

Częstochowa, dn. 07.08.2020 r.

Dr hab. inż. Janusz Sowiński, profesor uczelni

Katedra Elektroenergetyki
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska
Al. Armii Krajowej 17
42-200 Częstochowa
Tel. 34 - 32 50 887, kom: 726 660 119
e-mail: jansow@el.pcz.czest.pl

Adres prywatny:

Ul. Kilińskiego 148 m.2
42-218 Częstochowa
Tel. 34 – 36 32 643, kom: 693 610 559

**Recenzja rozprawy doktorskiej
w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika
Pana mgra inż. Jarosława Bogacza**

*Optymalizacja podaży wybranych usług regulacyjnych krajowego systemu
elektroenergetycznego w kontekście rozwoju źródeł odnawialnych*

Promotor: Dr hab. inż. Maksymilian Przygodzki, prof. PŚ

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej, wykonanej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach pod kierunkiem dra hab. inż. Maksymiliana Przygodzkiego, prof. PŚ, jest pismo o symbolu nr sprawy L.dz. RD/AEE/59/2020, w którym Przewodnicząca Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej Dr hab. inż. Monika Kwoka, prof. PŚ informuje o powołaniu mnie na posiedzeniu Rady w dniu 19 maja 2020 r. na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Jarosława Bogacza w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Optymalizacja podaży wybranych usług regulacyjnych krajowego systemu elektroenergetycznego w kontekście rozwoju źródeł odnawialnych.*

2. Zagadnienie naukowe i jego sformułowanie

Ogólna charakterystyka rozprawy

Podstawowe zagadnienia rozprawy wpisują się w dziedzinę nauk technicznych, w **dyscyplinę elektrotechnika (obecna nazwa dyscypliny: Automatyka, elektronika i elektrotechnika)** i dotyczą elektroenergetyki w zakresie sterowania pracą systemu elektroenergetycznego.

Rozprawa doktorska w formie maszynopisu obejmuje 107 stron tekstu merytorycznego (w tym 3 strony *Oznaczenia i skróty*, 2 strony *Spisu treści*, 7 stron *Literatury* oraz 2 stron

Streszczenia), 24 stron Załącznika 1, 10 stron Załącznika 2, 33 stron Załącznika 3. Literatura obejmuje 126 pozycji.

Treść merytoryczna obejmuje 6 rozdziałów oraz nienumerowany rozdział: *Literatura*.

Charakterystyka zagadnienia naukowego

Operatorzy systemów przesyłowych świadczą usługi systemowe niezbędne do zapewnienia prawidłowego funkcjonowania krajowych systemów elektroenergetycznych, sterując jak również kontrolując wytwarzanie, rezerwę techniczną oraz niezbędne pomiary istotne dla procesu regulacji. W skład współzależnych procesów usług regulacji systemowych wchodzi: regulacja pierwotna, regulacja wtórna, regulacja trójna i regulacja czasu. W wyniku działania regulacji pierwotnej jest utrzymana równowaga między mocą wytwarzaną i aktualnym zapotrzebowaniem oraz częstotliwość w dopuszczalnych granicach. Zadaniem regulacji wtórnej jest przywrócenie częstotliwości w systemie i mocy wymiany międzysystemowej do wartości zadanych. Przy wyborze zespołów, które mają pracować w rezerwie wtórnej dąży się do równomiernego rozmieszczenia mocy w systemie. Zadaniem regulacji trójnej jest gwarantowanie istnienia rezerw wirujących pracujących w regulacji wtórnej, odbudowa dostępnego pasma regulacji wtórnej, oraz uzyskiwanie jak najbardziej korzystnych rozdziałów mocy pracujących w regulacji wtórnej zarówno, jeżeli chodzi o rozkład przestrzenny mocy regulacyjnej w systemie, jak i minimalizację kosztów pozyskania rezerw mocy przez operatora systemu. Dysertacja dotyczy powyższych aspektów systemowych usług regulacji.

Po stronie wytwórczej systemu rezerwy regulacji trójnej są tworzone przez zespoły, które mogą dostarczyć moc regulacyjną w czasie do 15 minut od pojawienia się takiej potrzeby. W praktyce oznacza to najczęściej załączenie lub odstawienie zespołu. Rezerw odpowiednich do pełnienia roli regulacji trójnej poszukuje się wśród zespołów w elektrowniach wodnych (w szczególności w elektrowniach pompowych) oraz w elektrowniach gazowych z turbinami gazowymi o krótkich czasach rozruchu.

