

Optymalizacja nastaw przesuwników fazowych z wykorzystaniem algorytmu roju cząstek

Streszczenie. Użycie kilku przesuwników fazowych w połączonym systemie elektroenergetycznym musi być skoordynowane w celu efektywnego wykorzystania istniejącej infrastruktury sieciowej, ale również do uniknięcia niepożądanych interakcji tych urządzeń i zapewnienia bezpieczeństwa pracy sieci. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania optymalnych (skoordynowanych) nastaw przesuwników fazowych, opartą na algorytmie optymalizacji rojem cząstek (PSO). Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację strat mocy czynnej. Pokazano wyniki obliczeń dla sieci testowej zawierającej 118 węzłów.

Abstract. The use of several phase shifters in an interconnected power system must be coordinated in order to efficiently use the existing grid infrastructure as well as to avoid adverse interactions of these devices and guarantee the secure operation of the system. This paper presents a method for determining the optimal (coordinated) settings of phase shifters based on the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The goal of optimization was to minimize the active power losses. Simulation results for an IEEE 118-bus test system are given. (**Optimization of phase shifter settings using the particle swarm algorithm**).

Słowa kluczowe: przesuwnik fazowy, przepływy nieplanowe, optymalizacja rojem cząstek, straty mocy czynnej.

Keywords: phase shifter, unscheduled flows, particle swarm optimization, active power losses.

Wstęp

Liberalizacja rynku energii elektrycznej oraz zwiększenie penetracji odnawialnych źródeł energii w Europie, głównie źródeł wiatrowych, to dwa zasadnicze czynniki, które spowodowały, że w połączonych systemach przesyłowych na szeroką skalę pojawiły się tzw. przepływy nieplanowe (ang. *unscheduled flows*; nieplanowe przepływy wyrównawcze mocy czynnej pomiędzy poszczególnymi systemami). Zjawisko to jest szczególnie widoczne w systemach elektroenergetycznych Europy Środkowo-Wschodniej, gdzie nadmiar mocy z elektrowni wiatrowych na północy Niemiec jest przesyłany do miejsc odbioru na południu Niemiec oraz do Austrii z wykorzystaniem sieci przesyłowych krajów sąsiednich, szczególnie Polski i Czech. Ze względu na przyczyny powstania, przepływy nieplanowe zwykło dzielić się na przepływy kołowe (ang. *loop flows*) oraz przepływy tranzytowe (ang. *transit flows*) [1, 2]. Należy tutaj dodać, że w sieciach zamkniętych, takich jak europejska sieć przesyłowa, niewielki poziom przepływów nieplanowych jest zjawiskiem całkowicie naturalnym, wynikającym m.in. z synchronicznej pracy połączonych systemów elektroenergetycznych, które samo w sobie nie musi mieć negatywnego wpływu na ich funkcjonowanie. Jednak niekontrolowany wzrost przepływów nieplanowych, jaki ma miejsce w ostatnich latach, jest poważnym problemem dla operatorów sieci przesyłowych (OSP) [2, 3]. Przepływy te, nadmiernie obciążając sieć przesyłową, prowadzą do zagrożenia bezpiecznej pracy połączonych systemów. W dodatku zmuszają OSP do ograniczania zdolności przesyłowych połączeń transgranicznych, udostępnianych uczestnikom rynku energii elektrycznej, oraz do stosowania nadzwyczajnych środków zaradczych [1]. Mogą powodować również wzrost strat przesyłowych w pewnych obszarach, pogarszając tym samym ekonomikę pracy sieci.

W związku z opisaną sytuacją, wzrasta zainteresowanie OSP zastosowaniem tzw. przesuwników fazowych (ang. *phase shifters* lub *phase shifting transformers* – PST) do zarządzania przepływami mocy na połączeniach transgranicznych. W najbliższych latach takie urządzenia zostaną zainstalowane w liniach wymiany na granicy Polska–Niemcy i Czechy–Niemcy [4]. Przy czym pierwsze z nich uruchomiono już na połączeniu pomiędzy stacjami Mikułowa (PL) i Hagenwerder (DE) [5]. Przesuwniki fazowe (PST) są to specjalne transformatory, które zainstalowane

