

Zastosowanie algorytmu ewolucyjno-fajerwerkowego do optymalizacji rozpliwów mocy w systemach elektroenergetycznych

Streszczenie. Artykuł przedstawia hybrydowy algorytm ewolucyjno-fajerwerkowy zastosowany do optymalizacji rozpliwów mocy w wybranych strukturach systemów elektroenergetycznych. Zaprezentowane w artykule wyniki analiz przedstawiają możliwości zaproponowanego hybrydowego algorytmu zilustrowane i opisane na przykładzie wybranych zadań optymalizacyjnych. (*Application of the evolutionary-fireworks algorithm to optimize power flows in power systems*)

Abstract. The article presents a hybrid evolutionary-fireworks algorithm used to optimize power flows in selected structures of power systems. The analysis results presented in the article present the possibilities of the proposed hybrid algorithm, illustrated and described on the example of selected optimization tasks.

Słowa kluczowe: sieci elektroenergetyczne, optymalizacja, metody ewolucyjne, algorytm fajerwerkowy
Keywords: power grids, optimization, evolutionary methods, fireworks algorithm

Wprowadzenie

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie hybrydowego algorytmu łączącego obliczenia symulowanej ewolucji z koncepcją algorytmu fajerwerkowego. Efektywność zastosowanego podejścia obliczeniowego przeanalizowano porównując rezultaty uzyskane wybranymi algorytmami heurystycznymi dla problemu optymalizacji rozpliwów mocy [8,9,10] w strukturach systemów elektroenergetycznych. Analizy wykonano w programie Matlab oraz pakiecie Matpower [1,3,14], zawierającym algorytmy do obliczeń elektroenergetycznych.

Algorytm ewolucyjny realizuje obliczenia tzw. symulowanej ewolucji rozwiązań. Natomiast algorytm fajerwerkowy należy do grupy algorytmów rojowych i wykorzystuje opis położenia (lokalizacji w przestrzeni) rozbłysków fajerwerkowych [4,5,7]. Działanie algorytmu ewolucyjnego [2,6,11] i algorytmu fajerwerkowego [5,13] są znane i opisane w literaturze. Dlatego skupiono się na autorskiej propozycji hybrydowego podejścia.

Podejście łączące wymienione algorytmy wykorzystywano także w pracy [12]. Przedstawiono tam optymalizację ewolucyjną przepływu materiału w procesie formowania wtryskowego komponentów dla branży motoryzacyjnej. Przeanalizowano także skuteczność zintegrowanego podejścia algorytmu fajerwerkowego i ewolucyjnego dla problemów optymalizacji przepływu materiału w procesach produkcyjnych [12]. W niniejszym artykule zaproponowano nową alternatywną koncepcję połączenia tych algorytmów, polegającą głównie na włączeniu do operatorów rekombinacji algorytmu ewolucyjnego procedur bazujących na symulowaniu rozbłysków wtórnych, realizowanych według zmodyfikowanych procedur algorytmu fajerwerkowego. Zaprezentowano zastosowanie hybrydowego algorytmu do obliczeń elektroenergetycznych.

Zastosowana metodyka obliczeń

Oryginalnym wkładem artykułu jest koncepcja ewolucyjno-fajerwerkowego algorytmu zastosowanego do optymalizacji rozpliwów mocy w układach elektroenergetycznych. Poniżej przedstawiono opis i tzw. „pseudo code” algorytmu. Dla algorytmu ewolucyjnego kluczowe parametry to $m.in.$: rozmiar populacji, intensywność stosowania operatorów rekombinacji oraz dobór metod skalowania i selekcji.

Dla algorytmu fajerwerkowego główne parametry to: liczba iskier głównych, amplituda rozbłysków oraz intensywność rozbłysków wtórnych. Poniżej zamieszczono

tzw. „pseudo code” dla zaproponowanego hybrydowego algorytmu:

- generacja populacji n rozwiązań określających lokalizację fajerwerków (rozbłysków iskier głównych),
- ocena rozwiązań zawartych w utworzonej populacji,
- proces selekcji ponadprzeciętnych rozwiązań,
 - główna pętla AE (dopóki kryteria stopu = fałsz) wykonaj
 - określenie parametrów pracy algorytmu,
 - pętla „for: dla każdego z n fajerwerków wykonaj
 - określenie lokalizacji iskry dla x_i fajerwerku,
 - określenie ilości iskier wtórnych s_i dla danego fajerwerku,
 - zastosowanie operatorów rekombinacji tworzących podpopulację lokalizacji rozbłysków wtórnych,
 - ocena lokalizacji iskier wtórnych w utworzonej podpopulacji,
 - wyznaczenie iskry o najlepszej lokalizacji i przeniesienie jej do populacji głównej,
 - koniec pętli for
 - sprawdzenie kryterium zatrzymania obliczeń,
 - koniec pętli algorytmu ewolucyjnego,
 - wyprowadzenie wyników