Regulacja trójna, której podstawowym zadaniem jest odbudowywanie rezerw mocy dostępnych w regulacji wtórnej, jest obecnie realizowana w systemie poprzez zmianę punktów pracy zespołów wytwórczych oraz rozruchy lub odstawienia zespołów o krótkim czasie rozruchu. Odbudowanie rezerw można uzyskać także na skutek interwencyjnej zmiany mocy odbiorów w systemie. Dostęp do mocy regulacyjnej w tym zakresie realizowany jest najczęściej poprzez przesyłanie poleceń z centrów dyspozycyjnych systemu do wybranych odbiorców świadczących usługę.

Mechanizm pozyskania usług regulacyjnych w krajowym systemie elektroenergetycznym polegał na kosztowej wycenie usług i wykorzystaniu zdolności regulacyjnych po stronie wytwórczej w systemie. Rosnący udział w systemie źródeł niespokojnych, głównie rozproszonych opartych na odnawialnych źródłach energii powoduje, że zapotrzebowanie na moce regulacyjne rośnie. Zwiększone zapotrzebowanie na usługi regulacyjne zmusza do tworzenia zachęt dla inwestycji w nowe moce regulacyjno-interwencyjne i modyfikowania zasad pozyskiwania regulacyjnych usług systemowych.

Rozwój OZE (elektrownie wiatrowe i instalacje fotowoltaiczne) znamionuje rewolucję energetyczną. Zmiany mixu energetycznego, a co za tym idzie struktury elektroenergetyki w sferze wytwarzania, wymuszają szereg inwestycji, szczególnie w sieć przesyłową i dystrybucyjną. Zwiększający się udział OZE wpływa na funkcjonowanie całego systemu elektroenergetycznego i jest źródłem wielu wyzwań, szczególnie w sferze zapewnienia odpowiedniej rezerwy w systemie, a dla operatorów w tworzeniu nowych narzędzi na rynku usług regulacyjnych.

Powyższe przesłanki wskazują na spore wyzwania stojące przed decydentami, którzy oczekują od naukowców nowoczesnych narzędzi analizy na systemowym rynku usług regulacyjnych. Właściwie zbudowany rynek usług regulacyjnych niewątpliwie wpływa na bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej do odbiorców.

O istotności i aktualności rozwiązywanego w dysertacji zagadnienia naukowego świadczą działania na poziomie europejskim. Komisja Europejska podejmuje działania w celu ujednoczenia produktów funkcjonujących na rynkach oraz do zbudowania dedykowanych platform wymiany usług systemowych. W systemach z dużym udziałem źródeł wytwórczych niesterowalnych wzrasta rola systemowej usługi regulacji trójnej oraz pojawiają się produkty zakupu określonych wartości gradientu zmian mocy.

Podjęte w rozprawie zagadnienie optymalizacji łącznej dostawy energii elektrycznej i usług regulacji trójnej przy spełnieniu wymogów zapewnienia gradientu zmian mocy powoduje, że poszukiwanie rozwiązania optymalnego wymaga specyficznych metod (metody rozwiązania zadania OPF sięgają połowy ubiegłego wieku, stale są rozwijane) i wymaga doboru odpowiednich narzędzi obliczeniowych. Wyzwaniem naukowym jest również złożona struktura układów sieciowych (duża liczba elementów), co powoduje, że zagadnienie trudno rozwiązać tradycyjnymi metodami optymalizacji (mającymi spore ograniczenia obliczeniowe).

Autor inspirowany przez Promotora podjął bardzo aktualne i istotne zagadnienie naukowe, rozwiązanie którego może być wykorzystane w pracach nad doskonaleniem rynku regulacyjnych usług systemowych w Polsce i na świecie.

Tytuł rozprawy

Doceniając znaczenie i aktualność podjętych badań nie sposób odnieść się do tytułu rozprawy. **Generalnie tytuł rozprawy oddaje treści w niej prezentowane.** Zamierzeniem Autora jest opracowanie nowatorskiej metody analizy wystarczalności usług regulacyjnych w sytuacji zmieniającej się z jednej strony struktury w sferze wytwarzania energii elektrycznej (rozwój źródeł odnawialnych) i z drugiej strony pojawianiu się nowych rodzajów zasobów świadczących nowe rodzaje usług regulacyjnych (zwiększenie podaży usług regulacyjnych). W przykładzie oceny wystarczalności metodą pośrednią Autor skupia się na podaży usług regulacji trójnej, co w pewnej mierze tłumaczy użycie w tytule sformułowania „podaż wybranych usług regulacyjnych”. Natomiast w procesie optymalizacji dokonywana jest optymalizacja łączna ekonomicznego rozdziału obciążeń i minimalizacji kosztów zapewnienia rezerwy mocy, co nie znalazło odzwierciedlenia w tytule. Ocena wystarczalności podaży usług regulacji trójnej została przeprowadzona dla krajowego systemu elektroenergetycznego (dane z 2015 roku jako scenariusz bazowy i cztery scenariusze z różną strukturą OZE). Natomiast przykład obliczeniowy optymalizacji łącznej dostaw energii elektrycznej i usług regulacji trójnej wykonano dla modelowego fragmentu systemu elektroenergetycznego (27 węzłów, struktura zapotrzebowania na energię elektryczną równa 1/8 obciążenia netto KSE w 2018 roku), a nie dla całego krajowego systemu elektroenergetycznego, co sugerowałby tytuł rozprawy. Mając jednak na uwadze przedstawione w dysertacji badania na modelu odwzorowującym sytuację KSE można uznać sformułowanie tytułu rozprawy za uzasadnione.