w linii przesyłowej umożliwiają regulację kąta fazowego napięcia i tym samym zmianę przepływu mocy czynnej w linii. Należy również dodać, że w sieci zamkniętej, PST wpływają nie tylko na zmianę przepływów mocy w liniach, w których są zainstalowane, ale także na przepływy mocy w całej sieci (zwłaszcza w otoczeniu sieciowym PST). Co więcej, jeśli kilka PST jest zainstalowanych stosunkowo blisko siebie, możliwe są interakcje tych urządzeń. Jak wykazano w [6], oddziaływania te mogą być wzmacniające lub osłabiające. Tak więc sterowanie kilku PST z wzajemnym oddziaływaniem wymaga wyrafinowanych mechanizmów koordynacji w celu pełnego wykorzystania tych urządzeń i uniknięcia konfliktów, które mogą prowadzić do nieoczekiwanego zachowania. Kilka metod koordynacji urządzeń sterujących przepływem mocy zostało przedstawionych w literaturze [7–13].

W niniejszym artykule pokazano, jak PST powinny być sterowane w celu uzyskania optymalnej (czy też prawie optymalnej), z punktu widzenia przyjętego kryterium, sytuacji dla danego systemu. Zaprezentowana została metoda wyznaczania optymalnych (skoordynowanych) nastaw PST w kontekście strat mocy czynnej w sieci, bazująca na algorytmie optymalizacji rojem cząstek (ang. *Particle Swarm Optimization* – PSO). Przedstawiono wyniki dla sieci testowej zawierającej 118 węzłów.

Regulacja przepływu mocy czynnej za pomocą PST

Przepływ mocy czynnej w linii przesyłowej określa następująca zależność [14]:

$$(1) \quad P_1 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} \cdot \sin \delta,$$

gdzie: U_1 , U_2 – moduły napięć na początku i końcu linii, δ – kąt mocy (różnica argumentów napięć węzłowych na początku i końcu linii, $\delta = \delta_1 - \delta_2$), X_L – reaktancja linii.

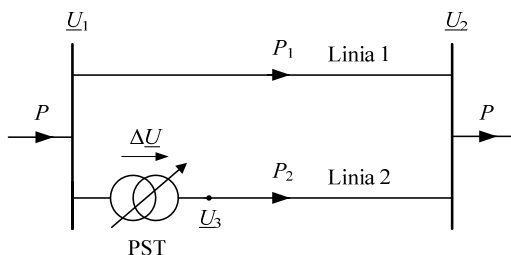
Z zależności (1) wynika, że moc czynną płynącą w linii przesyłowej można zmieniać dokonując zmiany poziomów napięć U_1 i U_2 , wartości reaktancji X_L oraz kąta mocy δ . Jednakże najszersze zmiany mocy czynnej umożliwiła regulacja kąta δ (sterowanie wartością kąta δ pozwala nie tylko na zmianę wartości mocy czynnej płynącej linią, ale

również na zmianę kierunku jej przepływu). W praktyce w tym celu stosuje się PST.

PST włączony szeregowo do linii przesyłowej (linia 2 na rys.1) wprowadza do napięcia na początku linii \underline{U}_1 prostopadłe do niego napięcie dodawcze $\Delta \underline{U}$. W rezultacie (rys.2) wypadkowe napięcie \underline{U}_3 za PST jest przesunięte w fazie w stosunku do napięcia \underline{U}_1 przed PST o kąt α , a kąt mocy dla linii jest równy $(\delta + \alpha)$. W tym przypadku przepływu mocy czynnej w linii przyjmuje następującą postać [11]:

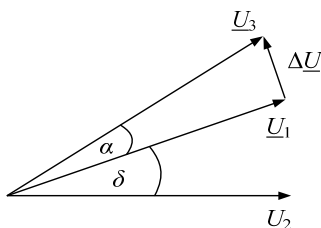
$$(2) \quad P_2 = \frac{U_3 \cdot U_2}{X_L + X_{PST}} \cdot \sin(\delta + \alpha),$$

gdzie: X_{PST} – reaktancja PST, α – kąt regulacji PST.



Rys.1. Schemat układu przesyłowego z PST

Regulacja napięcia $\Delta \underline{U}$ powoduje zmianę kąta α i tym samym zmianę mocy P_2 . Napięcie $\Delta \underline{U}$ można regulować w zakresie od wartości ujemnych do wartości dodatnich, co powoduje odpowiednio zmniejszenie lub zwiększenie kąta mocy i tym samym mocy P_2 .



