Dr hab. inż. Ryszard Frąckowiak, prof. PP
Instytut Elektroenergetyki
Politechniki Poznańskiej

Poznań, 30 sierpnia 2018 r.

WPŁYNĘŁO
dn. 3.09.2018

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kaplara
pt. „Wykorzystanie potencjału adaptacyjnego indywidualnych odbiorców energii elektrycznej w interakcji z systemem elektroenergetycznym "

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzowana praca powstała pod kierunkiem dr hab. inż. Stanisława Ziemianka. Tekst pracy liczy 170 stron wraz z załącznikami i wykazem 147 pozycji literaturowych. Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej i ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

2. Dobór tematu, teza rozprawy

System elektroenergetyczny SEE podlega ciągłym i rozmaitym zmianom, które można zaobserwować we wszystkich jego sektorach. Wzrasta także moc zainstalowana w odnawialnych źródłach energii elektrycznej, co stwarza nowe problemy związane ze sterowaniem po stronie wytwarzania. Pojawiają się natomiast nowe możliwości sterowania po stronie odbiorów, związane z wprowadzaniem idei inteligentnych sieci elektroenergetycznych Smart Grids oraz cyfrowych inteligentnych liczników energii elektrycznej w sektorze odbiorczym. W tej sytuacji problemy związane ze wzrastającą konsumpcją energii elektrycznej oraz z koniecznością rozwoju i modernizacji SEE wymuszają bliższe zainteresowanie możliwością interakcji pomiędzy systemem a odbiorcami. Przyjmuje się, że dwustronna komunikacja powinna przynosić korzyści finansowe dostawcom i odbiorcom.

Autor poświęcił swoją rozprawę zagadnieniu wykorzystania potencjału adaptacyjnego odbiorców energii elektrycznej w interakcji z systemem elektroenergetycznym. Przeprowadzone badania ograniczono do odbiorców indywidualnych zaliczanych do gospodarstw domowych. Pomimo, że udział tych odbiorców w rynku energii nie jest duży, posiadają oni pewien potencjał adaptacyjny, zdefiniowany jako zdolność do zmiany sposobu korzystania z energii elektrycznej pod wpływem czynników technicznych i ekonomicznych. Autor rozprawy podkreśla, że ważnymi czynnikami wspierającymi taki kierunek działań jest wprowadzanie na dużą skalę inteligentnych liczników energii, wzrost świadomości w użytkowaniu energii elektrycznej, użycie mechanizmów zarządzania popytem oraz odejście od modelu miedzianej płyty (jednakowa cena rozliczeniowa dla wszystkich uczestników rynku) na rzecz modelu z cenami węzłowymi. Model oparty na koncepcji krótkookresowych cen węzłowych LMP (Locational Marginal Prices) zawiera zróżnicowane ceny w zależności od lokalizacji danego uczestnika rynku w SEE, uwzględniające: koszt zakupu energii na potrzeby bilansowania zapotrzebowania, składnik związany ze stratami przesyłowymi oraz składnik związany z ograniczeniami sieciowymi.

Autor zauważa potrzebę zbadania interakcji pomiędzy systemem elektroenergetycznym a indywidualnymi odbiorcami energii elektrycznej i jako cel pracy przyjął zbadanie potencjału adaptacyjnego indywidualnych domowych odbiorców energii elektrycznej w oparciu o wykorzystanie cen węzłowych jako sygnałów zwrotnych z systemu elektroenergetycznego.

Postawił następującą tezę:

Wykorzystanie sprzężenia zwrotnego od systemu elektroenergetycznego w postaci sygnału cenowego może umożliwić bardziej świadome i efektywne wykorzystanie energii elektrycznej przez indywidualnego odbiorcę domowego, który będzie miał możliwość, z własnej woli, zmieniać profil poboru mocy w funkcji czasu. Beneficjentami takich działań mogą być zarówno system elektroenergetyczny jak i odbiorcy.

Przebiegi obciążenia elektrycznego oraz zachowania indywidualnych odbiorców energii elektrycznej są przedmiotem badań naukowych od wielu lat a w ostatnim okresie zainteresowanie tą tematyką wyraźnie wzrasta. Rozprawa wpisuje się w interesujące spojrzenie na SEE jako na całość złożoną z wielu oddziałujących na siebie członów. Szczególną uwagę koncentruje na określeniu wpływu stylu życia odbiorców i sposobu korzystania z domowych odbiorników na pracę całego systemu.

Podsumowując należy stwierdzić, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. Należy się liczyć, że w dobie zachodzących zmian w systemie elektroenergetycznym, szczególnie wzrostu wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł znaczenie sterowania popytem będzie wzrastało.

