

OPTIMALIZACJA ROJOWA NASTAW PRZESUWNIKÓW FAZOWYCH W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Roman KORAB¹, Robert OW CZAREK², Marcin POŁOMSKI³

1. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
e-mail: roman.korab@polsl.pl
2. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
e-mail: robert.owczarek@polsl.pl
3. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
e-mail: marcin.polomski@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zastosowanie algorytmu rojowego PSO do optymalizacji nastaw grupy przesuwników fazowych w systemie elektroenergetycznym. Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację strat mocy czynnej w sieci testowej IEEE 118. Przeanalizowano wpływ maksymalnej dozwolonej prędkości cząstek na efektywność algorytmu optymalizacji. Wyniki badań pokazują ważność tego parametru.

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, przesuwnik fazowy, optymalizacja rojem cząstek, straty mocy czynnej.

1. WSTĘP

W odpowiedzi na rosnący problem przepływów nieplanowych [1, 2, 3], coraz większa liczba operatorów systemów przesyłowych w Europie wyposaża swoje systemy w przesuwniki fazowe (ang. *Phase Shifting Transformers* – PST). Urządzenia tego typu są już zainstalowane m.in. w wybranych liniach transgranicznych na przekrojach Polska–Niemcy i Czechy–Niemcy, a w najbliższych latach będą instalowane w kolejnych liniach wymiany w tym obszarze.

Przesuwniki PST są to specjalne transformatory, które zainstalowane w linii przesyłowej umożliwiają regulację kąta fazowego napięcia i tym samym zmianę przepływu mocy czynnej w linii. Ich zastosowanie pozwala na zwiększanie bądź zmniejszanie, w pewnym zakresie, przepływu mocy na danym połączeniu. Jednakże, jeśli kilka PST jest zainstalowanych geograficznie blisko siebie, możliwe są niekorzystne interakcje tych urządzeń [4, 5, 6]. W związku z tym użycie kilku PST z wzajemnym oddziaływaniem na sieć przesyłową musi być odpowiednio skoordynowane. Koordynacja grupy takich urządzeń prowadzi do problemu optymalizacji wielowymiarowej.

W artykule problem koordynacji PST został rozwiązany poprzez optymalizację nastaw PST, opartą na algorytmie roju cząstek (algorytmie rojowym, ang. *Particle Swarm Optimization* – PSO). Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację strat mocy czynnej w sieci testowej zawierającej 118 węzłów. Przeanalizowano wpływ maksymalnej dozwolonej prędkości cząstek na efektywność algorytmu optymalizacji.

2. ALGORYTM PSO

Algorytm PSO został zaproponowany w 1995 r. przez Kennedy'ego i Eberharta [7]. 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 wyznaczone jest na podstawie jej wcześniejszych doświadczeń oraz doświadczeń całej grupy [8]. Położenie i -tej cząstki jest uaktualniane przez stochastyczną prędkość v_i . Takie podejście opisują poniższe zależności [9]:

$$v_{id}(k+1) = \omega \cdot v_{id}(k) + c_1 \cdot r_{1d}(k) \cdot [p_{id}(k) - x_{id}(k)] + c_2 \cdot r_{2d}(k) \cdot [p_{gd}(k) - x_{id}(k)] \quad (1)$$

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

gdzie: N – liczba cząstek roju, D – liczba zmiennych decyzyjnych, c_1, c_2 – współczynniki przyspieszenia, r_1, r_2 – 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. 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 [10].

W trakcie działania algorytmu PSO może dochodzić do sytuacji, w której cząstki wybiegają poza ograniczenia przestrzeni poszukiwań. Aby tego uniknąć zazwyczaj wprowadza się ograniczenia na prędkość [11]:

$$\begin{aligned} \text{jeżeli } v_{id}(k) > V_{d \max}, \text{ wtedy } v_{id}(k) &= V_{d \max} \\ \text{jeżeli } v_{id}(k) < -V_{d \max}, \text{ wtedy } v_{id}(k) &= -V_{d \max} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: $V_{d \max}$ – maksymalna prędkość cząstki dla zmiennej decyzyjnej d , $V_{d \min}$ – minimalna prędkość cząstki dla zmiennej decyzyjnej d ; zwykle przyjmuje się, że $V_{d \min} = -V_{d \max}$.

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Zadanie optymalizacji polegało na poszukiwaniu optymalnych nastaw czterech PST przy minimalizacji strat mocy czynnej w całej sieci testowej. 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. 2). Granice przestrzeni poszukiwań określone były przez maksymalne i minimalne nastawy każdego PST. Matematycznie zadanie zostało sformułowane w następującej formie:

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

przy ograniczeniach:

$$x_{d \min} \leq x_d \leq x_{d \max}, \quad d = 1, \dots, 4 \quad (5)$$

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.

W tak zdefiniowanym zadaniu, ze względu na brak formuły analitycznej opisującej zależność funkcji celu od zmiennych decyzyjnych (nastaw PST), problem ten musi być rozwiązany za pomocą metod, które opierają się wyłącznie na ocenie modelu symulacyjnego. Do rozwiązania sformułowanego problemu została użyta metoda oparta na algorytmie rojowym PSO. Zaletą tego algorytmu jest to, że do przeprowadzenia optymalizacji nie potrzebuje znajomości gradientu funkcji celu i daje duże prawdopodobieństwo znalezienia optimum globalnego [8].

