

dr hab. inż. Waldemar Skomudek, prof. nadzw.
Politechnika Opolska
Instytut Innowacyjnych Procesów i Produktów
45-370 Opole, ul. Ozimska 75

Opole, 23.08.2013 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Wierzbowskiego nt.

Optimization of distribution electrical networks in the modern power systems

(Optymalizacja pracy sieci rozdzielczej w nowoczesnych systemach elektroenergetycznych)

**opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej
z dnia 05. 07. 2013 r.**

Promotor: prof. dr hab. inż. Władysław Mielczarski

1. Aktualność i oryginalność tematyki oraz cel i teza rozprawy

Recenzowana rozprawa jest poświęcona zagadnieniu aktywnego zarządzania produkcją energii elektrycznej, rozplywami mocy oraz zużyciem tej energii w dystrybucyjnych sieciach średniego napięcia. Wprowadzenie aktywnego zarządzania mechanizmami prowadzącymi w konsekwencji do optymalizacji bilansowania dostaw i poboru energii elektrycznej w czasie rzeczywistym umożliwi operatorowi sieci dystrybucyjnych – a w efekcie końcowym także operatorowi sieci przesyłowych – efektywniejsze zbilansowanie wielkości dostaw i poboru energii w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem zasad technicznych, ekonomicznych i prawnych. W prowadzonych rozważaniach należy zwrócić uwagę na jeden szczególnie ważny aspekt, istotnie związany z zarządzaniem pracą sieci dystrybucyjnej. Otóż, operator jest zobowiązany do utrzymania parametrów systemu zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa, uzyskaną koncesją i zasadami prowadzenia ruchu i eksploatacji. W tym celu może wykorzystywać możliwości kontraktowania dodatkowych usług u uczestników rynku. W segmencie bilansującym stroną wszystkich transakcji na świadczenie usług bilansujących jest operator systemu, dlatego też powinny istnieć sprawdzone mechanizmy wymuszające minimalizację kosztów bilansowania oraz usług systemowych kontraktowanych przez operatora. Obecnie postępująca ewolucja rynku energii elektrycznej dopuszczająca w otoczeniu wieloskalowej konwencjonalnej energetyki na rozwój generacji rozproszonej i sieci inteligentnych stwarza możliwości wprowadzenia nowych usług systemowych, które mogą mieć istotny wpływ na elastyczność pracy systemu elektroenergetycznego, co jednocześnie pozytywnie przekłada się na zachowanie pewności i ciągłości dostaw energii elektrycznej do odbiorców. Zasygnalizowana problematyka osiągania efektywności zarządzania systemem elektroenergetycznym w warunkach rynku konkurencyjnego stała się podstawą recenzowanej pracy badawczej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest opracowaniem o charakterze naukowo-technicznym, jasno określonym celu oraz prawidłowo postawionej i udowodnionej tezie. Autor w treści rozprawy doktorskiej wskazuje na wagę problematyki zmiany filozofii

obecnego funkcjonowanie elektroenergetyki, wyraźnie akcentuje wzrost roli odbiorców energii elektrycznej – a w nieodległej przyszłości odbiorców i producentów energii elektrycznej, czyli tzw. prosumentów – który przejawia się w możliwości ich bezpośredniego udziału w świadczeniu usług bilansujących, a także wyraźnie akcentuje potrzebę dążenia do lepszego rozpoznania struktury zapotrzebowania odbiorców i czynników kształtujących tę strukturę, co ma istotne znaczenie w rozwoju działań typu *Demand Side Management*.

W części opisowej Autor rozprawy przedstawił zasady funkcjonowania nowoczesnych systemów elektroenergetycznych, które wynikają z regulacji prawnych Unii Europejskiej i dotyczą *unbundling-u* oraz zasady *Third Party Access*. Natomiast zasadniczą część pracy zawiera bardzo szeroko rozwiniętą procedurę udowadniającą tezę rozprawy doktorskiej, która w szczególności opiera się na:

- określeniu modeli optymalizacyjnych, wraz z wyznaczeniem funkcji celu,
- analizie metod optymalizacji, ze szczególnym uwzględnieniem metod optymalizacji nieliniowej,
- wyborze algorytmów optymalizacji w celu przeprowadzenia symulacji,
- symulacjach przeprowadzonych dla zdefiniowanych scenariuszy i przyjętych metod,
- analizie uzyskanych wyników i sformułowaniu rekomendacji dla wdrożeń praktycznych i dalszych prac badawczych.