3. Zakres pracy, uzyskane podstawowe rezultaty

Recenzowana praca jest podzielona na 7 rozdziałów, zawiera wyczerpujący spis literatury oraz zestaw 5 załączników.

Po wstępnym wprowadzeniu do zagadnienia Autor określił cel i zakres pracy oraz przedstawił dość obszerny przegląd literatury związany z tematyką badań.

W rozdziale 2 przedstawiono problem naukowy, któremu rozprawa została poświęcona, wyjaśniono w nim sposób realizacji badań i podano przyjęte założenia. Opisano w nim:

- techniczno – ekonomiczne aspekty przesyłu energii elektrycznej i koncepcję ceny węzłowej,
- rejestrator *energy logger,* wykorzystane oprogramowanie komputerowe, oraz użyte trzy testowe systemy elektroenergetyczne,
- zagadnienia wyznaczania optymalnego rozpływu mocy OPF (ang. *Optimal Power Flow*),
- wykorzystanie transformaty falkowej,
- użycie rozmytych systemów wnioskujących do badań nad modelowaniem zachowania domowych odbiorców energii.

Zmienność cen węzłowych w trzech systemach testowych przy zmianach zapotrzebowania na moc czynną omówiono w rozdziale 3.

Wyniki dość szczegółowej analizy zebranych przez Autora profili obciążenia elektrycznego odbiorców domowych dla dwóch mieszkań w budynku wielorodzinnym zamieszczono w rozdziale 4. Podano w nim także wybrane informacje dotyczące profili ww. typu odbiorców.

W rozdziale 5 przedstawiono założenia i wyniki badań wykonanych przy wykorzystaniu trzech systemów testowych. Badanie potencjału adaptacyjnego indywidualnych odbiorców zaliczanych do gospodarstw domowych na przykładzie *przesunięcia* pory użycia dwóch podstawowych odbiorników (pralki automatycznej i zmywarki do naczyń) wykonano na

przykładzie systemu 1. Obliczenia wykonano dla kilku wariantów (procentu odbiorców domowych biorących udział w *przesunięciu*, pory roku, typu dni). Badanie wpływu wyłączenia wybranych generatorów oraz naruszenia limitów przepustowości wybranych gałęzi sieci na wartości cen węzłowych w wybranych węzłach odbiorczych przeprowadzono odpowiednio na przykładzie systemu 2 i systemu 3. Na końcu rozdziału zamieszczono ocenę przedstawionego w rozprawie rozwiązania.

Propozycję wykorzystania ciągłej transformaty falkowej do analizy wybranych profili obciążenia domowych odbiorców energii elektrycznej oraz zależności pomiędzy cenami węzłowymi i wartościami funkcji celu a wariantami zmiany obciążenia odbiorców zamieszczono w rozdziale 6.

Podsumowanie i wnioski zostały przedstawione w rozdziale 7.

Praca zawiera także 5 załączników i wykaz bibliografii składający się z 147 pozycji.

Udowodnienie tezy wymagało podjęcia przez Autora wielu zagadnień związanych z modelowaniem i analizą czynników, które na siebie wzajemnie oddziałują w SEE. Chociaż uczynił to przy licznych założeniach, należy uznać włożony duży wkład pracy, zasługuje na podkreślenie.

W rozprawie Autor przeanalizował przydatność cen LMP dla sterowania odpowiedzią dotyczącą zmian w obciążeniu odbiorców. Modelując możliwe zmiany obciążenia podał ich skutki w postaci zmiany cen węzłowych. Przeprowadził symulacje zmian cen LMP w wybranych węzłach testowego SEE na skutek przenoszenia obciążenia spowodowanego eksploatacją pralki czy zmywarki z godzin wieczornych na godziny poranne w dni robocze, w dni weekendowe godziny przesunięcia zależą od pory roku. W badaniach uwzględnił liczbę urządzeń ulegających przesunięciu w poszczególnych węzłach (na skutek znajomości cen węzłowych), chęć korzystania z urządzeń (3 stany naładowania) oraz czas pracy urządzenia i program pracy przy zastosowaniu generatora liczb pseudolosowych.

Ocenił wzrost cen LMP w węzłach, dla których jest zbyt małą wystarczalność generacji oraz gdy występują ograniczenia w przesyle energii elektrycznej do tych węzłów. Teoretycznie znajomość zmiany cen LMP mogłaby stanowić sygnał sterujący dla odbiorców chętnych do dokonania przesunięcia użytkowania pewnych odbiorników na inne okresy.

