



dr hab. Irena Wasiak, prof. uczelni

Politechnika Łódźka

Instytut Elektroenergetyki

Łódź, 14.08.2020

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki Kaczorowskiej p.t. „Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej do optymalizacji pracy mikro sieci”

- opracowana na zlecenie Przewodniczącego Komisji ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej,
w piśmie z dnia 24.06.2020 r.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca dotyczy zagadnień funkcjonowania sieci dystrybucyjnych z generacją rozproszoną. Przedmiotem pracy jest zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej do optymalizacji doboru urządzeń w układach zasilania odbiorców oraz do projektowania algorytmów sterowania mocą czynną w takich układach.

Tematyka pracy jest interesująca i bardzo aktualna. Wraz z rozwojem technologii źródeł energii i wzrostem udziału generacji rozproszonej w systemie elektroenergetycznym zmienia się struktura i charakter sieci dystrybucyjnych oraz ich funkcjonowanie. Integracja urządzeń zaliczanych do generacji rozproszonej, tj. źródeł i zasobników energii, w systemie elektroenergetycznym stwarza szereg problemów związanych z utrzymaniem wymaganej jakości energii, ale też daje nowe możliwości w zakresie zwiększenia niezawodności zasilania odbiorców. Bilansowanie mocy i energii oraz możliwość intencjonalnej pracy wyspowej wydzielonego mikrosystemu stają się pożądaną cechą sieci z generacją rozproszoną. Projektowanie takich układów pod kątem doboru współpracujących ze sobą urządzeń, jak również ich strategii i algorytmów sterowania zapewniających realizację wymaganych funkcji jest przedmiotem wielu prac badawczych i wskazuje kierunek rozwoju elektroenergetyki w przyszłości. W tym kontekście rozprawa doktorska p. mgr inż. Dominiki Kaczorowskiej bardzo dobrze wpisuje się w aktualny nurt badań poświęconych rozwojowi systemu elektroenergetycznego.

Obiektem badań Autorki jest układ zasilania odbiorcy zawierający własne źródło i zasobnik energii, pracujący w połączeniu z siecią dystrybucyjną. W pracy pokazano różne scenariusze sterowania przepływem mocy w układzie przez odpowiednie sterowanie pracą zasobnika energii oraz dobór źródła i zasobnika dla wybranego scenariusza. Do tego celu wykorzystano metodę optymalizacji rojem cząstek (*Particle Swarm Optimisation – PSO*), której wybór został poprzedzony wnikliwą analizą różnych metod inteligencji obliczeniowej.

Przedmiot rozprawy oraz cel postawiony przez Doktorantkę uważam za całkowicie uzasadnione.

Rozprawa doktorska obejmuje 139 stron, została zredagowana w 9 rozdziałach i uzupełniona wykazem najważniejszych oznaczeń oraz obszernym, liczącym 185 pozycji, spisem literatury. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do dalszej części pracy. Podano w nim uzasadnienie podjęcia tematu, tezę rozprawy oraz omówienie struktury pracy. Kolejne trzy



rozdziały zostały poświęcone metodom inteligencji obliczeniowej i ich zastosowaniu. W rozdziale piątym zawarta jest charakterystyka urządzeń generacji rozproszonej stosowanych w sieciach odbiorczych. W kolejnych dwóch rozdziałach Autorka przedstawiła zastosowanie metody optymalizacji rojem cząstek do doboru zasobnika energii i instalacji fotowoltaicznej oraz do sterowania przepływem mocy w mikrosystemie elektroenergetycznym. Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami wskazującymi kierunek dalszych badań, zamieszczonymi odpowiednio w rozdziale ósmym i dziewiątym.

2. Ocena merytoryczna pracy

Autorka sformułowała tezę rozprawy w brzmieniu: „*Metody inteligencji obliczeniowej są skutecznym narzędziem optymalizacji parametrów urządzeń pracujących w mikrosieci oraz algorytmów sterowania przepływem energii*”. Teza ta jest oczywiście jasna, ale nie do końca precyzyjna, ponieważ do wspomnianej optymalizacji Autorka zastosowała tylko jedną z opisywanych wcześniej metod.