3. Teza rozprawy i jej udowodnienie

Cel pracy

Sformułowaniu celu pracy i tezy poświęcono rozdz. 2 *Problematyka badawcza*. W podrozdziale 2.1 Autor przedstawia cel pracy, którym jest (cytuje): „...*optymalizacja podaży usług regulacji trójnej w krajowym SE (lub zbliżonym do KSE) oraz wystarczalności zasobów wytwórczych do zapewnienia wymaganego gradientu zmian mocy w SE dla różnych scenariuszy rozwoju odnawialnych źródeł energii.*” Proponowana analiza pomija wystarczalność podaży regulacji pierwotnej i wtórnej. Zagadnienie nie jest więc rozwiązywane kompleksowo, ale takie podejście można uznać za zasadne, gdyż doświadczenia na innych rynkach energii o dużym udziale źródeł odnawialnych niesterowalnych wskazują na regulację trójną jako kluczowy problem.

Teza rozprawy i jej udowodnienie

Teza rozprawy brzmi (cytuje):

„Zastosowanie metod oceny wystarczalności i przeprowadzenie optymalizacji podaży wybranych usług systemowych, w świetle zwiększania udziału niesterowalnych źródeł odnawialnych w pokryciu zapotrzebowania na energię elektryczną, pozwoli na poprawę bezpieczeństwa dostaw energii i efektywności zarządzania usługami systemowymi oraz na minimalizację łącznego kosztu energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom w KSE.”

Teza rozprawy zawiera pewne elementy dyskusyjne. Teza sugeruje, że przeprowadzenie optymalizacji podaży wybranych usług systemowych spowoduje minimalizację łącznego kosztu energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom, ale w dysertacji realizowana jest optymalizacja łączna energii elektrycznej oraz usług systemowych w horyzoncie długoterminowym i takie postawienie problemu rzeczywiście prowadzi do rozwiązania z minimalizacją łącznego kosztu energii elektrycznej. Wydaje się więc, że w tezie można było wprowadzić pojęcie ko-optymalizacji lub optymalizacji łącznej.

Autor przeprowadził analizę stosowanych rozwiązań w zakresie regulacyjnych usług systemowych w kraju i w wybranych, wysokorozwiniętych gospodarczo krajach. Przeanalizował zmiany w strukturze wytwarzania energii elektrycznej, zarówno trendy światowe, jak i krajowe. Wzrost mocy źródeł niesterowalnych w strukturze wytwarzania wymusza stosowanie nowych typów i źródeł usług regulacyjnych, np. magazyny energii, sterowanie stroną popytową (DSM) itp. Autor dokonał formalizacji zapisu metod oceny wystarczalności usług regulacyjnych, a następnie wykorzystując metodę pośrednią przedstawił przykład oceny wystarczalności podaży usług regulacji trójnej. W analizie porównawczej wykazał, że różny poziom udziału źródeł niesterowalnych w mocy zainstalowanej w systemie wpływa na poziom dostępnych zasobów regulacyjnych oraz narzędzi stosowanych do zapewnienia odpowiedniej struktury usług regulacyjnych, skupiając się na usłudze regulacji trójnej oraz na wymaganych wartościach gradientu zmian mocy zasobów wytwórczych w systemie elektroenergetycznym. Sformułował wniosek, że podaż usług regulacji trójnej świadczona jest w dużym stopniu przez zasoby pokrywające zapotrzebowanie na energię elektryczną, co wymusza łączną optymalizację (ko-optymalizację) dostaw energii elektrycznej i systemowych usług regulacyjnych. Następnie badając efektywność podaży usług regulacji trójnej Autor zdefiniował funkcję celu (36) i ograniczenia dla ko-optymalizacji. Realizacja procesu ko-optymalizacji wymagała zapoznania się i przetestowania możliwych do wykorzystania narzędzi informatycznych, wyboru oprogramowania i budowy odpowiednich modeli obliczeniowych z ich weryfikacją. Na tej podstawie Autor przeprowadził obliczenia komputerowe wykorzystując program MOST

w środowisku Matpower. Analiza wyników ko-optimalizacji kosztów dostaw energii elektrycznej i usług regulacyjnych dla modelowego systemu elektroenergetycznego dla trzech scenariuszy potwierdza zawarte w tezie sformułowania.