Dokonał analizy profili obciążeń odbiorców na podstawie pomiarów konsumpcji energii dwóch mieszkaniach w budynku wielolokalowym. Wydaje się, że sam model obciążenia będzie przydatny dla rozważań modeli mikro sieci, w modelach makro rzadko obserwuje się piki charakterystyczne dla zaprezentowanych profili.

Przeprowadził również analizę profili obciążeń uzyskanych drogą pomiarową przy wykorzystaniu transformaty falkowej dwóch typów. Dokonał również analizy przy wykorzystaniu transformaty falkowej wzajemnego związku pomiędzy cenami LMP i wartościami funkcji kosztów dostarczania energii w obliczeniach optymalizacji rozpływu mocy a skumulowanym przesunięciem obciążenia odbiorców.

Ciekawe jest opracowanie modelu chęci korzystania odbiorcy z urządzeń użytkowych przy wykorzystaniu logiki zbiorów rozmytych. Przedstawiona koncepcja, po jej weryfikacji pomiarowej, może być wykorzystywana dla oceny zmiany obciążenia odbiorców w sposób analityczny przy wyznaczaniu stanów pracy SEE, między innymi w obliczeniach optymalnych rozpływów mocy.

Wartościowa wydaje się opracowana metodyka optymalizacji pracy SEE przy uwzględnieniu zmienności obciążenia sterowanej logiką rozmytą, w celu uwzględnienia wpływu decyzji podejmowanych przez ludzi. Mechanizm oddziaływania cenowego na odbiorcę w praktyce powinien być jednak zdecydowanie uproszczony.

4. Pytania i uwagi szczegółowe

Uzyskane przez Autora wyniki zarówno w płaszczyźnie poznawczej jak i utylitarnej są cenne i interesujące. Lektura rozprawy skłania jednak do sformułowania kilku uwag, głównie o charakterze dyskusyjnym, mających na celu wyjaśnienie niektórych problemów.

1) W sformułowanej tezie (str. 12) Autor nie stosuje jawnie pojęcia elastyczności popytu znanego i stosowanego np. w związku z taryfami strefowymi. W dalszej części pracy (str. 23) Autor wymienia pojęcie elastyczność popytu bez bliższego wyjaśnienia i podania znanego wzoru na elastyczność cenową popytu. Jaki ma ono związek z rozwiązywanymi zagadnieniami?
2) W rozważaniach zawartych w rozprawie Autor pomija rolę taryf strefowych. Obecnie sygnały cenowe dla odbiorców występują w postaci ofert cen strefowych (str.24 stwierdzono brak takich sygnałów). Wybór taryf strefowych (liczba odbiorców taryfy G12) świadczy o liczbie odbiorców chętnych do zmiany swojego zachowania wskutek ceny. Także wśród czynników wpływających na profile obciążenia odbiorców domowych brak taryf strefowych (str. 71).
3) Niejednoznacznie określono dane charakteryzujące udział gospodarstw domowych . Na str. 11 podano, że „liczba indywidualnych domowych odbiorców energii elektrycznej z reguły wynosi około 20-30% wszystkich odbiorców". Podobnie na str. 21 podano, że indywidualni odbiorcy domowi stanowią około 20-30 % wszystkich uczestników rynku energii elektrycznej (sugeruje procentowy udział w liczbie). Niżej na tej samej stronie określono, że w Polsce ich udział w rynku energii stanowi 19,7%. Na stronie 33 podano, że udział gospodarstw domowych w obciążeniu krajowego systemu elektroenergetycznego wynoszący 20% dotyczy tylko czasu trwania szczytu popołudniowo-wieczornego.
4) Wśród grup odbiorców wyznaczonych ze względu na sposób użytkowania energii elektrycznej wyróżniono odbiorców „marnotrawnych". Jak został uwzględniony sposób użytkowania energii elektrycznej przez tych odbiorców ?
5) W rozdziale 4 opisano profile obciążenia odbiorców, wyznaczone na podstawie rejestracji obciążenia dwóch mieszkań w budynku wielolokalowym w dużym mieście (str. 80). Dlaczego taki wybór, zważając, że znaczna część odbiorców zaliczanych do gospodarstw domowych mieszka w domach indywidualnych (szacunkowo 50%). Zużycie lokalu nr 2 mniejsze od 500 kWh rocznie jest bardzo nietypowe (str. 85). Jak pomiary w dwóch mieszkaniach przeniosą się na grupy odbiorców przedstawiane w tabeli 2.2? Co Autor miał na uwadze pisząc o zgromadzonym obszernym materiale obejmującym profile obciążenia wybranych odbiorców energii elektrycznej (str. 13 pod celem pracy).
6) Jakie założenia (jakie modele) przyjęto odnośnie stanu naładowania zasobników oraz czasów pracy urządzeń w poszczególnych grupach odbiorców, które zostały wykorzystane w symulacji za pomocą generatora pseudolosowego.
7) Na rysunkach przedstawiających minutowy poziom cen węzłowych w wybranych godzinach doby (rys. 5.1, rys. 5.2 i dalsze tego typu) można było nanieść zmiany poziomu cen LMP bez przesunięcia (w treści podano wartość średnią).
8) Jak wyznaczono podane na str. 115 roczne oszczędności finansowe (od ok. 2,2 do ok.11,8) dla odbiorców domowych z systemu testowego 1 dla wariantów k=1 i k=7 (brak odpowiednika tabeli 5.9 dla godz. 17:00 – 20:00), a jak roczne oszczędności dla gospodarstwa domowego podane wnioskach (od ok. 4,4 do ok. 23,5) - str. 148.
9) Przedstawione w p. 5.1 rezultaty analizy wpływu przesunięcia użytkowania wybranych odbiorników na zmienność cen węzłowych wykazują bardzo mały zakres zmian. Jaka będzie efektywność oddziaływania tych zmian na zachowanie odbiorcy (na zmianę chęci załączania). Jak Autor rozprawy przewiduje możliwe wykorzystanie wyników prezentowanych badań w praktyce. Odbiorca musi mieć jasną informację, którą będzie motywowała go do zmiany sposobu użytkowania energii elektrycznej (musi widzieć wyraźną korzyść).