Opis i analiza metod inteligencji obliczeniowej i ich zastosowań jest ciekawym poznawczo elementem pracy. Opis został przygotowany na podstawie literatury, głównie pozycji zagranicznych. Przegląd literatury jest obszerny i stanowi swoisty walor pracy. Sam opis działania algorytmów jest zwięzły, ale klarowny, czyta się go z zainteresowaniem. Autorka uwzględniła w nim 13 różnych algorytmów, w tym 6 algorytmów zaliczanych do grupy algorytmów rojowych i 3 algorytmy z grupy praw fizycznych. Dla czterech wybranych, stosowanych najczęściej algorytmów optymalizacyjnych, Doktorantka wykonała wstępne badania porównawcze przy wykorzystaniu tych samych funkcji testowych: Rastrigina, Rosenbrocka i Sphere. Sprawdzany był czas działania algorytmów, sposób dochodzenia do minimalnej wartości funkcji celu oraz błąd rozwiązania. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że najkorzystniejszymi własnościami charakteryzuje się algorytm PSO i ten właśnie wybrano do dalszych badań i zastosowań.

Algorytm roju cząstek przetestowano w szerokim zakresie, przy zastosowaniu 12 różnych funkcji testowych. Analizowano wpływ na działanie algorytmu wielkości takich jak funkcja inercji, współczynnik przyspieszenia, wielkość roju i liczba iteracji. Dla 13 różnych funkcji inercji, wybranych na podstawie literatury, określono średni błąd obliczeń optymalizacyjnych, medianę błędów oraz średnią liczbę iteracji. Wykazano zależność pomiędzy współczynnikami przyspieszenia, dla których błąd rozwiązania jest najmniejszy, a postacią funkcji inercji.

W moim przekonaniu prezentowane w pracy badania dotyczące własności algorytmu rojowego zostały zrealizowane na wysokim poziomie merytorycznym. Na podkreślenie zasługuje właściwa metodyka prowadzenia badań, wszechstronna analiza skuteczności metody, logiczny i syntetyczny sposób prezentacji wyników oraz prawidłowe wnioskowanie.

Dalsza część rozprawy poświęcona została wykorzystaniu algorytmu PSO w zagadnieniach optymalizacji mikrosystemów elektroenergetycznych niskiego napięcia. Autorka nazywa te układy mikrosieciami, powołując się na literaturę zagraniczną. O ile w języku angielskim nazwa ta nie budzi wątpliwości (w języku angielskim *microgrids*), o tyle w brzmieniu polskim nie jest moim zdaniem trafna, gdyż nie oddaje właściwego charakteru tych układów, które ze względu na obecność źródeł, a przede wszystkim zdolność do pracy autonomicznej (z definicji) mają cechy systemu elektroenergetycznego, oczywiście w stosownej do rozmiaru skali.

Definicja mikrosieci oraz opis wykorzystywanych najczęściej urządzeń generacji rozproszonej zostały podane na podstawie literatury. Opis jest bardzo zwięzły, a w przypadku źródeł ogranicza się do wyjaśnienia zastosowanej technologii i sprawności przemiany energii.

Więcej uwagi poświęcono charakterystyce zasobników energii, które w kolejnych rozdziałach pracy stały się przedmiotem optymalizacji.

Metodę optymalizacji rojem cząstek Autorka zastosowała do dwóch rodzajów zagadnień: doboru urządzeń, tutaj źródła i zasobnika energii, oraz projektowania sposobu sterowania pracą zasobnika. W pierwszym przypadku założono, że algorytm sterowania zasobnikiem jest znany. Rozważono różne scenariusze sterowania, z których wynika rozptył mocy w układzie. Dla wybranego scenariusza, w którym zadawane są współczynniki określające stopień ładowania/rozładowania zasobnika, wykonano obliczenia optymalnych wartości mocy znamionowej źródła oraz mocy i pojemności zasobnika energii. Obliczenia wykonano dla okresu rocznego, przyjmując profile generacji i zapotrzebowania jako dane wejściowe. Wnioski podane w podsumowaniu obliczeń są oczekiwane i prawidłowe.