Recenzent analizując przedstawione rezultaty wariantowych obliczeń uznaje, że teza została wykazana.

Ogólnie można stwierdzić, że założony cel pracy został zrealizowany, a przedstawione rezultaty analiz i obliczeń wskazują, że teza pracy została udowodniona.

4. Przegląd stanu wiedzy, charakterystyka doboru i wykorzystania źródeł

Literatura obejmuje 126 pozycji. 79 pozycji literaturowych to angielskojęzyczne teksty.

Z ostatnich pięciu lat (od 2015 roku) w spisie *Literatury* znajdują się 76 pozycje, więc udział aktualnych pozycji jest znaczący.

Autor w rozdz. 1 *Analiza istniejących rozwiązań w zakresie regulacyjnych usług systemowych* szczegółowo omawia ich stan na terenie poszczególnych krajów europejskich i USA (kraje o różnym udziale niesterowalnych źródeł energii), przedstawia regulacje prawne oraz dokonuje przeglądu istniejących rozwiązań w zakresie regulacyjnych usług systemowych. *Załącznik 1* jest uzupełnieniem i rozwinięciem zagadnień prezentowanych w rozdz.1.

W podrozdziale 3.5 zatytułowanym *Przegląd metod oceny wystarczalności podaży wybranych usług regulacyjnych* Autor dokonał przeglądu stanu wiedzy w kluczowym zagadnieniu rozważanym w rozprawie. Metodę empiryczną oceny wystarczalności zaproponowaną przez ENTSO-E [33] opisano w podrozdz. 1.2.2. Nie uwzględniono w niej zwiększonego udziału źródeł niesterowalnych. Z tym problemem zmierzono się w publikacji ENTSO-E [34] w prostej metodzie oceny wystarczalności podaży usług regulacji wtórnej (aFRR). Szereg ośrodków wprowadza w analizie pojęcie elastyczności zasobów regulacyjnych i literatura jest tu szczegółowo podana. EPRI wprowadziło podział metod oceny wystarczalności podaży usług regulacyjnych na metody proste (badanie statycznego stanu), metody pośrednie (bez rozkładu obciążeń na jednostki wytwórcze) i metody dokładne (z rozkładem obciążeń na jednostki wytwórcze). Przedstawiono główne elementy metod.

Podrozdział 4.3 zatytułowany *Metody optymalizacji* i w tym zakresie przytaczana bibliografia wiodących ośrodków naukowych jest wystarczająca i aktualna.

Generalnie można stwierdzić, że każde z zagadnień naukowych dysertacji jest szczegółowo udokumentowane publikacjami zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi.

W konkluzji należy stwierdzić, że zaproponowane badania wpisują się w trend badań prowadzonych w krajowej i światowej elektroenergetyce. Analiza źródłowa jest przeprowadzona poprawnie.

5. Oryginalność rozwiązania zagadnienia naukowego

Przedstawione w dysertacji zagadnienia sterowania pracą systemu elektroenergetycznego są kontynuacją badań prowadzonych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej.

Autor przedstawił rozprawę, która ma charakter studium analitycznego na podstawie złożonych obliczeń z wykorzystaniem danych statystycznych. Ku takiemu stwierdzeniu

skłaniają następujące przesłanki: sformułowano problem badawczy (analiza wystarczalności podaży systemowych usług regulacji, optymalizacja łączna dostaw energii elektrycznej i podaży usługi regulacji trójnej), właściwie wybrano metodę rozwiązania wykorzystując zaawansowane oprogramowanie (optymalizacja z wykorzystaniem programu MOST) i samodzielnie opracowując elementy algorytmów w nim zastosowanych (metoda oceny wystarczalności, sformułowanie zadania optymalizacyjnego) oraz dokonano analitycznej oceny uzyskanych wyników. Dokonano oceny uzyskanych rozwiązań pod kątem praktycznego wykorzystania wyników.

Wykorzystanie bazy danych, charakteryzującej pracę KSE oraz fragment systemu elektroenergetycznego, wykonanie wariantowych obliczeń optymalizacyjnych wskazuje na ogrom pracy badawczej zrealizowanej w ramach dysertacji.