Rys.2. Wykres fazorowy dla linii z niesymetrycznym PST

Zadanie optymalizacji

W ogólnym przypadku problem optymalizacji polega na poszukiwaniu wektora zmiennych decyzyjnych, dla którego zdefiniowana funkcja celu osiąga ekstremum. Na zmienne decyzyjne nałożone są zazwyczaj ograniczenia równościowe lub nierównościowe. W przeprowadzonych badaniach zadanie optymalizacji polegało na poszukiwaniu optymalnych nastaw czterech PST (zmienne decyzyjne) przy minimalizacji strat mocy czynnej w całej sieci testowej oraz w jej obszarach (poszczególne funkcje celu). PST zainstalowane były w liniach na przekroju O1–O2 (linie 15–33 i 19–34) oraz O1–O3 (linie 23–24 i 30–38) (rys.3). Granice przestrzeni poszukiwań określone były przez maksymalne i minimalne nastawy każdego PST. Matematycznie zadanie to można wyrazić w następującej formie:

$$(3) \quad \min f(\mathbf{x}) = P_{str}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$$

przy ograniczeniach:

$$(4) \quad x_{d \min} \leq x_d \leq x_{d \max}, \quad d = 1, \dots, 4,$$

gdzie: $f(\mathbf{x})$ – funkcja celu, P_{str} – straty mocy czynnej w sieci, \mathbf{x} – wektor zmiennych zawierający nastawy PST, \mathbb{R}^4 – 4-wymiarowa rzeczywista przestrzeń wektorowa, x_d – nastawa d -tego przesuwnika, $x_{d \min}$, $x_{d \max}$ – minimalna i maksymalna nastawa d -tego przesuwnika.

Aby uniknąć sytuacji, w której, w procesie wyznaczania nastaw PST, algorytm optymalizacji „utyka” na skrajnych wartościach dopuszczalnego przedziału nastaw, zastosowano podejście z tzw. funkcją kary. Funkcja ta wprowadzana jest jako dodatkowy składnik funkcji celu. Matematycznie można to zapisać następująco:

$$(5) \quad \min F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^4,$$

$$(6) \quad p(\mathbf{x}) = a \sum_{d=1}^4 x_d^2,$$

gdzie: $F(\mathbf{x})$ – funkcja celu uwzględniająca funkcję kary, $f(\mathbf{x})$ – oryginalna funkcja celu, $p(\mathbf{x})$ – funkcja kary, a – stały współczynnik kary (dobierany eksperymentalnie).

Do rozwiązania zdefiniowanego problemu została użyta metoda oparta na algorytmie roju cząstek. Zaletą tego algorytmu jest to, że do przeprowadzenia optymalizacji nie potrzebuje znajomości gradientu funkcji celu i daje duże prawdopodobieństwo znalezienia optimum globalnego. Dodatkowym atutem jest mniejsza liczba parametrów optymalizacji w stosunku np. do algorytmów ewolucyjnych, co pozwala na łatwiejszy dobór optymalnych parametrów algorytmu optymalizacyjnego [15].

Algorytm optymalizacji rojem cząstek

Algorytm PSO został zaproponowany w 1995 r. przez Kennedy’ego i Eberharta [16]. Algorytm jest inspirowany biologicznie i bazuje na zachowaniu społecznym roju zwierząt (na przykład ptaki czy ryby), które współpracują ze sobą w celu uzyskania korzystnej sytuacji (znalezienie pożywienia, ucieczka przed drapieżnikiem itd.).

Algorytm PSO pracuje na grupie cząstek (nazywanej rojem), będącej zbiorem potencjalnych rozwiązań problemu. Proces optymalizacji realizowany jest iteracyjnie i polega na znajdowaniu coraz to lepszych położenia cząstek w przestrzeni poszukiwań, i w rezultacie znalezienia położenia optymalnego (najlepszego rozwiązania), do którego zbiega się cała grupa (rój). Podczas procesu optymalizacji położenie każdej cząstki wyznaczane jest na podstawie jej wcześniejszych doświadczeń oraz doświadczeń całej grupy [15]. Położenie i -tej cząstki jest uaktualniane przez stochastyczną prędkość v_i . Takie podejście opisują poniższe zależności [17]:

$$(7) \quad v_{id}^{k+1} = \omega \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot r_{1d}^k \cdot (p_{1d}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_{2d}^k \cdot (p_{2d}^k - x_{id}^k),$$

$$(8) \quad x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad d = 1, 2, \dots, D,$$

gdzie: N – liczba cząstek roju, D – liczba zmiennych decyzyjnych, c_1 , c_2 – współczynniki przyspieszenia, r_{1d} , r_{2d} – liczby losowe z przedziału $[0; 1]$, ω – współczynnik bezwładności ruchu cząstki, x_i^k – położenie i -tej cząstki w k -tym kroku iteracji, v_i^k – prędkość i -tej cząstki w k -tym kroku iteracji, p_i^k – dotychczasowe najlepsze położenie i -tej cząstki, p_g^k – najlepsze położenie znalezione przez lidera roju, k – krok iteracji.