Drugie zagadnienie, w którym wykorzystano metodę PSO dotyczy sterowania zasobnikiem dla uzyskania określonego rozptyłu mocy w mikrosystemie. Rozważono algorytm wyrównywania mocy wymienianej z siecią zasilającą do zadanego poziomu, przy czym poziom ten określano jako wartość stałą w dobowym okresie analizy lub też jako zadaną funkcję. Wyznaczono dobowy profil ładowania i rozładowania zasobnika dla uzyskania zmian mocy wymienianej pomiędzy mikrosystemem, a siecią zasilającą według założonej funkcji. W istocie nie jest to optymalizacja scenariusza sterowania, a raczej optymalne dopasowanie działania zasobnika do realizacji zadanego (niekoniecznie optymalnego) scenariusza.

Czytając rozdziały 6 i 7 pracy można przypuszczać, że głównym zamierzeniem Autorki było pokazanie różnych możliwości sterowania pracą zasobnika pod kątem kształtowania profilu mocy wymienianej z siecią zasilającą, natomiast mniejszą wagę przyłożono do uzasadnienia rozpatrywanych scenariuszy. Tymczasem uwarunkowania praktyczne oraz jasno określony cel zastosowania zasobnika w rozpatrywanym układzie zwykle ograniczają liczbę uzasadnionych scenariuszy sterowania jego pracą. Zastosowanie zasobników w istniejących sieciach i układach elektroenergetycznych jest najczęściej podyktowane chęcią obniżenia kosztów eksploatacyjnych lub też względami technicznymi, zwykle związanymi z ograniczoną przepustowością urządzeń sieciowych. W przypadku projektowanych mikrosystemów obszar zastosowań uwzględnia także sposób realizacji pracy wyspowej układu. W moim odczuciu w pracy brakuje sprecyzowania założeń lub też warunków, które mogłyby stanowić pewne kryterium wyboru określonego scenariusza sterowania w rozpatrywanym mikrosystemie. W tym kontekście byłoby pożądane wskazanie, w jakich przypadkach mogą znaleźć zastosowanie poszczególne algorytmy prezentowane w pracy.

Pewne zastrzeżenia budzi sposób przedstawienia problemu optymalnego doboru urządzeń w mikrosystemie. Opis jest zbyt powierzchowny i nie wyjaśnia odpowiednio postaci funkcji celu, przyjętych zmiennych i ograniczeń. Można zastanawiać się dlaczego nie powiązano optymalizacji doboru urządzeń mikrosystemu z kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi, jak to zwykle ma miejsce w rozwiązywaniu tego rodzaju problemów w elektroenergetyce. Bez szczegółowego opisu problemu i przyjętych założeń trudno jest właściwie ocenić wyniki optymalizacji. Lektura tej części pracy pozostawia niedosyt.

Szczegółowe pytania i uwagi merytoryczne zamieściłam w rozdziale 3 recenzji.

W podsumowaniu oceny merytorycznej pracy mogę stwierdzić, że wyniki zawarte w rozprawie są oryginalne, interesujące i wartościowe z naukowego oraz praktycznego punktu widzenia. Główne osiągnięcia Autorki, za które uważam:

- obszerną i krytyczną analizę właściwości algorytmów inteligencji obliczeniowej, a w szczególności cech algorytmu rojowego,
- pokazanie możliwości wykorzystania algorytmu rojowego w wybranych zagadnieniach optymalizacji mikrosystemów elektroenergetycznych.

mają walory poznawcze i stanowią dowód słuszności tezy postawionej w pracy. Na podkreślenie zasługuje obszerność przeprowadzonych badań.