Konkluzja: opracowana metoda analizy wystarczalności podaży systemowych usług regulacji oraz opracowanie zadania optymalizacji łącznej jest podejściem nowatorskim, a samodzielnie opracowane elementy algorytmów w niej zastosowanych to elementy nowości.

6. Ocena dorobku przedstawionego w rozprawie przez Autora w dyscyplinie naukowej elektrotechnika

Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością zarówno podstaw teoretycznych, jak i realiów funkcjonowania elektroenergetyki, a w szczególności zagadnień związanych:

- z organizacją i strukturą systemu elektroenergetycznego ze szczególnym uwzględnieniem sterowania pracą systemu elektroenergetycznego, rynku bilansującego i systemowych usług regulacyjnych oraz otoczeniem prawnym ich funkcjonowania,
- z wytwarzaniem energii elektrycznej z wykorzystaniem OZE oraz z ich eksploatacją,
- z zagadnieniami gospodarki elektroenergetycznej, w tym rachunkiem ekonomicznym w elektroenergetyce oraz z optymalizacją w elektroenergetyce.

W rozprawie w spisie *Literatury* są dwie pozycje literaturowe autorstwa mgr inż. Jarosława Bogacza (na poniższej liście pozycja 1 i 2), choć jest on współautorem jeszcze 7 publikacji konferencyjnych, w większości bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy. Poniższe recenzowane artykuły powinny znaleźć się w spisie *Literatury*. Są to następujące artykuły:

- 1) Bogacz J.: Model oceny wpływu rozwoju rozproszonych źródeł energii na wybrane systemowe usługi regulacyjne, *Rynek energii elektrycznej*, maj 2018
- 2) Bogacz J.: Wpływ rozwoju rozproszonych źródeł energii na wybrane systemowe usługi regulacyjne, *Rynek energii elektrycznej*, maj 2017
- 3) Sołtysik M., Bogacz J.: O wykorzystaniu profili zużycia energii jak mechanizmu wspomagającego funkcjonowanie odbiorców na rynku bilansującym, *Rynek energii elektrycznej*, maj 2006
- 4) Bogacz J., Gwóźdź R., Przygodzki M.: Ocena efektywności ekonomicznej inwestycji sieciowych, Materiały Międzynarodowej Konferencji *APE '05*, Jurata 2005
- 5) Bogacz J., Gwóźdź R., Przygodzki M.: Metodyka oceny wystarczalności mocy wytwórczych w ujęciu probabilistycznym, Materiały Międzynarodowej Konferencji *APE '05*, Jurata 2005
- 6) Sołtysik M., Bogacz J.: Wpływ procesu konsolidacji spółek dystrybucyjnych na obniżenie kosztów bilansowania, Materiały Konferencji *Optymalizacja w elektroenergetyce OPE '05*, 29-30 września 2005

- 7) Sołtysik M., Bogacz J., Piotrowski R., Adamczyk M.: Analiza opłacalności wyboru dostawcy na przykładzie klienta z grupy taryfowej B23, Materiały Konferencji *Optymalizacja w elektroenergetyce OPE'05*, 29-30 września 2005
- 8) Buchta F., Bogacz J., Tomasik G.: O wykorzystaniu ciężkich pozostałości z przerobu ropy naftowej jako paliwa dla niekonwencjonalnych źródeł energii elektrycznej, Materiały konferencji *Jakość energii elektrycznej i wyrobów elektrotechnicznych*, Kołobrzeg 2000
- 9) Buchta F., Bogacz J., Tomasik G.: O wpływie rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej na rozwój krajowego systemu elektroenergetycznego, Materiały konferencji *Prognozowanie w elektroenergetyce*, Częstochowa 2000

Dorobek publikacyjny Autora należy ocenić jako spełniający konieczne wymagania.

7. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Praca dotyczy trudnego zagadnienia naukowego, wymagającego wykorzystania nowoczesnego podejścia metodycznego, w tym metod oceny wystarczalności podaży usług regulacyjnych, metod planowania pracy systemu elektroenergetycznego w warunkach rynkowych, metod optymalizacji składu jednostek wytwórczych z metodami ekonomicznego rozdziału obciążeń (economic dispatch ED), metod rachunku ekonomicznego w elektroenergetyce oraz metod optymalizacji liniowej i nieliniowej).