Zaproponowany algorytm hybrydowy opiera się na założeniu, że algorytm ewolucyjny jest głównym algorytmem, który konfiguruje nowe rozwiązania (co odpowiada przetwarzaniu położenia głównych iskier) natomiast zmodyfikowany algorytm fajerwerkowy (włączony do procedur operatora krzyżowania) realizuje obliczenia dla punktów generowanych wokół rozbłysku głównego (co odpowiada generowaniu nowych lokalizacji rozbłysków wtórnych). Dodatkowo do obliczeń można włączyć repozytorium w którym zapisywane będą odszukane ponadprzeciętnie oceniane rozwiązania (pochodzące zarówno od iskier głównych jak też iskier wtórnych) przy uwzględnieniu metody ścisłu. W algorytmie zastosowano zawarte w funkcji ag programu Matlab operatory rekombinacji umożliwiające przenoszenie cząstkowych rozwiązań (dotyczących lokalizacji iskier głównych, amplitudy rozbłysków, oraz intensywność rozbłysków wtórnych) pomiędzy skonfigurowanymi nowymi rozwiązaniami z wykorzystaniem zmodyfikowanego operatora krzyżowania oraz operatora mutacji. Główną korzyścią zaproponowanego hybrydowego podejścia obliczeniowego jest możliwość zwiększenia intensywności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań dla pojedynczej iteracji, jest to realizowane kosztem zwiększonego nakładu obliczeniowego ale w rezultacie uzyskuje się poprawę efektywności algorytmu.

Ważnym elementem obliczeń opisywanej metody jest sposób kodowania rozwiązań. Zastosowano metodę

kodowania wariantowych rozwiązań w której w wektorach rzeczywisto-liczbowych zapisywane są zmienne opisujące lokalizacje iskier głównych, amplitudę wybuchów, oraz intensywność iskier wtórnych.

Operatory tworzące nowe warianty rozwiązań stosowane w algorytmach ewolucyjnych mają swoje ograniczenia. Zastosowanie hybrydowego podejścia pozwala na tworzenie bardziej różnorodnych wariantów rozwiązań poprzez włączenie do procesu obliczeniowego mechanizmów obliczeniowych algorytmu fajerwerkowego co daje nowe możliwości zwiększenia różnorodności tworzonych rozwiązań. Zaproponowany algorytm oprócz tworzonych wariantów rozwiązań (co odpowiada określaniu lokalizacji iskier głównych), wykonuje również przeszukiwanie sąsiednich lokalizacji. Algorytm fajerwerkowy w zastosowanym hybrydowym podejściu realizowany jest na małej podpopulacji rozwiązań tworzonej przez zmodyfikowany operator krzyżowania. Opracowana koncepcja operatora krzyżowania (w postaci m-pliku programu Matlab), opiera się na krokach:

- selekcja rozwiązań z bieżącej populacji,
- tworzenie nowych wariantów rozwiązań przy zastosowaniu koncepcji rozbłysków wtórnych o założonej intensywności,
- ocena podpopulacji rozwiązań i włączanie do populacji głównej najlepszego wariantu rozwiązania.

Rozmiar podpopulacji algorytmu fajerwerkowego określający ilość rozbłysków wtórnych z przedziału 2÷8. Zastosowane operatory rekombinacji modyfikują i tworzą nowe warianty rozwiązań w postaci:

- lokalizacji rozbłysków głównych i wtórnych,
- wyznaczania wskaźników określających amplitudę rozbłysków wtórnych i ich intensywność występowania.