Praca jest napisana w sposób w większości dostatecznie jasny, choć – jak stwierdzono powyżej – miejscami ogólny i nadmiernie zwięzły, co osłabia jasność prowadzonego wywodu i wywołuje wątpliwości i pytania. Układ pracy jest logiczny, a redakcja staranna, choć zdarzają się usterki językowe i formalne.

Szczegółowe uwagi dotyczące wybranych usterek o charakterze językowym i edytorskim zamieściłam w załączniku do recenzji.

3. Uwagi i pytania merytoryczne

Poniżej przedstawiam główne pytania i uwagi merytoryczne, jakie nasuwają się po lekturze pracy.

1. Na str. 56 rozprawy (p.4.1) Autorka pisze: „*W zminimalizowaniu negatywnych skutków coraz większej ilości źródeł energii pomóc może wydzielenie części zasobów i łączenie ich w mikrosieci*”. Proszę o wyjaśnienie o jakich skutkach jest mowa, co to znaczy łączenie części zasobów w mikrosieci i w jaki sposób takie działanie ma pomóc w zminimalizowaniu negatywnych skutków zwiększania liczby źródeł rozproszonych w systemie elektroenergetycznym.

Podobna uwaga dotyczy zapisu na stronie 58: „*...popularnością cieszy się wydzielanie mniejszych jednostek w obrębie systemu dystrybucyjnego – mikrosieci..*”. Autorka nie wyjaśnia co dokładnie oznacza owo „*wydzielanie*”. Jeżeli uwzględnić podaną poniżej definicję mikrosieci należałoby sądzić, że „*wydzielenie*” oznacza możliwość pracy autonomicznej układu. W takim przypadku trudno jednak zgodzić się, że ten sposób pracy cieszy się coraz większą popularnością, ponieważ w chwili obecnej brak jest odpowiednich układów pomiarowo-kontrolnych i sterujących, które umożliwiłyby taką pracę (za wyjątkiem układów zasilania specjalnie projektowanych do pracy wyspowej), a ponadto, obowiązujące przepisy prawne wymagają wyłączenia źródeł w przypadku zakłócenia w sieci elektroenergetycznej, do której są przyłączone.

2. Wskazane byłoby uzupełnienie informacji dotyczących wykresów obciążenia podanych na rys. 5.10-5.15. Jakie były źródła przedstawionych wyników? Jaka jest rozdzielczość czasowa tych wyników (czas uśredniania)?
3. W tytule rozdziału 6 zapisano „*zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej do optymalizacji parametrów mikrosieci*”. W elektroenergetyce pod taką nazwą rozumie się napięcie znamionowe, czy też wartości kilometryczne rezystancji i reaktancji linii, natomiast przedstawiona w pracy optymalizacja dotyczy mocy znamionowej urządzeń, które nie są parametrami mikrosieci. Można zauważyć, że pojęcie „*parametry*” jest w pracy używane dość często, poczynając od „*parametrów algorytmu*”, poprzez wspomniane powyżej „*parametry mikrosieci*” do „*parametrów scenariusza*” i „*parametrów funkcji celu*”. Wymaga to precyzji w opisie zadania optymalizacyjnego, której w niektórych miejscach brakuje.
4. Scenariusz pokazany za pomocą schematu blokowego na rys. 6.4 (str. 72) Autorka nazywa „*minimalizowaniem mocy pobieranej i wysyłanej do systemu elektroenergetycznego*”. Scenariusz polega na realizacji mocy wymiany według wyznaczonych współczynników P_1 i P_2 , tymczasem minimalna moc wymiany wystąpi wtedy, gdy zasobnik będzie przejmował nadmiar i uzupełniał niedobór mocy generowanej w mikrosystemie w stosunku do mocy odbioru. Nie widać też minimalizacji mocy wymiany na rys. 6.13