Współczynniki c_1 , c_2 kontrolują zakres ruchu cząstki w pojedynczej iteracji. W większości przypadków oba są identyczne. Najczęściej przyjmuje się $c_1 = c_2 = 2$.

Współczynnik ω odpowiada za równowagę pomiędzy zdolnością do globalnego i lokalnego przeszukiwania obszaru możliwych rozwiązań. Jego duża wartość umożliwia globalne przeszukiwanie, natomiast mniejsza lokalne. Mnożnik ten może być stały lub ulegać zmianom w procesie optymalizacji, co zwiększa efektywność działania algorytmu [18]. Mówi się wtedy o liniowej redukcji współczynnika bezwładności, który ma następującą postać [19]:

$$(9) \quad \omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \cdot k,$$

gdzie: ω_{\max} – maksymalna wartość współczynnika bezwładności, ω_{\min} – minimalna wartość współczynnika bezwładności, k_{\max} – maksymalna (założona) liczba iteracji procesu optymalizacji, k – numer (krok) aktualnej iteracji.

W trakcie działania algorytmu PSO, dla którego dobrano wysokie wartości współczynnika ω oraz współczynników c_1, c_2 , niejednokrotnie dochodzi do sytuacji, w której cząstki wybiegają poza przestrzeń poszukiwań. Aby tego uniknąć zazwyczaj wprowadza się ograniczenia na prędkość [20]:

$$(10) \quad \begin{aligned} \text{jeżeli } v_{id}^k > V_{d \max}, \quad \text{wtedy } v_{id}^k &= V_{d \max}, \\ \text{jeżeli } v_{id}^k < V_{d \min}, \quad \text{wtedy } v_{id}^k &= V_{d \min}, \end{aligned}$$

gdzie: $V_{d \max}$ – maksymalna prędkość cząstki dla zmiennej decyzyjnej d , $V_{d \min}$ – minimalna prędkość cząstki dla zmiennej decyzyjnej d .

Sieć testowa

Do obliczeń wykorzystana została sieć testowa IEEE118 [21], zawierająca 118 węzłów oraz 186 gałęzi, w tym 9 transformatorów. Sieć została podzielona na trzy obszary (rys.3), w skład których wchodziły następujące węzły:

- obszar O1: od 1 do 23, od 25 do 32 oraz 113, 114, 115 i 117,
- obszar O2: od 33 do 37, od 39 do 61 oraz 63 i 64,
- obszar O3: od 65 do 112 oraz 24, 38, 62, 116 i 118.