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Autor:

- przeanalizował w sposób wyczerpujący istniejące rozwiązania w zakresie regulacyjnych usług systemowych, rozpoznał i przedstawił nowe zasoby świadczenia usług regulacyjnych oraz nowe rodzaje usług regulacyjnych,
- przeanalizował w sposób właściwy strukturę i otoczenie funkcjonowania energetyki niesterowalnej w systemie elektroenergetycznym, przyjmując w konsekwencji uzasadnione założenia w celu rozwiązania zagadnienia naukowego,
- rozpoznał, zaadaptował i również samodzielnie opracował właściwe metody badawcze wykazując przydatność metod oceny wystarczalności wybranych usług regulacyjnych systemu elektroenergetycznego,
- zaproponował oryginalny sposób optymalizacji łącznej (ko-optymalizacji) energii elektrycznej i usług regulacyjnych,
- zaprogramował niektóre procedury, konieczne do rozwiązania zadania badawczego, wykorzystując oprogramowanie MOST w środowisku Matpower,
- zrealizował skomplikowane wariantowe obliczenia i analizy,
- ocenił rozwiązania i skomentował uzyskane wyniki.

Warto podkreślić, że mgr inż. Jarosław Bogacz uczestniczył w kilkudziesięciu projektach badawczo-rozwojowych i usługowych, będąc członkiem zespołów i kierownikiem projektów dla elektroenergetyki. Ważniejsze projekty z elementami zagadnień naukowych obejmują:

- Opracowanie metodyki oceny efektywności ekonomicznej inwestycji sieciowych w ramach opracowywania planu rozwoju sieci przesyłowej wraz z budową specjalistycznej platformy informatycznej służącej do planowania rozwoju sieci przesyłowej w KSE (projekt zlecony przez PSE S.A.) – ekspert i kierownik projektu,
- Opracowanie doktryny bezpieczeństwa energetycznego jako Polityki Energetycznej Polski do 2020 r. (projekt zlecony przez MG, PSE S.A. i PGNiG) – ekspert i kierownik projektu,

- Wpływ rozwoju źródeł rozproszonych na rozwój KSE (projekt zlecony przez PSE S.A.),
- Analizy przyłączeniowe i koncepcje przyłączeń źródeł wytwórczych do KSE: El. Łagisza, El. Belchatów II, OZE,
- Analizy rozpyłowe mocy w KSE, analizy stabilności statycznej i dynamicznej KSE, analizy zwarciowe i inne techniczne w kontekście planowania rozbudowy KSE (prace zlecone przez PSE S.A. i spółki dystrybucyjne),
- Opracowanie metodologii podziału kosztów funkcjonowania majątku sieciowego (praca zlecona przez EC Skawina),
- Opracowanie taryf dla energii i gazu dla dystrybutorów i sprzedawców energii i gazu.

Pozwala to na stwierdzenie, iż Autor posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

8. Strona redakcyjno – wydawnicza

Układ pracy jest w zasadzie typowy dla rozpraw doktorskich. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów merytorycznych. Nienumerowanymi pozycjami w rozprawie są: *Literatura* oraz trzy *Załączniki*.

W rozdz. 1 dokonano przeglądu rozwiązań prawnych i mechanizmów funkcjonowania rynku usług systemowych w kraju oraz w otoczeniu europejskim. Przedstawiono rozwiązania w zakresie regulacyjnych usług systemowych. Wykazano implikacje rozwoju OZE na regulacyjne usługi systemowe.

W rozdz. 2 *Problematyka badawcza* przedstawiono cel pracy, sformułowano tezę pracy i zakres badań.

W typowym układzie rozpraw doktorskich przedstawienie stanu wiedzy wraz z przeglądem literatury omawia związek postawionego problemu z innymi pracami w rozpatrywanym obszarze badań, dając jasny pogląd, jakie zagadnienie naukowe będzie stanowiło nowatorski wkład w rozwój nauki. W recenzowanej dysertacji powyższych czynności dokonano zarówno w *Załączniku 1*, jak i podrozdziałach 3.1, 3.2, 3.5 oraz 4.3 wskazując na nowatorskie podejście do analizy wystarczalności podaży wybranych usług regulacyjnych i optymalizacji łącznej dostaw energii elektrycznej i usług regulacji trójnej.

Trzy kolejne rozdziały 3, 4 i 5 są najistotniejsze z punktu widzenia realizacji zadania badawczego i udowodnienia tezy dysertacji.

W rozdz. 3, zatytułowanym *Wystarczalność wybranych usług regulacyjnych systemu elektroenergetycznego* Autor dokonał formalizacji metody wystarczalności podaży usług regulacyjnych, a następnie wykorzystując metodę pośrednią przedstawił ocenę wystarczalności podaży usług systemowych. Zaproponował również wskaźniki wystarczalności występowania usługi zapewnienia gradientu zmian mocy w systemie elektroenergetycznym. Zaprezentował zapotrzebowanie na usługi systemowe w KSE dla różnych scenariuszy rozwoju źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych, bazując na danych z roku 2015.