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:

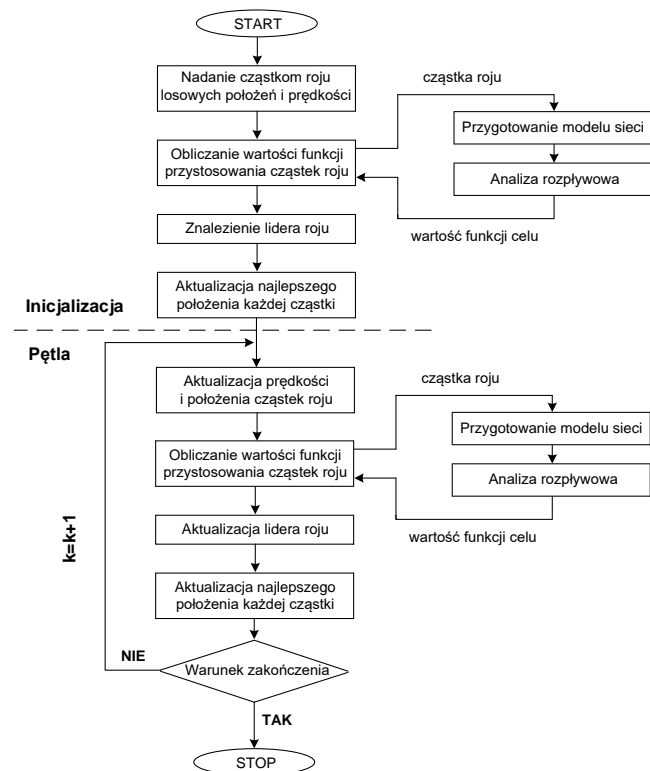
$$F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^4 \quad (6)$$

$$p(\mathbf{x}) = a \sum_{d=1}^4 x_d^2 \quad (7)$$

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).

4. METODA stepPSO

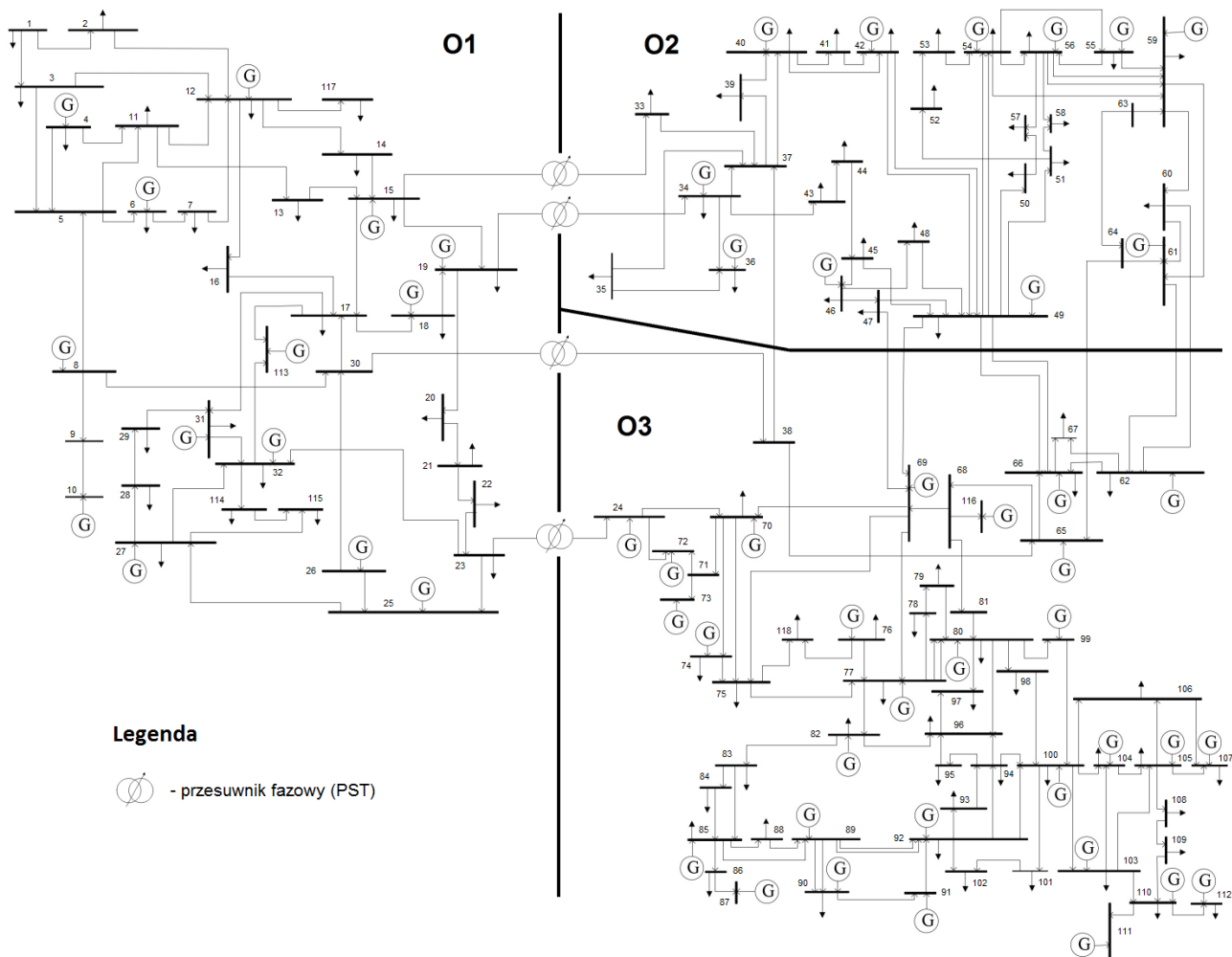
W badaniach zastosowano podejście bazujące na połączeniu klasycznej metody wyznaczania rozplywu mocy (metody Newtona-Raphsona) do wyznaczenia stanu pracy sieci dla zadanych wartości nastaw PST oraz algorytmu rojowego PSO do optymalizacji nastaw PST. W opracowanej metodzie stepPSO nastawy PST podlegały zmianom skokowym, o wartość wynikającą ze zmiany kąta przypadającą na liczbę przełączanych zaczeptów. Schemat blokowy opracowanej metody został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Algorytm optymalizacji rojowej nastaw PST – metoda stepPSO