- w porównaniu z rys. 6.10. Czy Autorka miała na myśli ograniczanie największych wartości mocy? Proszę o wyjaśnienie.
5. W jaki sposób wyznaczone są współczynniki alfa i beta w scenariuszu pokazanym na schemacie blokowym z rys. 6.5 i jaka była ich wartość dla rozptyłów mocy pokazanych na rysunkach 6.16-6.18?
 6. Proszę o wyjaśnienie jaki jest czas uśredniania wyników podanych na rysunkach rys. 6.7, 6.8, 6.10 i dalej. Dla ilustracji działania zasobnika przy różnych algorytmach sterowania, korzystniejsze byłoby przedstawienie bilansu mocy w mikrosystemie w mniejszych, np. dobowych okresach czasu.
 7. Na str. 80, w „Podsumowaniu rozptyłów mocy...” zapisano, że „Odpowiednia strategia sterowania pozwala nie tylko zoptymalizować wartości poszczególnych elementów wchodzących w skład mikrosieci, ale również potem efektywnie sterować ich pracą”. Trudno nie zgodzić się z Autorką co do istotności strategii sterowania zasobnikiem, ale strategii nie dobiera się do optymalizacji tylko do założonych funkcji zasobnika, a dopiero potem optymalizuje się parametry urządzenia.
 8. Proszę o sformułowanie problemu optymalizacyjnego, który opisuje funkcja celu przedstawiona równaniem 6.1. Jakie wagi przyjęto dla poszczególnych składników funkcji i jaki jest ich wymiar? Czy suma współczynników wagi jest określona?
 9. Dlaczego do powyższej optymalizacji nie wybrano scenariusza zapewniającego minimalną moc wymiany z siecią zasilającą? Jaki byłby wynik obliczeń dla takiego scenariusza przy pominięciu mocy wymiany jako zmiennej w równaniu 6.1?
 10. Z rys. 6.12, 6.66 - 6.73 i analogicznych dalszych wynika, że dopuszcza się całkowite rozładowanie zasobnika. Dlaczego nie przyjęto typowych, podawanych przez producenta, ograniczeń na moc rozładowania?
 11. Dla zapewnienia ciągłości pracy zasobnika powinno być spełnione wymaganie, aby stan naładowania zasobnika na początku i końcu okresu optymalizacji był taki sam. Dlaczego nie zapewniono spełnienia tego warunku w rozpatrywanych scenariuszach?
 12. Proszę o wyjaśnienie z czego wynika początkowa pojemność zasobnika dla scenariuszy prezentowanych na str. 105, rys. 7.10-7.13.
 13. Czy algorytm rojowy może znaleźć zastosowanie w sterowaniu pracą mikrosystemów on-line? Jakie wymagania powinny być spełnione w takim przypadku i jakie są ograniczenia metody?

4. Wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter dyskusyjny oraz porządkujący i nie kwestionują zasadniczych wyników rozprawy oraz oryginalnych osiągnięć Autorki, które oceniam bardzo pozytywnie. Doktorantka wykazała się umiejętnością prowadzenia badań naukowych, ciekawością i pasją badacza oraz ogólną wiedzą z obszaru elektrotechniki.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Dominiki Kaczorowskiej całkowicie spełnia wymagania stawiane takim rozprawom przez ustawy z dnia 14.03.2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich (Dziennik Ustaw nr 65 poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami) oraz wymagania rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej Sportu z dnia 15.01.2004 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim i habilitacyjnym. Wniosuję o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów postępowania przewidzianego w przewodach doktorskich.

W. Dawra

Załącznik

Wybrane uwagi językowe i edytorskie

(w poniższym wykazie przyjęto następujący sposób oznaczania: w – wiersz, g – góra, d – dół)