Mimo wielu prac opublikowanych w ostatnich latach na temat technicznych i ekonomicznych aspektów funkcjonowania rynku energii elektrycznej, funkcji rynku bilansującego oraz metod śledzenia przepływów mocy w sieciach recenzowana rozprawa stanowi oryginalny dorobek Autora. Główną przesłanką uzasadniającą prezentowane stanowisko są wykonane analizy metod optymalizacyjnych i symulacje.

2. Rozwiązanie postawionego zadania - metody i samodzielność Autora

Praca jest o objętości 271 stron. Została podzielona na 14 rozdziałów, przy czym rozdziały od 1 do 6 stanowią zasadniczą część rozprawy doktorskiej. W pracy zamieszczono 89 rysunków i 53 tablice. W bibliografii umieszczono 255 pozycji literatury. Lista publikacji autorskich i współautorskich doktoranta zawiera 13 pozycji. Na wskazanej liście znajduje się 5 publikacji współautorskich, które zostały zamieszczone w czasopismach ujętych na liście czasopism naukowych punktowanych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z sumaryczną liczbą 35 punktów.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera cel główny, zakres i tezę. W rozdziale 6 rozprawy przedstawiono podsumowanie wyników badań dowodzących słuszność tezy postawionej w pracy oraz rekomendacje dla wdrożeń praktycznych i dalszych prac badawczych.

Zamiarem Autora rozprawy było zaproponowanie i zbadanie mechanizmu aktywnego zarządzania pracą sieci dystrybucyjnej średniego napięcia, z uwzględnieniem lokalnego bilansowania energii elektrycznej oraz optymalizacji pracy systemu z zachowaniem wszystkich wymagań stawianych systemom elektroenergetycznym, w tym wymagań technicznych, ekonomicznych i prawnych. Realizując zamierzony cel autor rozprawy w rozdziale 2 i 3 zawarł analizę europejskich regulacji prawnych determinujących działanie sektora energetycznego oraz przedstawił opis stanu wiedzy w zakresie tematu rozprawy, koncentrując się na pracy elektroenergetycznych systemów dystrybucyjnych, generacji rozproszonej oraz na bilansowaniu energii w systemie. Najistotniejszą częścią rozprawy jest rozdział 4 i 5. Rozdziały te zawierają opis koncepcji lokalnego bilansowania energii w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia, definicje scenariuszy symulacji służących weryfikacji postawionej tezy oraz wyniki symulacji. Podsumowanie uzyskanych wyników oraz sformułowane końcowe wnioski, wynikające z przeprowadzonych symulacji ujęto w podrozdziale 5.6. Podsumowanie prac badawczych

wykonanych przez doktoranta oraz wskazane możliwe kierunki przyszłych badań zawarto w rozdziale 6.

Recenzowana rozprawa doktorska w kolejnych rozdziałach zawiera streszczenia pracy w języku angielskim i polskim (rozdziały 7 i 8), rozdział dodatkowy informujący o aktualnych regulacjach prawnych obowiązujących w przedmiocie rozprawy (rozdział 9) oraz rozdziały zawierające spis rysunków i tabel oraz literatury, związanej z tematyką pracy. Rozprawa doktorska kończy się informacją o dorobku naukowym Autora.

Wykonanie przez Autora rozprawy pracy badawczej, pozwala na stwierdzenie, że możliwe jest zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej średniego napięcia z generacją rozproszoną, w oparciu o koordynację przepływów mocy i usług systemowych prowadzonych przy wykorzystaniu metod optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami w warunkach bilansującego rynku energii elektrycznej.

Wyniki z przeprowadzonych analiz i symulacji są niewątpliwie oryginalne. Ich ranga jest znacząca, zwłaszcza, gdy weźmie się pod uwagę poważne trudności i ograniczenia w formułowaniu założeń upraszczających, niezbędnych przy przechodzeniu od rzeczywistych układów do ich odwzorowań modelowych. Skupiając uwagę na treści rozprawy i uzyskanych przez Doktoranta wynikach symulacji można ją oceniać w sposób właściwy, obiektywny i jednoznacznie pozytywny.