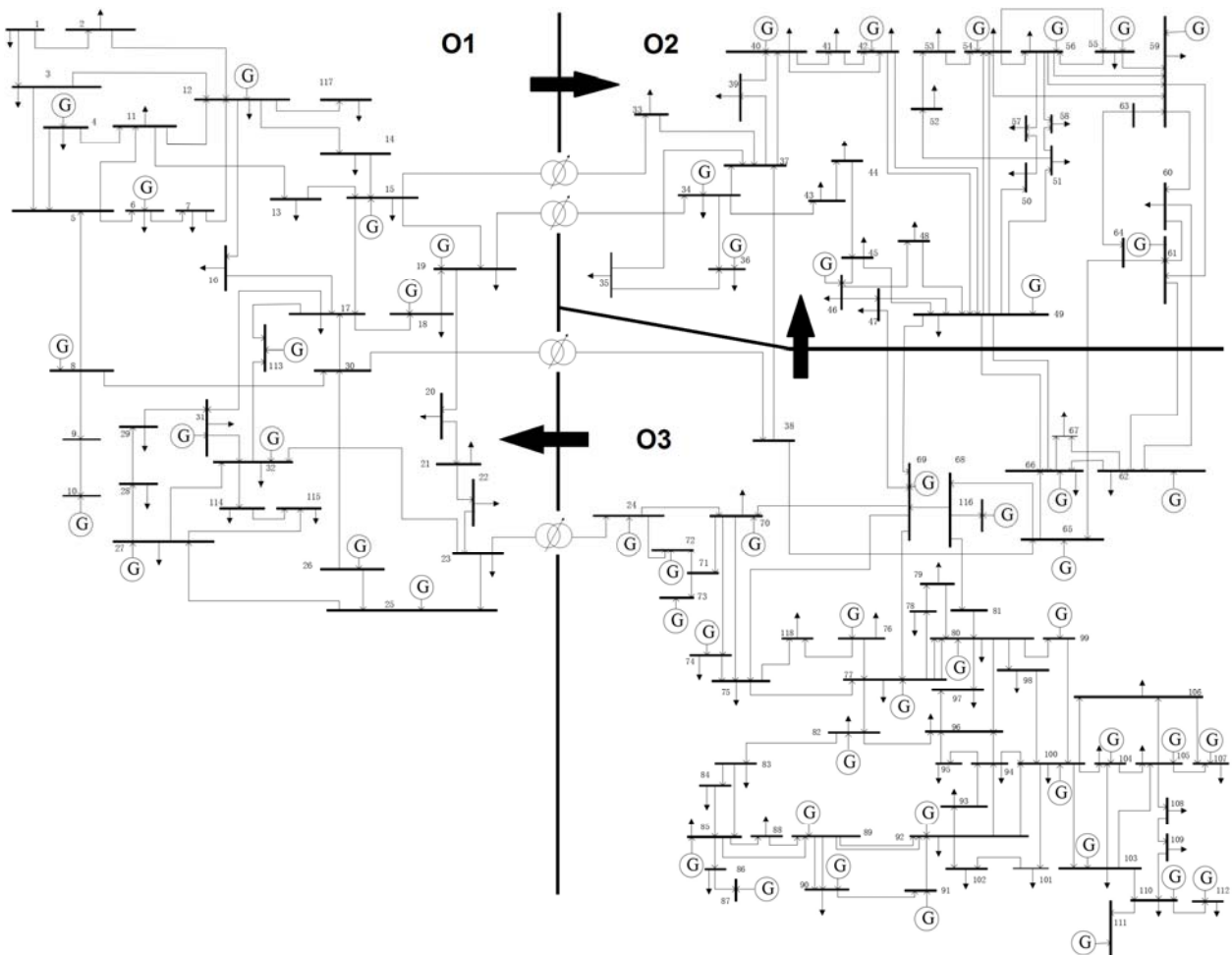
Przekroje międzyobszarowe tworzyły następujące linie:

- przekrój O1–O2: dwie linie 138 kV: 15–33 i 19–34,
- przekrój O1–O3: jedna linia 138 kV: 23–24 oraz jedna linia 345 kV: 30–38,
- przekrój O2–O3: sześć linii 138 kV: 47–69, 49–66 (x2), 49–69, 60–62, 61–62; jedna linia 345 kV: 64–65 oraz transformator 345/138 kV/kV: 38–37.

Węzeł sieci nr 69 był węzłem bilansującym. Strzałki na rysunku 3 przedstawiają kierunek przepływu mocy na przekrojach międzyobszarowych w stanie bazowym układu (przed optymalizacją). Dane dla stanu bazowego sieci testowej pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Dane dla stanu bazowego sieci testowej

Obszar sieci testowej	Zapotrzebowanie	Generacja	Straty mocy czynnej
	P_L [MW]	P_G [MW]	P_{str} [MW]
O1	963	983	33,66
O2	1342	1086	34,79
O3	1937	2290	48,18
Całość	4242	4359	116,64