W rozdz. 4 *Optymalizacja łączna energii elektrycznej i usług regulacyjnych* istotnym osiągnięciem Autora jest sformułowanie funkcji celu ko-optymalizacji wraz z warunkami ograniczającymi. W badaniach wykorzystano program Matpower Optimal Scheduling Tool (MOST). Dane wejściowe modelu opisano w *Załączniku 2 Zestawienie podstawowych danych systemu i założeń symulacji*. Wyniki wariantowych obliczeń zaprezentowano w podrozdz. 5.2,

a w *Załączniku 3* zestawiono wybrane wyniki symulacji dla modelowego fragmentu systemu elektroenergetycznego (28 węzłów sieci o napięciu znamionowym 400 kV).

Autor zaprezentował w rozdz. 4 i 5 bardzo obszerny materiał wariantowych obliczeń dla wybranych scenariuszy. Uwagi i wnioski końcowe dotyczące zrealizowanych badań i ich ocenę zamieszczono w rozdz. 6 *Podsumowanie i wnioski*.

Należy podkreślić dużą staranność edycyjną dysertacji. Dostrzeżone, nieliczne błędy edycyjne i językowe zaznaczono w recenzowanym egzemplarzu rozprawy.

Wniosek: poprawnie zredagowano strukturę rozprawy.

9. Uwagi polemiczne i dyskusyjne

9.1. Uwagi polemiczne

- 9.1.1. Komisja Europejska dąży do wdrożenia platform integrujących rynek usług systemowych na poziomie UE i jak zostało napisane na str.24 „...Powyższe będzie prowadziło do minimalizacji kosztów dostaw energii do klientów końcowych i lepszej integracji źródeł odnawialnych w SE.” Czy można podać przesłanki wskazujące na to, że minimalizacja kosztów będzie związana z ich obniżeniem i czy są zrealizowane (znane?) badania potwierdzające powyższy wniosek?
- 9.1.2. Na str. 29 stwierdzono: „...*Uwzględniając dodatkowo brak dostępności danych wejściowych niezbędnych do wykonania analiz i symulacji dla krótszych okresów czasowych umożliwiających rozważania w zakresie wystarczalności podaży regulacji pierwotnej i wtórnej, w rozprawie skupiono się na aspektach podaży regulacji trójnej.*” Zagadnienie nie jest więc rozwiązywane kompleksowo, co może budzić pewne zastrzeżenia. Czy uwzględnienie np. wymagań regulacji pierwotnej mogłoby wpłynąć na wynik optymalizacji łącznej, czy też rozwiązanie jest nieczułe na pominięte aspekty usług regulacyjnych?
- 9.1.3. W podrozdz. 2.3 nakreślono *Zakres badań*. Pkt. 5 mówi o przeprowadzeniu ko-optymalizacji dla kilku scenariuszy nazwanych symulacjami komputerowymi. Czy w przyszłych badaniach nie należałoby uwzględnić pewnego sprzężenia zwrotnego w obliczeniach optymalizacyjnych? Czy ko-optymalizacja nie powinna prowadzić do wyboru scenariusza realizacji nowych inwestycji i modernizacji w sektorze wytwórczym oraz sieciach elektrycznych i czy taka modyfikacja przedstawionego algorytmu obliczeń jest możliwa i uzasadniona?
- 9.1.4. Na str.37 omawiając w pkt. 8 *Ograniczenia pracy niesterowalnych źródeł odnawialnych* stwierdzono, że „...W przypadku braku odpowiednio rozbudowanej bazy zasobów podaży usług regulacyjnych w systemach występują ograniczenia produkcji źródeł niesterowalnych (*curtailment*). Niestety to jeden z najdroższych sposobów zapewnienia właściwego funkcjonowania systemu, z powodu straty pełnych przychodów jednostek odnawialnych”. W takiej sytuacji, czy to nie niesterowalne źródła odnawialne powinny partycypować w kosztach rozbudowy podaży usług regulacyjnych?
- 9.1.5. W podrozdz. 4.1 i 4.2 zdefiniowano funkcję celu optymalizacji łącznej energii elektrycznej i usług systemowych w horyzoncie długoterminowym wraz z ograniczeniami „... *bez uwzględnienia ... części sieciowej.*” Czy to uproszczenie nie wymaga weryfikacji w przyszłych badaniach, np. poprzez uwzględnienie strat sieciowych?