Do analizy problemu określonego w tezie oraz do przeprowadzenia symulacji Autor rozprawy wykorzystał nowoczesną metodę symulacji komputerowej z wykorzystaniem pakietu obliczeniowego MATLAB, który umożliwił przeprowadzenie dokładnej analizy algorytmów optymalizacji nieliniowej.

Autor rozprawy osiągnął zamierzony cel pracy m.in. poprzez:

- analizę działania sieci elektroenergetycznych według zasad rynkowych, w szczególności według zasad *unbundling-u* i *Third Party Access*; w rozprawie zaprezentowano przegląd obecnego stanu rozwoju europejskiego systemu elektroenergetycznego wraz z uwarunkowaniami prawnymi, a także stan wiedzy na temat rynków energii elektrycznej i ekonomicznego rozdziału obciążeń w systemach elektroenergetycznych,
- przyjęcie modelu sieci testowej średniego napięcia z uwzględnieniem możliwości kontroli oraz przyłączonych źródeł, w tym: generatorów, magazynów energii oraz sterowalnych odbiorów (odbiorców aktywnych),
- sformułowanie zadań dla lokalnych obszarów bilansowania w węzłach sieci dystrybucyjnej, uwzględniających przede wszystkim koordynację produkcji mocy czynnej i biernej oraz minimalizację strat przesyłowych,
- określenie i analizę modeli optymalizacyjnych oraz funkcji celu i ograniczeń,
- analizę metod Power Flow Tracing i implementację wybranej metody dla określenia cen energii na potrzeby bilansowania,
- przygotowanie scenariuszy symulacyjnych i przeprowadzenie symulacji dla zdefiniowanych scenariuszy i przyjętych metod.

Na podstawie wskazanych osiągnięć można stwierdzić, że postawione w tezie rozprawy kwestie zostały rozwiązane w sposób satysfakcjonujący zarówno recenzenta, jak i z dużym prawdopodobieństwem znaczącą część zainteresowanego środowiska naukowego.

3. Wiedza Autora i umiejętność prezentowania przez niego wyników naukowych

Omawiając w kolejnych rozdziałach rozprawy sposób realizacji jej celu Autor ujawnił swoje predyspozycje naukowe i wiedzę z zakresu tematyki, obejmującej:



- efektywne zarządzanie elektroenergetyczną siecią dystrybucyjną,
- funkcjonowanie rynku energii elektrycznej,
- funkcje i strukturę rynku bilansującego, z uwzględnieniem procesów tworzenia funkcji celu w algorytmach rozdziału obciążeń i rozliczeń,
- technikę badań modelowych i symulacyjnych,
- technikę obliczeń komputerowych.

Dzięki tym umiejętnościom Autor mógł otrzymać interesujące wyniki badań i analiz. Wykazał bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i dużą zręczność zarówno w modelowaniu, doborze funkcji celu, jak i komputerowej symulacji rozpatrywanych zagadnień. Autor rozprawy uzyskał zdolność samodzielnego prowadzenia badań, a także posiada umiejętność przedstawiania i komentowania uzyskanych wyników badań i analiz oraz formułowania wniosków. Ponadto, Autor rozprawy w sposób zadowalający operuje językiem angielskim, co stanowi dodatkowy walor posiadanych predyspozycji prezentacji własnych osiągnięć naukowych m.in. na konferencjach międzynarodowych, organizowanych w kraju i zagranicą, a także przy nawiązywaniu międzynarodowych kontaktów naukowych. Uzyskane przez doktoranta wyniki pracy oraz sformułowane rekomendacje są wystarczające, aby włączyć Autora rozprawy doktorskiej do grona specjalistów, którzy posiadają umiejętność inicjowania badań naukowych, uzyskiwania interesujących rezultatów swoich prac i zadowalającego ich prezentowania.

Niewątpliwie, Autor rozprawy przyczynił się do rozwoju reprezentowanej przez siebie dziedziny nauki.