W analizach uwzględniono kryterium optymalizacji rozpyływów mocy w systemie. Funkcję celu dla rozpatrywanego problemu optymalizacji można przedstawić jako sumę funkcji kosztów generacji energii w węzłach generacji:

$$(1) \quad f_5(x) = \min_{Q, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(P_g^i) + f_Q^i(Q_g^i)$$

gdzie: P_g, Q_g - wektory wartości generowanych mocy czynnych i biernych,

Do obliczeń porównawczych wykorzystano funkcję „runopf” pakietu Matpower [5], która realizuje obliczenia (dla analizowanego problemu) na podstawie twierdzenia Lagrange'a oraz warunków Kuhna-Tuckera. Warunki te są równoważne warunkom istnienia punktu siodłowego funkcji Lagrange'a, zbudowanej na funkcji $f(x)$ przy ograniczeniach $g_i(x)$, co opisują wzory:

$$(2) \quad \min_x f(x) \quad x = \begin{bmatrix} Q \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix}$$

$$(3) \quad g_P(Q, V_m, P_g) = P_b(Q, V_m) + P_d - C_g \cdot P_g$$

$$g_Q(Q, V_m, Q_g) = Q_b(Q, V_m) + Q_d - C_g \cdot Q_g$$

gdzie: Q - wektor wartości kątów przesunięcia napięcia, V_m - wektor wartości napięć węzłowych, C_g - macierz połączeń.

W początkowym etapie analiz testowych stosowano opracowaną funkcję celu obliczano według formuły:

$$(4) \quad F_c(x) = \min f(x_j) = \left(\frac{0.2 \cdot I_1(x_j) + 0.8 \cdot I_2(x_j)}{2} \right)$$

przy czym: $I_1(x_j)$ - położenie rozbłysku j -tej iskry głównej, $I_2(x_j)$ - położenie rozbłysku najlepiej ocenianej iskry wtórnej.

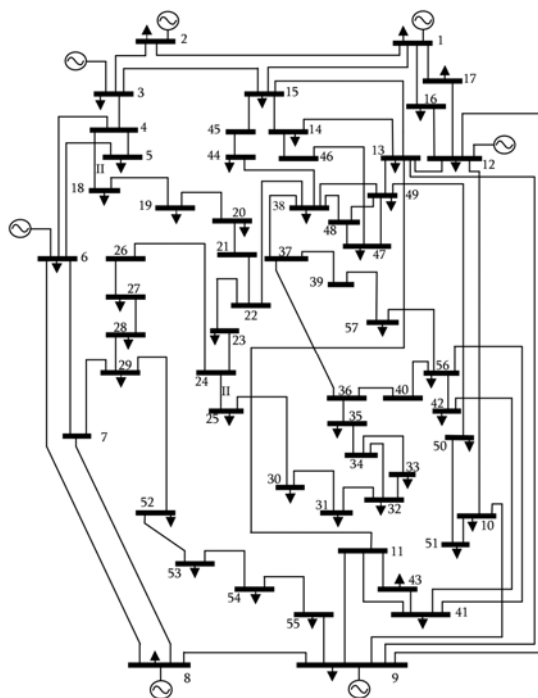
Analizy których rezultaty zamieszczono w kolejnym punkcie zrealizowano przy wykorzystaniu algorytmów heurystycznych, jednakże wartości funkcji celu obliczano według takiej samej formuły jak w pakiecie Matpower. Lokalizacje rozbłysków iskier głównych i rozbłysków wtórnych odpowiadały różnym wartościom rozwiązań dla analizowanego zadania. Określenie lokalizacji fajerwerków oznaczało obliczenie wartości zmiennych decyzyjnych oraz wartości funkcji celu. W zastosowanym sposobie kodowania rozwiązań zmienne decyzyjne określały po dekodowaniu poziomy generowanych mocy w poszczególnych źródłach przy uwzględnieniu węzła bilansującego. Zastosowany sposób kodowania uwzględnia ograniczone zakresy wartości zmiennych decyzyjnych.

Wyniki analiz obliczeniowych

Analizowano struktury sieci zapisane w postaci plików pakietu Matpower opisujących w postaci macierzowej różne struktury systemów elektroenergetycznych. W tym punkcie porównano wyniki obliczeń z wykorzystaniem trzech algorytmów:

- algorytmu cząstek roju,
- algorytmu ewolucyjnego,
- algorytmu hybrydowego łączącego algorytm ewolucyjny oraz algorytm fajerwerkowy.

Dla zastosowanych algorytmów populacyjnych istnieje możliwość tworzenia populacji początkowej rozwiązań przy generacji której uwzględniano by wstępnie wyznaczone rozpyły mocy wybranym algorytmem rozpyłowym. Jednakże rezultaty zaprezentowane w artykule uzyskano przy zastosowaniu generowanych losowo początkowych populacji rozwiązań. Analizy obliczeniowe zrealizowano z wykorzystaniem przykładowych struktur systemów elektroenergetycznych zapisanych w plikach pakietu Matpower takich jak: „case57” (rys. 1), „case118” oraz „case300”, które w nazwach zawierają liczbę węzłów w danych struktur.