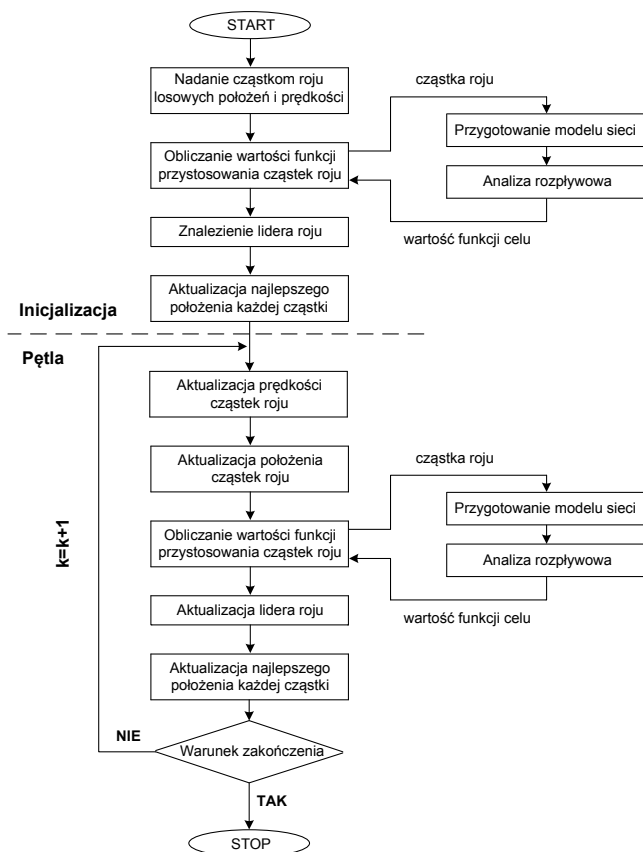


Rys.3. Schemat sieci testowej IEEE118 [21] wraz z założoną lokalizacją PST

Metoda optymalizacji nastaw PST

W badaniach zastosowano podejście bazujące na połączeniu algorytmu roju cząstek i klasycznej metody wyznaczania rozplywu mocy (metody Newtona-Raphsona) (rys.4).

Na początku algorytmu optymalizacji wygenerowany zostaje startowy rój cząstek o określonej liczebności, którym nadawane są losowe położenia oraz prędkości. Położenie każdej cząstki reprezentowane jest przez wektor zawierający nastawy poszczególnych PST (potencjalne rozwiązania). Następnie algorytm przechodzi do procedur wywoływanych dla pojedynczej cząstki roju. Na podstawie parametrów cząstki (nastaw PST) przygotowywany jest model sieci testowej, uwzględniający aktualne nastawy przesuwników, po czym wyznaczany jest rozplyw mocy za pomocą pracującego w środowisku Matlab programu Matpower [22]. W rezultacie uzyskiwana zostaje wartość funkcji celu (strat mocy czynnej w sieci), która to następnie przesyłana jest do algorytmu rojowego. Po wyznaczeniu przystosowania (wartości funkcji celu) wszystkich cząstek roju, zmienione zostają najlepsze położenia cząstek oraz następuje wybór lidera roju. Od tego momentu rozpoczyna się proces iteracyjny. Modyfikowane zostają prędkości i położenia cząstek, wyznaczana zostaje wartość funkcji przystosowania dla każdej cząstki, następuje aktualizacja lidera roju oraz aktualizacja najlepszych położen cząstek [15]. Algorytm działa iteracyjnie aż do momentu spełnienia warunku zakończenia (np. zadeklarowanej liczby iteracji).



Rys.4. Algorytm optymalizacji rojowej nastaw PST

Wyniki obliczeń dla sieci testowej IEEE118

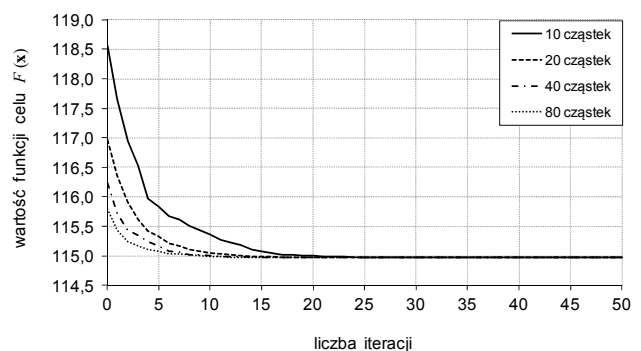
Wszystkie obliczenia przeprowadzono na komputerze wyposażonym w procesor Intel Core i7-4702MQ 2,2 GHz pod kontrolą 64-bitowego systemu operacyjnego Windows.

Przyjęte parametry optymalizacji i algorytmu PSO zestawiono w tabeli 2.