4. Uwagi, zastrzeżenia do rozprawy doktorskiej

Mając na względzie zachowanie obiektywności w ocenie rozprawy doktorskiej doceniając jej pozytywne walory nie można pominąć pewnych niejasnych zapisów i dostrzeżonych nielicznych usterek redakcyjnych. Wśród nich można wymienić następujące:

- str. 70, wiersz 4 i 5 od dołu – nie ma ciągłości przedziałów mocy w grupach generacji *medium i large DG*,
- str. 102, wzór 3.2 – brak informacji po jakim indeksie następuje sumowanie i w jakim przedziale wartości; ponadto, należy porównać zależności 3.1 oraz 3.2 i uporządkować sumowanie po „i” i po „j” – zaproponowane zapisy są niejasne,
- str. 151, wzór 4.26 – brak informacji w jakim przedziale wartości indeksu „i” następuje sumowanie (czy ma to związek z innymi zależnościami ujętymi w rozprawie, np. 4.25 „?”),
- str. 142 i 155 – jak należy interpretować jakościowo i wartościowo indeksy „m” i „m_e”,
- w spisie literatury zamieszczono ponad 250 pozycji, natomiast w obszernej treści rozprawy przywołano jedynie część z nich; czy Autor zapoznał się i korzystał z treści każdej przywołanej publikacji?
- niektóre wykresy zamieszczone w rozprawie nie posiadają opisu osi rzędnych (tytuł wykresu nie zastępuje opisu osi), np. str. 119 - rys. 36, str. 120 - rys. 37, str. 168 - rys. 44, str. 169 – rys. 45,
- w pracy w wielu miejscach zastosowano przy prezentacji wykresów niejednakowy rozmiar czcionki, np. rys. 64, 65, 74 i rys. 62, 63, 73.

Autor stosuje w rozprawie wiele symboli i oznaczeń, które wielokrotnie się powtarzają i mogły zostać przywołane w jednym miejscu. Zatem, odczuwa się brak ich zbiorczego



wykazu, np. na początku pracy wzorem umieszczonych w tym miejscu zestawienia użytych w rozprawie skrótów.

Ponieważ rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia lokalnego bilansowania systemu elektroenergetycznego Autor w części wprowadzającej wspominał o kilku kwestiach, które zdaniem recenzenta nie zostały wyczerpująco wyjaśnione. Zatem, należy oczekiwać, że Autor zechce podczas obrony udzielić wyjaśnień przez udzielenie odpowiedzi na następujące pytania:

1. W rozdziale 1 (str. 13) rozprawy Autor przywołał cel pracy, w których informuje, że naukowe dociekania będą koncentrowały się na analizie mechanizmów efektywnego zarządzania siecią dystrybucyjną z zachowaniem wszystkich wymagań stawianych systemom elektroenergetycznym, w tym wymagań technicznych, ekonomicznych i prawnych. Jednak w toku prowadzonych badań i analiz, a także w posumowaniu Autor nie odniósł się do kwestii posiadania właściwych narzędzi prawnych, jak i nie wskazał ewentualnych potrzeb w zakresie modyfikacji istniejących już regulacji. Zatem, wskazany byłby komentarz Autora w przedmiotowej kwestii.
2. Efektywne zarządzanie siecią dystrybucyjną, w szczególności w obszarze sterowania przepływami mocy czynnej i biernej, ma kolosalne znaczenie nie tylko z punktu widzenia ekonomiki procesu, ale w szczególności w sferze utrzymania wymaganych zdolności przesyłowych sieci elektroenergetycznych. Autor w rozprawie prowadzi rozważania w tym zakresie, jednak wskazane jest uzupełnienie rozważań podsumowujących o autorską ocenę możliwości usankcjonowania prawa operatorów sieci dystrybucyjnych do stosowania ograniczeń w wyprowadzenia mocy ze źródeł wytwarzających energię elektryczną.
3. Bardzo istotnym zagadnieniem, o którym wspomina Autor rozprawy jest koordynacja układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ) w wydzielonych, lokalnych obszarach bilansowych. Aspekt właściwej współpracy EAZ stanowi element pewności i ciągłości pracy systemu elektroenergetycznego. Zatem, na podstawie m.in. uzyskanych wyników symulacji wskazany byłby komentarz Autora, określający główne kryteria zabezpieczeniowe, jakie należałoby postawić przed EAZ, przeznaczoną do zastosowania w lokalnych obszarach bilansowych.

5. Końcowa ocena rozprawy

Podane w rozprawie rozważania i jej wyniki, mimo wykazanych drobnych uwag i zastrzeżeń, pozwalają na stwierdzenie, że Doktorant dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej elektrotechnika, podjął oryginalne i ważne zadanie, rozwiązał je, stosując akceptowalne metody oraz wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam więc, że recenzowana rozprawa odpowiada wymaganiom stawianym w art. 13. Ustawy 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 następnymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej.

Recenzent

