 300 razy większa, czego recenzent nie jest sobie w stanie wytłumaczyć. Rozdział 5 zawiera ponadto rozważania dotyczące cen energii elektrycznej i jej zmian w kierunku cen ujemnych z uwagi na rozwój OZE.

Rozdział 6 to kluczowy rozdział rozprawy, w którym Doktorant uzupełnia analizy przeprowadzone w rozdziale 5 doбором bateryjnych magazynów energii, tak aby zniwelować wszystkie wykazane uprzednio okresy nadpodaży i deficytu mocy. Zastosowany i opisany algorytm doboru mocy, lokalizacji i profilu pracy magazynu jest największym osiągnięciem Autora. W rezultacie uzyskane wyniki – moc SMEE w 2030 roku wynosząca 1025 MW oraz pojemność 2825 MWh oraz 16 955 MW i 47 785 MWh (odpowiednio dla modelu miedzianej płyty i modelu sieciowego) pozwalają na potwierdzenie tezy o istotności magazynowania energii w celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego (tu także Autor zbyt szybko przechodzi do porządku dziennego wobec tak kolosalnego wpływu uwarunkowań sieciowych).

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił analizę wpływu pracy SMEE na system elektroenergetyczny. Uzyskane średnioroczne profile pracy SMEE są zgodne z oczekiwaniami (ładowanie w nocy, rozładowanie w ciągu dnia). Autor porusza kwestie ekonomiki pracy SMEE wynikające z dobowej zmienności cen energii elektrycznej. Także fakt pracy w systemie SMEE wpływa na kształtowanie się tych cen (likwidacja cen ujemnych). Nie pojawia się natomiast myśl, aby za samą obecność i oferowany tryb pracy SMEE uzyskiwał dodatkowe przychody (od OSP, a może od właścicieli LFW i

MFW, bo dzięki niemu nie mają ograniczeń ani cen ujemnych). Analizie ekonomicznej poświęcona jest dalsza część rozdziału 7. Tak jak to zwykle bywa, na sprawy finansowe można zawsze patrzeć w różny sposób. Autor robi to profesjonalnie, ale dość zachowawczo, nie wprowadzając innowacyjnych założeń o szczególnych premiach i subsydiach dla SMEE, które mogłyby bardzo silnie pobudzić rozwój tej gałęzi energetyki, tak jak kiedyś zainicjowały dynamiczny rozwój OZE, które teraz coraz częściej radzą sobie bez takiego wsparcia. Rozdział 8 zawiera podsumowanie uzyskanych wyników, jest ich sporo, podzielone są na kilka działów. Zdaniem recenzenta bardziej wartościowe są wnioski w sensie jakościowym bowiem wnioski ilościowe odnoszące się do KSE są zapewne istotnie wrażliwe na takie dane jak struktura generacji KSE w 2030 roku, czy wreszcie poziom zapotrzebowania (195 TWh czy 230 TWh – obie wartości pochodzą z ważnych dokumentów prognostycznych). Bardzo istotnym elementem rozdziału 8 jest zestawienie osiągnięć własnych. Tutaj autor jest zbyt skromny, nie wybija na pierwsze miejsce najważniejszego osiągnięcia, którym jest (punkt 5) opracowanie algorytmu doboru i lokalizacji SMEE. Zdaniem recenzenta osiągnięcie Doktoranta, że „coś policzył” ma niższą rangę niż udowodnienie czegoś, wykrycie pewnych prawidłowości lub opracowanie metody obliczeniowej. Takie osiągnięcia też w pracy oczywiście występują.

Ponieważ Autor wykonał duże zadanie badawcze, opis tego zadania wymagał bez wątplenia umiejętności redagowania rozpraw naukowych i raportów. Tę umiejętność Autor opanował w bardzo dobrym stopniu, a forma edycyjna pracy, jakość rysunków, ich kolorystyka, symbolika i oznaczenia są na wysokim poziomie.

Podsumowując, ogólna ocena interesującej i potrzebnej (w sensie potrzeb sektora elektroenergetycznego) rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Raczkowskiego, jest w pozytywna.

3. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Oceniając bardzo pozytywnie przedmiot rozprawy i uzyskane wyniki, pragnę także zwrócić uwagę na pewne kwestie dyskusyjne.

W sensie merytorycznym moje wątpliwości (i prośbę o komentarz Autora) będą wymienione niżej elementy pracy (przedstawiam je częściowo także w formie pytań).