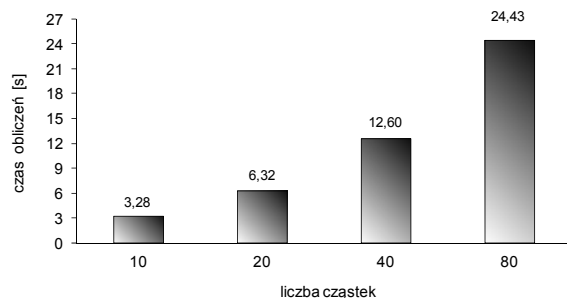
Tabela 2. Przyjęte parametry optymalizacji i algorytmu PSO

Maksymalna liczba iteracji procesu optymalizacji k_{max}	50
Maksymalna wartość współczynnika bezwładności ω_{max}	0,9
Minimalna wartość współczynnika bezwładności ω_{min}	0,4
Współczynnik przyspieszenia c_1	2
Współczynnik przyspieszenia c_2	2
Maksymalna prędkość cząstki V_{max}	25
Minimalna prędkość cząstki V_{min}	-25
Maksymalna nastawa PST x_{max}	25°
Minimalna nastawa PST x_{min}	-25°

Dla przykładu, na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki optymalizacji dla kryterium minimalizacji strat mocy czynnej w całej sieci testowej (wyniki są średnimi z 20 testów numerycznych – wszystkie testy przeprowadzono dla tych samych ustawień parametrów algorytmu rojowego). Należy zwrócić uwagę na szybką zbieżność procesu optymalizacji oraz fakt, że mniejsza liczba cząstek może być zastosowana (rys.5), co ma bezpośrednie przełożenie na czas optymalizacji (rys.6).



Rys.5. Przebieg zmian wartości funkcji celu w kolejnych iteracjach algorytmu rojowego (wartości średnie z 20 testów numerycznych)



Rys.6. Czas trwania obliczeń dla różnej liczby cząstek roju (wartości średnie z 20 testów numerycznych)

W tabeli 3 zestawiono wyniki optymalizacji rojowej dla różnych wariantów (wyniki dla najlepszych rozwiązań po 50 iteracjach). Należy zauważyć, że algorytm znalazł wartości nastaw PST, które pozwoliły na zmniejszenie wartości strat mocy czynnej w optymalizowanych obszarach sieci testowej w stosunku do stanu bazowego. Przy czym, jak pokazują wyniki z tabeli 3, czasami może się to odbywać kosztem wzrostu strat mocy czynnej w innych obszarach sieci.

Tabela 3. Wyniki optymalizacji rojowej – optymalne nastawy PST w odniesieniu do minimalnych strat mocy czynnej w sieci

Obszar sieci testowej	Linia 15–33	Linia 19–34	Linia 23–24	Linia 30–38	P_{str} [MW]	Redukcja P_{str}^* [%]
	PST1	PST2	PST3	PST4		
O1**	[°]	[°]	[°]	[°]	27,72	17,6
O2	10,37	12,37	-10,14	-12,60	55,96	-60,9
O3					51,89	-7,7
Całość					135,57	-16,2
O1	-8,54	-14,59	9,85	13,28	46,53	-38,2
O2**					24,88	28,5
O3					51,14	-6,1
Całość					122,55	-5,1
O1	0,51	0,86	-6,98	5,61	34,47	-2,4
O2					34,20	1,7
O3**					46,69	3,1
Całość					115,36	1,1
O1	-1,48	-2,34	-2,57	6,38	36,20	-7,5
O2					31,48	9,5
O3					47,10	2,2
Całość**					114,78	1,6

*Redukcja strat w stosunku do stanu bazowego sieci (patrz tab.1).

**Obszar sieci testowej, dla którego minimalizowano straty mocy czynnej.

Podsumowanie

Użycie kilku PST w połączonym systemie elektroenergetycznym musi być skoordynowane w celu pełnego wykorzystania tych urządzeń i uniknięcia ich niepożądanych interakcji. Koordynacja PST jest bardzo ważna, zwłaszcza wtedy, gdy liczba urządzeń w systemie wzrasta, a odległość między nimi się zmniejsza. Warto podkreślić, że kiedy PST są zainstalowane w różnych obszarach kontroli, w celu uzyskania pożądanych efektów, istotna jest współpraca i koordynacja międzyoperatorami, polegająca m.in. na wymianie informacji pomiędzy OSP o nastawach PST.

W artykule przedstawiono metodę koordynacji nastaw PST, opartą na algorytmie optymalizacji rojem cząstek. Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację strat mocy czynnej w sieci. Metoda została sprawdzona na sieci testowej, a wyniki badań wykazały jej dobrą efektywność.