10) Wniosek o możliwości przewidywania zmian cen węzłowych (czy też korzyści wynikających ze zmiany sposobu użytkowania urządzeń) przez odbiorców na podstawie samej informacji o awariach w SEE wydaję się nierealny.
11) Jakie cechy przebiegu, inne niż widać z przebiegu czasowego obciążenia odbiorców, udało się wykryć przy wykorzystaniu przekształcenia falkowego - z obrazu graficznego? Jakie konkretne korzyści wynikają z analiz transformatą falkową koherencji cen LMP i wartości funkcji celu w optymalizacji, z różnymi wariantami zmian obciążeń, w porównaniu do prostej analizy wartości wyników obliczeń. Chociaż wyniki analiz zamieszczone w rozdziale 6 są dość ciekawe, wydaje się jednak, że nie wnoszą nic nowego a są dość skomplikowane.

5. Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca napisana jest poprawnie, posiada czytelny układ i przejrzysty podział treści na poszczególne rozdziały. Jest wolna od znaczących uchybień, posiada jednak drobne błędy i usterki redakcyjne. Są to:

- rys. 2.1 – w tekście pobór mocy a na rys. pobór energii,
- str. 43 – 2x ten sam numer równania (2.18),
- str. 49, wzór 2.44 – „σ – stała (zmienna o wartości pomiędzy od 0 do 1)" – powinno być – „σ – stała (przyjmująca wartość od 0 do 1)",
- str. 53 w p.7 – powinno być *przez* indywidualnych odbiorców, zamiast *przed* indywidulnych odbiorców,
- rys. 2.14 – przesunięte oznaczenie godziny 5:00 na osi czasu,
- str. 64, rys 2.19 – skala wykresu na nie pasuje do jego opisu,
- str. 90 góra – chyba chodzi o tab. 5.3 (w tekście jest tab. 6.3),
- str.91, 3 werset od dołu – powinno być *zimie* zamiast *ziemie,*
- str. 151 – powinno być w rozdziale 5 (jest w rozdziale 6).

6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Kaplara stanowi samodzielny dorobek Autora świadczący o opanowaniu określonych dziedzin wiedzy dotyczących dyscypliny elektrotechnika. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna a osiągnięte rezultaty mogą być pomocne w poszukiwaniu rozwiązań związanych z jej praktycznym wykorzystaniem.

Uwzględnienie przedstawionych w recenzji uwag, mogłoby podnieść walory merytoryczne i redakcyjne rozprawy. Uwagi te nie decydują jednak o ostatecznej opinii o pracy, którą oceniam pozytywnie.

Biorąc pod uwagę poziom zaprezentowanych badań, zastosowanie nowoczesnych metod obliczeniowych i oryginalne wyniki uzyskane przez Autora rozprawy, uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Kaplara pt.: "Wykorzystanie potencjału adaptacyjnego indywidualnych odbiorców energii elektrycznej w interakcji z systemem elektroenergetycznym" spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882) w odniesieniu do dyscypliny elektrotechnika.

W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie pracy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Frankowicz