1. Dane zawarte w pracy w zakresie statystyki energetycznej wydają się być nieco opóźnione (np. rys.3.2). W sektorze OZE dzieje się tak wiele (szczególnie w fotowoltaice), że dla niektórych pozycji odpowiedni byłby koniec roku 2020. Specyfika pracy nad rozprawą doktorską to okres z pewnością co najmniej dwuletni, ale czasami możliwe jest już pod koniec prac uaktualnienie danych przyjmowanych wcześniej, czy Autor rozważał takie rozwiązanie?
2. W punkcie 3.1.3 Autor pisze o danych PV „dedykowanych dla obszaru Polski” pobranych z literatury [40]. Polska jest bardzo rozległym obszarem i proste przypisanie przebiegu generacji PV wydaje się trudne; celowe byłoby wyjaśnienie w tym kontekście terminu „dedykowane”.
3. Recenzent ma problem z wynikami zawartymi w Tab.5.2 oraz na rys.5.5. Dotyczą one energii E_{DUM} (nadpodaż z OZE) dla roku 2030. W tabeli 5.2 podano wartość 5,39 GWh. To bardzo mała wartość- z pewnością Politechnika Warszawska zużywa rocznie około 20 GWh. Patrząc na rys. 5.5 b – kolejne „piki” mocy nadpodaży wynoszące np. 3000 – 4000 MW i trwające jedną godzinę oznaczają energię 3-4 GWh, a jest ich sporo. Może zatem chodzi o trywialny błąd w doborze jednostek energii – chodziłoby zatem o 5,39 TWh?
4. Doktorant nie komentuje w rozprawie wyniku 16 000 MW SMEE (zbudowanych w ciągu 6 lat), to przecież jest ogromna wartość, jakie są szanse na takie inwestycje, bez nadzwyczajnej stymulacji, jaki mogłaby mieć ona charakter?
5. Gdyby powyższe uwagi były słuszne to wtedy porównanie modelu miedzianej płyty i modelu sieciowego (5,39 TWh versus 1660 GWh = 1,66 TWh) wskazywałoby na różnicę 3,76 TWh, czyli 1,7% zużytą na straty sieciowe. Gdyby jednak tak nie było to recenzent ponawia pytanie o przyczynę i interpretację tak wielkiej różnicy między wynikami dla obydwu rozważanych modeli.
6. W tabelach 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 występują wielkości fizyczne – moc i energia, a nie „wskaźniki”, powinny mieć podane jednostki.
7. W tabelach 6.4 i 6.5 moce SMEE przypisane poszczególnym węzłom mogłyby zostać podsumowane.
8. W tabeli 7.1 energia powinna być wyrażona w GWh.

9. Generalnie jako podstawę do analiz Autor przyjął dane z PEP2040 dla roku 2030, czyli FPV 7270 MW, LFM 9601 MW, MFW 3815 MW (swoją drogą pewnością planistów z ARE co do pojedynczych magawatów w prognozach jest godna podziwu). Ale powszechnie znane są uwagi co do tych prognoz, w szczególności co do zaniżenia fotowoltaiki, która już w 2021 może przebić granicę 6000 MW. Czy Autor rozważał wykorzystanie innych prognoz (McKiney, Instart, Forum Energii)?
10. Wyzwaniem jest rok 2040 przy założeniu energii elektrycznej pochodzącej z węgla na poziomie nawet poniżej 20% (mówi się o 11%), blokach jądrowych i co najmniej podwojeniu mocy z OZE w stosunku do wskazanych wyżej. W takim przypadku moce wymagane dla SMEE wzrosną drastycznie, wystarczalność magazynowania bateryjnego będzie wysoce wątpliwa. Jakie są poglądy Autora rozprawy odnośnie perspektywy pracy KSE dla tych dalszych lat?

4. Uwagi końcowe, podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (art.187) wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. To wymaganie opiniowana rozprawa bez wątplenia spełnia, a sposób rozwiązania problemu przedstawiony w pracy jest obiecujący i dający możliwość praktycznego wykorzystania. Ustawa formułuje pod adresem doktoranta oczekiwanie, aby wykazał się on wiedzą w danej dyscyplinie, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością przedstawienia jej wyników. Te wszystkie cechy i umiejętności mgr inż. Robert Raczkowski niewątpliwie posiada, co udowodnił w rozprawie i w wykonanych w ramach tej rozprawy obliczeniach komputerowych. Jego wiedza teoretyczna w dyscyplinie elektrotechnika (nazwa ustawowa automatyka, elektronika i elektrotechnika) została przekonująco udowodniona, a przedstawione przez recenzenta uwagi mają charakter dyskusji naukowej i nie obniżają wysokiej oceny rozprawy.

Lista istotnych wniosków i osiągnięć rozprawy, które powinny być uznane za jej i Doktoranta oryginalny dorobek zawiera elementy wymienione na stronach 116.

Recenzent pragnie podkreślić, że Doktorant od początku do końca pracy konsekwentnie realizuje jej cel, „panuje” nad jej tekstem, pomimo drobnych potknięć w jasny i zrozumiały sposób pokazuje wszystkie istotne elementy pracy: genezę, tezę,

zakres, przegląd wiedzy istniejącej, sformułowania problemu, rozwiązanie problemu, testy, podsumowanie i literaturę.

Biorąc przedstawioną wyżej ocenę pod uwagę recenzent stwierdza, że opiniowana rozprawa mgr inż. Roberta Raczkowskiego odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa o Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r.) i wnosi o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink, which reads "Piotr Kąkol".