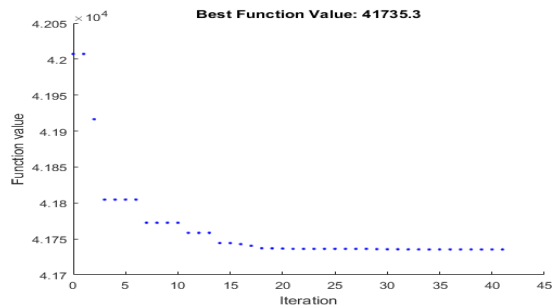


Rys. 1. Schemat struktury „case57”, IEEE 57-bus test system [15]

Obliczenia podstawowym algorytmem ewolucyjnym wykonano z następującymi parametrami: liczebnością populacji rozwiązań w zakresie od 300 – 500 elementów, prawdopodobieństwo operatora krzyżowania 0.98, natomiast prawdopodobieństwo operatora mutacji 0.07. Obliczenia hybrydowym algorytmem ewolucyjnym wykonano przy tych samych parametrach jak powyżej. Uzyskane w podejściu hybrydowym pozytywne efekty to poprawa efektywności algorytmu przy takiej samej liczbie iteracji jak w wersji podstawowej algorytmu ewolucyjnego. Poprawa efektywności m.in. wynika z faktu, iż w algorytmie hybrydowym operatory krzyżowania mają szerszy zakres możliwości tworzenia nowych bardziej różnorodnych struktur wariantowych rozwiązań, niż klasyczne operatory rekombinacji. Umożliwia to utworzenie dodatkowych wariantów rozwiązań poprzez modyfikacje wariantów utworzonych klasycznymi operatorami rekombinacji.

Obliczenia zrealizowano dla trzech struktur systemów elektroenergetycznych zapisanych w plikach pakietu Matpower takich jak: „case57”, „case118” oraz „case300”. Dla tych struktur wyznaczono optymalne rozplywy mocy funkcją „runopf” (wykorzystującej klasyczne metody optymalizacji). Uzyskane tą funkcją wyniki porównano z wynikami uzyskanymi przy pomocy trzech wybranych algorytmów heurystycznych. W szczególności takie porównanie przedstawiają rysunki 4 i 8 oraz 11 na których w powiększeniu przedstawione te fragmenty z przebiegu obliczeń na których dokładniej widać porównanie rezultatów algorytmów. Na wymienionych wykresach można zauważyć, iż algorytm cząstek roju najszybciej odszukuje optymalne rozwiązania. Można także zauważyć, że hybrydowy algorytm pozwala uzyskać te same lub bardzo zbliżone rezultaty jak algorytm cząstek roju, przy nieco większej liczbie iteracji.

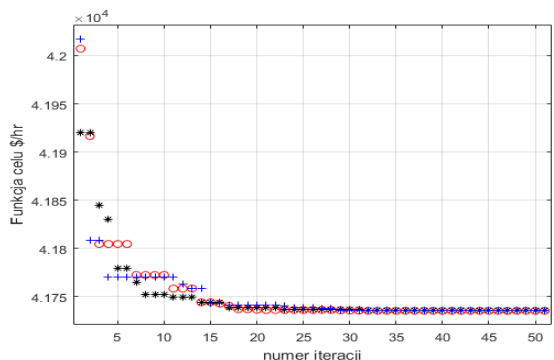
Algorytm hybrydowy w analizowanych przypadkach uzyskuje lepszą efektywność niż podstawy algorytm ewolucyjny. Dla struktury zawierającej 57 węzłów minimalna wartość funkcji celu wyznaczona funkcją „runopf” (pakietu Matpower) wynosi 41737 \$/hr. Na wykresie 2 przedstawiono przebieg procesu odszukiwania optymalnego rozplywu mocy dla struktury „case57” algorytmem cząstek roju.