Dalsze prace w tematyce skoordynowanego sterowania PST powinny być ukierunkowane na optymalizację nastaw przesuwników, w której jednocześnie będzie poszukiwane ekstremum kilku różnych funkcji celu (optymalizacja wielokryterialna). Należy również wykonać testy przy zastosowaniu bardziej złożonego modelu sieci (planowane jest tutaj wykonanie szeregu testów dla modelu sieci 400/220/110 kV połączonego systemu Europy Środkowo-Wschodniej (PL, DE, CZ, SK, HU, AT, UA), przy założeniu różnych sytuacji bilansowych w poszczególnych obszarach).

Autorzy: dr hab. inż. Roman Korab, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Roman.Korab@polsl.pl;

mgr inż. Robert Owczarek, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Robert.Owczarek@polsl.pl;

dr inż. Marcin Polomski, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Marcin.Polomski@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Majchrzak H., Purchała K., Przepływy nieplanowe i ich wpływ na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego, *Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój*, (2012), nr 3–4, 8–15
- [2] Position of ČEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS regarding the issue of Bidding Zones Definition, (2012), http://www.pse.pl/uploads/pliki/Position_of_CEPS_MAVIR_PS_EO_SEPS-Bidding_Zones_Definition.pdf
- [3] Joint study by ČEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS, Unplanned flows in the CEE region in relation to the common market area Germany–Austria, (2013), http://www.pse.pl/uploads/pliki/Unplanned_flows_in_the_CEE_region.pdf
- [4] Regional Investment Plan Continental Central East, (2014), https://www.entsoe.eu/major-projects/ten-year-network-development-plan/tyndp-2014/Documents/RgIP%20CCE%202014_FINAL.pdf
- [5] www.pse.pl – Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. <http://www.pse.pl/index.php?dzid=14&did=3010>
- [6] Korab R., Owczarek R., Impact of phase shifting transformers on cross-border power flows in the Central and Eastern Europe region, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, 64 (2016), n.1, 127–133
- [7] Oudalov A., Cherkaoui R., Germond A.J., Emery M., Coordinated power flow control by multiple FACTS devices, *Proc. IEEE Bologna Power Tech Conference*, (2003)
- [8] Marinescu B., Coulondre J. M., A coordinated phase shifting control and remuneration method for a zonal congestion management scheme, *Proc. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, (2004), 72–77
- [9] Marinakis A., Glavic M., Van Cutsem T., Control of phase shifting transformers by multiple transmission system operators, *Proc. IEEE Lausanne Power Tech*, (2007), 119–124
- [10] Marinakis A., Glavic M., Van Cutsem T., Minimal Reduction of Unscheduled Flows for Security Restoration: Application to Phase Shifter Control, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25 (2010), n.1, 506–515
- [11] Verboomen J., Optimisation of transmission systems by use of phase shifting transformers, PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, (2008)
- [12] Häger U., Lehnhoff S., Rehtanz C., Wedde H. F., Multi-Agent System for Coordinated Control of Facts Devices, *Proc. 15th Int. Conf. on Intelligent System Applications to Power Systems*, (2009), 1–6
- [13] Belivanis M., Bell K.R.W., Coordination of the settings of phase-shifting transformers to minimize the cost of generation re-dispatch, *Proc. CIGRE Session*, (2014), C2–204
- [14] Machowski J., Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (2007)
- [15] Szczepanik M., Algorytmy rojowe w optymalizacji układów mechanicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, (2013)
- [16] Kennedy J., Eberhart R.C., Particle Swarm Optimization, *Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, (1995), 1942–1948
- [17] Shi Y., Eberhart R.C., A modified particle swarm optimizer, *Proc. IEEE Int. Conf. on Evol. Comput.*, (1998), 69–73
- [18] Eberhart R.C., Shi Y., Particle swarm optimization: developments, applications and resources, *Proc. IEEE Congr. on Evol. Comput.*, (2001), 81–86
- [19] Hajian-Hoseinabadi H., Hosseini S.H., Hajian M., Optimal power flow solution by a modified particle swarm optimization algorithm, *Proc. 43rd International Universities Power Engineering Conference*, (2008), 1–4
- [20] Kennedy J., Eberhart R.C., Swarm Intelligence, Morgan Kaufman, (2001)
- [21] Power Systems and Evolutionary Algorithms, <http://www.al-roomi.org/power-flow/118-bus-system>
- [22] Zimmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E., Thomas R.J., MATPOWER Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26 (2011), n.1, 12–19