1. Str. 44: Brak odwołania w tekście do tabel 3.9-3.12.
2. Str. 50: rys. 3.6, 3.7: Oznaczenia *ss* i *mi* są niejasne.
3. Str. 56, w10g: Powinno być „*odbiorcy*” zamiast „*odbiorcy*”. Odbiorcy nie są równoważni urządzeniom sieciowym.
4. Str. 56, w10g: Czy rzeczywiście wskazana pozycja literatury [44] jest właściwa do stwierdzenia jakie elementy wchodzi w skład systemu elektroenergetycznego? Na ten temat istnieje wiele znanych pozycji specjalistycznych.
5. Str. 56, w17g: Powinno być „*liczba źródeł*”, a nie „*ilość źródeł*”.
6. Str. 56: Zwraca uwagę wydzielenie tekstu dotyczącego zastosowania algorytmów inteligencji obliczeniowej w elektrotechnice jako odrębnego rozdziału (rozdział 4). Rozdział 4 ma objętość 2 stron, a np. podrozdział 4.1 mniej niż ½ strony.
7. Str. 58, w16g: Jest pewną niezręcznością odwoływanie się do własnej publikacji ([76]) przy przytaczaniu definicji mikrosieci; źródła tej definicji są inne.
14. Str. 59, w17g: Niepoprawne sformułowanie, mikroturbiny nie generują napięcia stałego, choć oczywiście wymagają przekształtnika do połączenia z siecią zasilającą.
8. Str. 60, w13g: Losowy charakter generacji źródeł zainstalowanych w mikrosystemie nie jest jedynym powodem stosowania zasobników energii.
9. Str. 60, w22g: Sformułowanie „*zasobniki wyposażone są w systemy monitorujące częstotliwość napięcia, dzięki temu zasobnik...może wspomóc kontrolowanie poziomów napięć.....*” jest niepoprawne.
10. Str. 60, w2d: Sformułowanie „*zasobnik energii może absorbować wahania napięcia równie dobrze, co inne urządzenia łagodzące, np. przesuwniki fazowe*” nie jest poprawne. Przesuwniki fazowe nie służą do kompensacji wahań.
11. Str. 61, w5d: Powinno być „*liczba cykli ładowania*”, a nie „*ilość cykli ładowania*”.
15. Jakie powinno być oznaczenie pojemności akumulatora, *Q* – jak na str. 63, czy *C* – jak na str. 64? Jeżeli „*szybkość rozładowania definiowana jest przez prąd, którym akumulator jest rozładowywany*” (w9g), to co oznacza sformułowanie „*...szybkość rozładowania wyniesie 0,5 C*” (w12g)? Brak precyzji w opisie widoczny jest również na str. 66 (w2g), gdzie prędkość ładowania / rozładowania zasobnika podaje się przez moc
12. Str. 70, rys. 5.16: Błędne oznaczenie osi pionowej. Rysunek przedstawia zmianę mocy, nie energii.
13. Str. 72 i dalej: Brak konsekwencji w oznaczaniu mocy na rysunkach (np. rys. 6.3, 6.7, 6.8, 6.10). Znaki mocy na rysunku są niezgodne z zasadą opisaną na str. 75.
14. Str.73, rys. 6.5: Błąd w schemacie blokowym (środkowy blok z prawej strony); zamiast $P_{\text{ład}}$ winno być P_{zas} .
15. Str. 76, rys. 6.10: Niezgodność oznaczeń – P_{odb} na rysunku i P_{obc} w podpisie. To samo na rysunku 6.13.
16. Str. 76, podpis pod rys. 6.11: W sieci bez zasobnika moc obciążenia pokrywana jest nie tylko z sieci zewnętrznej, ale także ze źródła PV.

17. Str. 77, w4d: Niezręczność sformułowania „...przepływ energii z zadanymi parametrami..”
Parametry energii nie dotyczą przepływu. Jakie wartości współczynników alfa i beta przyjęto do obliczeń?
18. Str. 89, akapit pod tabelą 6.6: Nieprawidłowe wyrażenia, tj. „wartość zasobnika”, „wielkość mocy zainstalowanej”,
19. Str. 124, w7d: Straty w liniach elektroenergetycznych nie są parametrem sieci, ani parametrem jakości energii. Poziomy napięć zwykle stanowią ograniczenia w rozwiązywaniu problemów optymalizacyjnych.
20. Str. 124, w9d: Niezręczne sformułowanie „badania metodą zmiennoprądową mają niebagatelny wpływ na parametry jakości energii”. Jakość energii zależy od pracy systemu elektroenergetycznego, a nie od badań.

Wawra