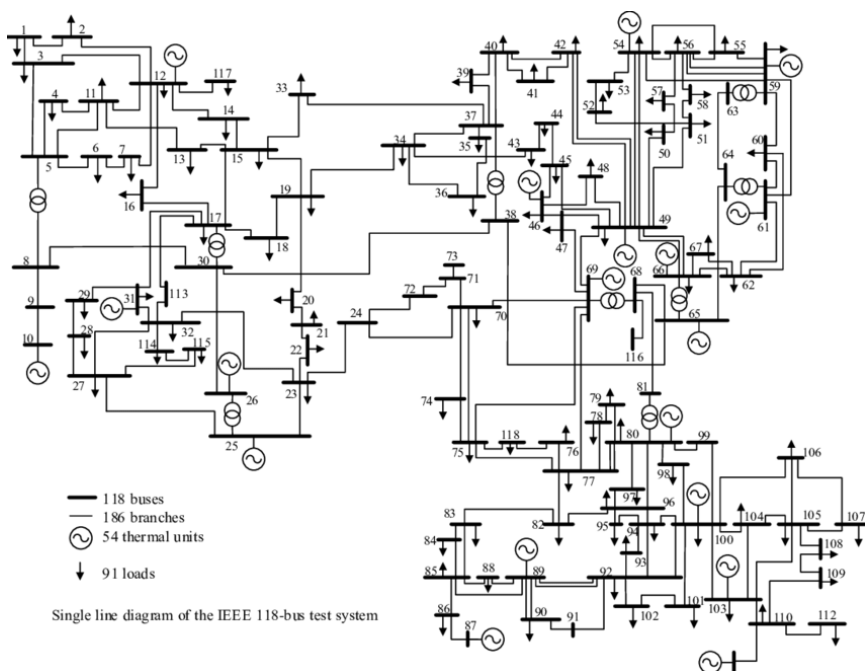
Rys. 2. Przebieg obliczeń optymalnych rozplywów mocy dla struktury opisanej w pliku „case57” algorytmem cząstek roju

Uzyskano taki sam wynik jak funkcją „runopf”, następnie na rysunkach 3 oraz 4 zaprezentowano przebieg odszukiwania tego rozwiązania trzema algorytmami. Na wykresach porównujących wybrane do analiz wykresy wprowadzono następujące oznaczenia + - algorytm ewolucyjny, o - algorytm cząstek roju, * - algorytm hybrydowy.

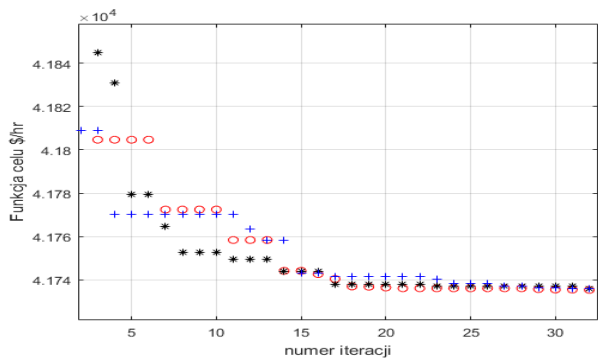
Na wykresie 4 przedstawiono powiększony środkowy fragment wykresu 3 w celu porównania krzywych obrazujących przebieg obliczeń trzema algorytmami.



Rys. 3. Wyniki obliczeń optymalnych rozplywów mocy uzyskane dla struktury 57 węzłowej trzema algorytmami



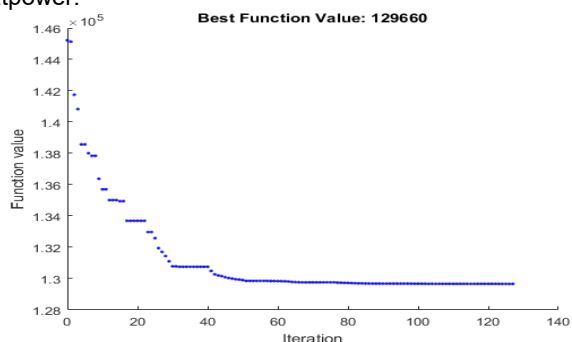
Rys. 5. Schemat struktury opisanej w pliku „case118”, „IEEE 118-bus test system” [16]



Rys. 4. Powiększony środkowy fragment wykresu 2

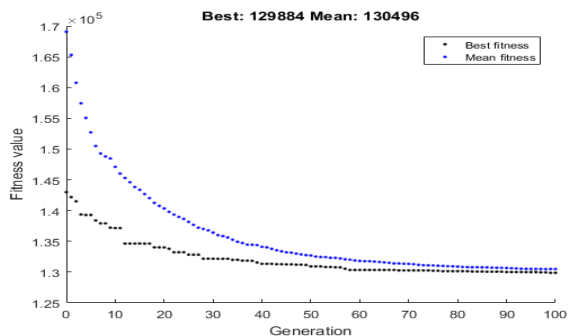
Dla struktury zawierającej 118 węzłów (rys. 5) optymalna wartość funkcji celu wyznaczona „runopf” (pakietu Matpower) wynosi 129660.7 \$/hr.