- 9.1.6. W jaki sposób w zadaniu optymalizacji łącznej energii elektrycznej i usług systemowych w horyzoncie długoterminowym (formuła (36) i ograniczenia (37)-(48) i pkt.8+11) uwzględnia się elektrownie wodne przepływowe?
- 9.1.7. Jeżeli analizuje się koszt dostaw energii elektrycznej w horyzoncie długoterminowym, to czy nie wydaje się zasadne dokonanie prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną i wykorzystanie jej w optymalizacji łącznej? Jakie przesłanki zdecydowały o przyjęciu zapotrzebowania na stałym, niezmiennym poziomie przyjętym na podstawie roku 2018 dla lat 2025 i 2030 (str.73)?
- 9.1.8. Czy zasadna jest, zdaniem Autora, analiza rozkładu przestrzennego podaży usług regulacyjnych i czy opracowany model optymalizacyjny mógłby w przyszłości być rozbudowywany w tym kierunku?
- 9.1.9. Jak Autor ocenia perspektywę praktycznego wykorzystania opracowanej metody i rezultatów badań modelowych?

9.2. Uwagi szczegółowe i edycyjne

- 9.2.1. Na str. 27 zostało napisane: „...i) błędy prognoz (zapotrzebowania na energię elektryczną, produkcji w źródłach niesterowalnych) będą się w pewnym zakresie bilansowały w poszczególnych krajach”. Czy może tu chodzi o kompensowanie się błędów? Ale może zachodzić sytuacja, w której błędy będą się kumulować.
- 9.2.2. Na str.27 jest stwierdzenie „...Obecnie brak jest jednolitych rozwiązań w zakresie cenotwórstwa.” Czy jest to czynnik na tyle istotny, że wprowadzenie konkretnego mechanizmu wymiarującego ceny za usługi regulacyjne może wpłynąć na wyniki optymalizacji łącznej zgodnie z funkcją celu (36)?
- 9.2.3. Str.61+63: Większość ofert cenowych, kosztów zakupu, kosztu uruchomienia zasobu itp. występujących we wzorze (36) uzależnionych jest od czasu. Jak przyjmowano wartości powyższych wielkości w procesie optymalizacji, skoro zmiany w czasie większości z nich obarczone są sporą niepewnością?
- 9.2.4. Str. 63: We wzorze na funkcję celu (36) na początku trzeciego wiersza brakuje symbolu rezerwy mocy wymaganej do zapewnienia regulacji trójnej dla zwiększenia mocy przez zasób k dla przedziału czasowego t dla roku l .
- 9.2.5. Omawiając w podrozdz. 5.1. *Założenia i dane wejściowe* dokonano sporych oszacowań i uśrednień (str. 79+81 Scenariusz I, II i III). Czy wyników optymalizacji nie traktować więc jako analizy przypadku? Czy przedstawione wyniki upoważniają do dokonywania pewnych uogólnień?
- 9.2.6. Czy tytuł podrozdziału 5.2. *Wyniki symulacji* nie powinien raczej brzmieć np. *Wyniki ko-optymalizacji na podstawie symulowanych scenariuszy?*

10. Konkluzja

Tematyka recenzowanej rozprawy w dziedzinie nauk technicznych w **dyscyplinie elektrotechnika** jest bardzo aktualna zarówno w Polsce, jak też na świecie. Główna wartość pracy, zdaniem recenzenta, polega na kontynuowaniu i rozwinięciu przez Autora badań dotyczących sterowania pracą systemu elektroenergetycznego, podjętych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Wyniki obliczeń przedstawione w dysertacji wskazują na możliwość określenia optymalnej wielkości i struktury zasobów dostarczających usługę regulacji trójnej i gradient zmian mocy. Ko-optimalizacja umożliwia również minimalizację kosztów dostaw energii elektrycznej do odbiorców. Zmiana struktury źródeł wytwórczych z wyraźnym trendem wzrostu udziału OZE jest dla operatora systemu przesyłowego sporym wyzwaniem w zapewnieniu odpowiedniej rezerwy mocy. Stąd zaproponowane w dysertacji metody analizy są cenne ze względu na ich użytkowy charakter.

W przekonaniu recenzenta Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych. Rozwiązał oryginalne zagadnienie naukowe.

W tym kontekście przedstawiona rozprawa odpowiada wymaganiom, sprecyzowanym w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z dnia 16 kwietnia 2003 z późn. zm.) i w par.6, ust.4 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. 2018, poz.261).

Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Jarosława Bogacza do publicznej obrony, w trakcie której oczekuję, że Pan mgr inż. Jarosław Bogacz ustosunkuje się do uwag polemicznych i dyskusyjnych zawartych w recenzji.



.....
Podpis recenzenta