Na wykresie 6 przedstawiono przebieg procesu odszukiwania optymalnego rozplýwu mocy dla struktury „case118” algorytmem cząstek roju uzyskując zgodność z porównawczym wynikiem funkcji „runopf” pakietu Matpower.



Rys. 6. Przebieg obliczeń optymalnych rozplýwów mocy dla struktury opisanej w pliku „case118” algorytmem cząstek roju

Wykres 7 przedstawia przebieg obliczeń dla struktury „case118” zrealizowanych podstawowym algorytmem ewolucyjnym.

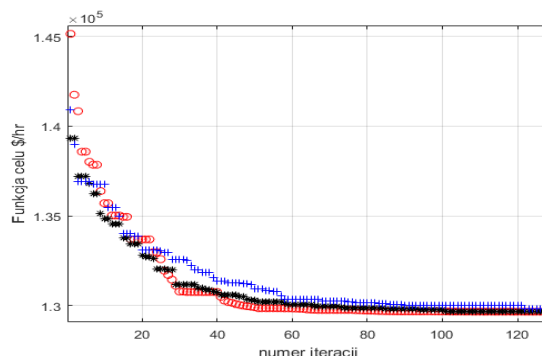


Rys. 7. Przebieg obliczeń optymalnych rozplýwów mocy uzyskane dla struktury 118 algorytmem ewolucyjnym

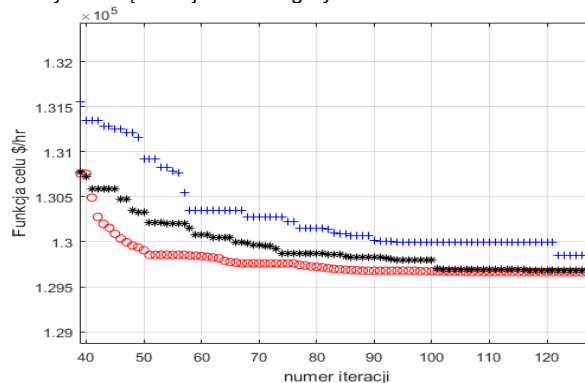
Na wykresie 9 przedstawiono powiększony fragment wykresu numer 8 w celu porównania przebiegu obliczeń trzema algorytmami przy oznaczeniach + - algorytm ewolucyjny, o - algorytm cząstek roju, * - algorytm hybrydowy.

Na wykresie 10 przedstawiono przebieg procesu odszukiwania algorytmem cząstek roju optymalnego rozplýwu mocy dla struktury „case300” opisującej testowy system pakietu Matpower. Schemat 300 węzłowej testowej struktury systemu „IEEE 300-bus test system” można znaleźć m.in. w pracy [17] (ze względu na dużą objętość nie zamieszczono w artykule). Na rys. 12 przedstawiono powiększony fragment wykresu 11 w celu porównania przebiegu obliczeń trzema algorytmami przy oznaczeniach

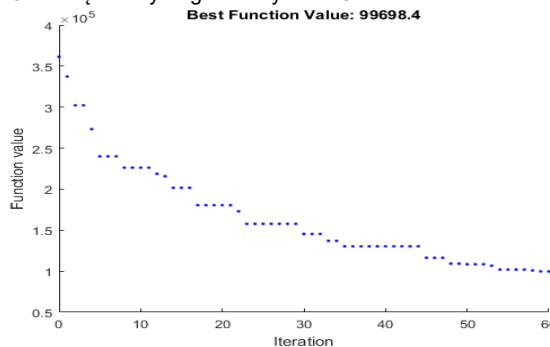
+ - algorytm ewolucyjny, o - algorytm cząstek roju, * - algorytm hybrydowy.



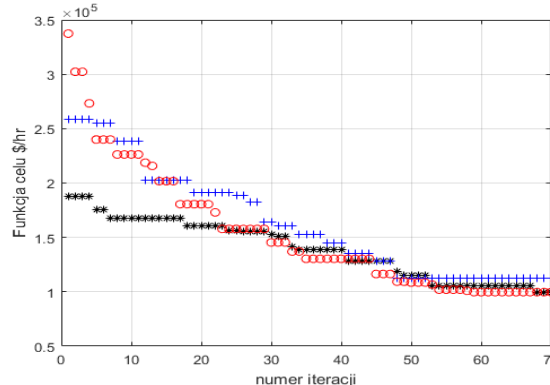
Rys. 8. Wyniki obliczeń optymalnych rozplýwów mocy uzyskane dla struktury 118 węzłowej trzema algorytmami



Rys. 9. Powiększony fragment wykresu 8



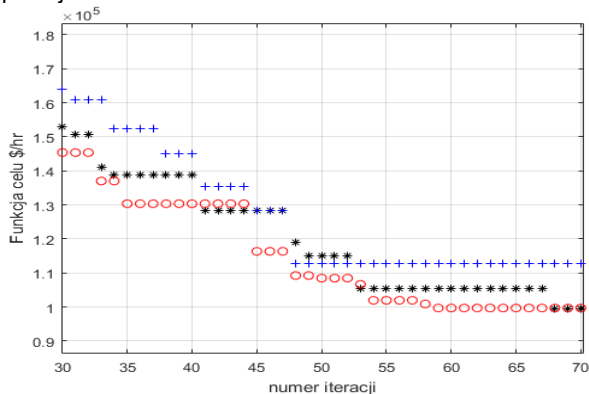
Rys. 10. Przebieg obliczeń optymalnych rozplýwów mocy dla struktury opisanej w pliku „case300” algorytmem cząstek roju



Rys. 11. Wyniki obliczeń optymalnych rozplýwów mocy uzyskane dla struktury 300 węzłowej trzema algorytmami

Przeanalizowano także zmiany różnorodności populacji w takich realizowanych przez algorytm ewolucyjny (podstawowy i hybrydowy) procesach obliczeniowych. W szczególności analizowano histogramy oceny wariantów rozwiązań na różnych etapach procesu optymalizacji. Po

przeanalizowaniu histogramów oceny elementów populacji w wielokrotnie powtarzanych procesach obliczeniowych zaobserwowano, iż algorytm hybrydowy utrzymuje większą różnorodność populacji w stosunku do podstawowego algorytmu ewolucyjnego. Objawiało się to większą różnorodnością populacji oraz lepszymi wartościami wskaźników określającymi różnice pomiędzy najlepszymi elementami populacji oraz pozostałymi elementami populacji.



Rys. 12. Powiększony fragment wykresu 10

Zrealizowane analizy pozwoliły na sformułowanie wniosków co do zaproponowanej koncepcji algorytmu hybrydowego. Na zamieszczonych wykresach można zauważyć większą skuteczność algorytmu hybrydowego w stosunku do podstawowego algorytmu ewolucyjnego. Zaproponowany hybrydowy algorytm ewolucyjno-fajerwerkowy wymaga większej liczby pojedynczych obliczeń funkcji celu na iterację, co wynika z potrzeby oceniania podpopulacji wariantów rozwiązań przetwarzanej przez zmodyfikowany algorytm fajerwerkowy.

Na podstawie wykonanych analiz można sformułować następujące główne wnioski:

- w opracowanym algorytmie hybrydowym istnieje możliwość konfigurowania nowych wariantów rozwiązań, oprócz tych możliwych do skonfigurowania poprzez typowe operatory rekonfiguracji podstawowego algorytmu ewolucyjnego,
- uzyskuje się większą różnorodność przetwarzanej populacji rozwiązań co można zauważyć porównując histogramy populacji rozwiązań uzyskiwanymi porównywanymi algorytmami,
- przeanalizowano i dobrano parametry pracy algorytmów ewolucyjnego podstawowego i hybrydowego uzyskując poprawę efektywności algorytmu hybrydowego (dla analizowanego problemu),
- przydatności i użyteczności zaproponowanej wersji algorytmu ewolucyjnego będzie przedmiotem dalszych analiz.

Podsumowanie

Wykonane analizy przedstawione w artykule oraz wykonane symulacje obliczeniowe dotyczyły zastosowania wybranych optymalizacyjnych algorytmów heurystycznych a w szczególności algorytmu ewolucyjno-fajerwerkowego do rozwiązania zadania optymalizacji rozpyłów mocy dla wybranych struktur systemów elektroenergetycznych. Uzyskane rezultaty potwierdzają możliwości zastosowania takich algorytmów do rozwiązania tego rodzaju problemów.

Przeprowadzone analizy rezultatów uzyskanych zaproponowaną hybrydową wersją algorytmu ewolucyjnego pozwoliły stwierdzić, iż algorytm ten charakteryzuje się dodatkowymi możliwościami (wymienionymi powyżej) w porównaniu do podstawowej wersji algorytmu ewolucyjnego. Autor planuje dalsze analizy możliwości

i efektywności zaproponowanego hybrydowego algorytmu w celu potwierdzenia użyteczności i przydatności zaproponowanego zmodyfikowanego algorytmu do rozwiązywania innych problemów optymalizacyjnych w elektroenergetyce.

Ponadto planowane są dalsze prace mające na celu przeanalizowanie możliwości zastosowania algorytmu ewolucyjno-fajerwerkowego dla obliczeń optymalizacji wielokryterialnej, której celem jest poszukiwanie rozwiązań Pareto-optymalnych.

Autor: dr hab. inż. Sylwester Filipiak prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Energetyki, Maszyn Elektrycznych i Energoelektroniki, E-mail: filipiak@tu.kielce.pl

REGERENCES

- [1] Acharya N., Mahat P, Mithulananthan N.: An analytical approach for DG allocation in primary distribution network", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, 10, 2016, p.669-678.
- [2] Ciro G., Dugardin F., Yalaoui F., Kelly R.: A NSGA-II and NSGA-III comparison for solving an open shop scheduling problem with resource constraints. IFAC, *International Federation of Automatic Control*, 2016 s. 1272–1277.
- [3] Delbem A. C. B., Carvalho A. C. P. L. F., Bretas N. G.: Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 1, Feb. 2015, pp. 425-436.
- [4] Guohua Fang, Wei Guo, Xianfeng Huang, Xinyi Si, Fei Yang, Qian Luo, Ke Yan: A New Multi-objective Optimization Algorithm: MOAFSA and its Application. *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 88 Nr 9b/2012, s. 172-176.
- [5] Helt P., Parol M., Piotrowski P.: Metody sztucznej inteligencji – przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012.
- [6] Hong Y. Y., Ho S. Y.: Determination of network configuration considering multiobjective in distribution systems using genetic algorithms. *IEEE Trans. Power Systems*, 2005. – Vol. 20. – No. 2. – p. 1062–1069.
- [7] Janik P.: Porsinger T., Leonowicz Z., Gono R.: Modelling and Optimization in Microgrids, *Energies*, 2017, p. 161-170,
- [8] Khushalani S., Solanki, J.M., Schulz, N.N.: Optimized Restoration of Unbalanced Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, no. 22, Issue 2, 2017, p. 624-630.
- [9] Kumar Y., Das, B., Sharma, J.: Multiobjective, Multiconstraint Service Restoration of Electric Power Distribution System With Priority Customers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 23, Issue 1, 2008, p. 261-270.
- [10] Marzecki J., Drab M.: Obciążenia i rozpyły mocy w sieci terenowej średniego napięcia-wybrane problemy. *Przeгляд Elektrotechniczny*, R.91, pp. 192-195, luty, Nr 2, 2015.
- [11] Parol M., Baczyński D., Brożek J.: Optimisation of Urban MV Multi-Loop Electric Power Distribution Networks Structure by Means of Artificial Intelligence Methods, *Control and Cybernetics*, 2012, vol. 41 (2012), s.667-689.
- [12] Paździor, P.: Optymalizacja ewolucyjna przepływu materiału w procesie formowania wtryskowego komponentów dla branży motoryzacyjnej. Rozprawa doktorska 2021, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [13] Pijarski P.: Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2019.
- [14] Pijarski P., Jędrzychowski R., Adamek S., Miller P.: Optimization of the selection of power supply points for buildings equipped with PV installations in urban areas. *Progress in Applied Electrical Engineering*, 2019, s. 1- 4,
- [15] Hamed Nafisi, Hossein Mahdinia Roudsari, Seyed Hossein Hosseini: Active and reactive power transmission loss allocation to bilateral contracts through game theory techniques. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 23, January 2015,
- [16] Fernández-Porrás P., Panteli M., Quirós-Tortós J.: Intentional Controlled Islanding: When to Island for Power System Blackout Prevention. May 2018 IET Generation, Transmission and Distribution 12(14),
- [17] Sharma D., Thulasiraman K., Jiang D.: A network science-based k-means++ clustering method for power systems network equivalence. *Computational Social Networks* volume 6, Article number: 4 (2019).