Do badań wykorzystana została sieć testowa IEEE 118 [12], zawierająca 118 węzłów oraz 186 gałęzi, w tym 9 transformatorów. Sieć została podzielona na trzy obszary (rys. 2). Węzeł sieci nr 69 był węzłem bilansującym.

Algorytm optymalizacji został zaimplementowany w środowisku Matlab. Do wyznaczania rozplywu mocy wykorzystano, pracujący w środowisku Matlab, program Matpower [13].



Rys. 2. Schemat sieci testowej IEEE 118 [12] wraz z założoną lokalizacją PST i podziałem na trzy obszary

5. WYNIKI OBLICZEŃ DLA SIECI TESTOWEJ

Przyjęto następujące parametry algorytmu optymalizacji:

- współczynnik bezwładności ruchu cząstki $\omega = 0,73$,
- współczynniki przyspieszenia $c_1 = c_2 = 1,5$,
- maksymalna nastawa PST $X_{\max} = 32$ zaczepty,
- minimalna nastawa PST $X_{\min} = -X_{\max} = -32$ zaczepty,
- wartość skoku regulacji kąta $20,1^\circ/32$ zaczepty,
- stały współczynnik kary $a = 0,0017$,
- maksymalna liczba iteracji procesu optymalizacji 150.

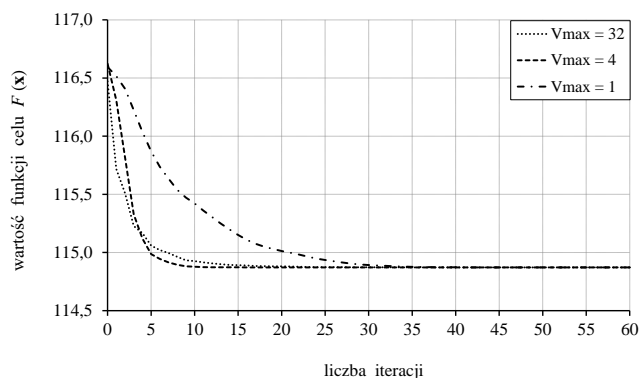
Wartości współczynników przyspieszenia oraz współczynnika bezwładności ruchu cząstki odpowiadały wartościom uzyskanym za pomocą metody wyznaczania współczynnika tłumienia [14]. Dla wszystkich analizowanych PST założono jednakowe maksymalne i minimalne nastawy. Efektywność algorytmu była testowana dla maksymalnej dozwolonej prędkości cząstek w zakresie od 32 do 1 (przy tym $V_{\min} = -V_{\max}$) dla 40 cząstek roju.

W tablicach 1 i 2 oraz na rysunku 3 przedstawiono wyniki optymalizacji przy kryterium minimalizacji strat mocy czynnej w całej sieci testowej. Na podstawie tablicy 1 można zauważyć wyraźny wpływ ograniczeń prędkości na efektywność algorytmu optymalizacji (średnia liczba iteracji do uzyskania najlepszego rozwiązania). Na rysunku 3 widać zbieżność procesu optymalizacji.

Z tablicy 2 widać, że algorytm znalazł wartości nastaw PST, które pozwoliły na redukcję strat mocy czynnej w całej sieci testowej w stosunku do układu przed optymalizacją.

Tablica 1. Średnia liczba iteracji do znalezienia najlepszego rozwiązania dla różnych wartości maksymalnej dozwolonej prędkości V_{\max} (wartości średnie z 30 testów numerycznych)

	V_{\max}					
	32	16	8	4	3	1
Liczba iteracji	32	27	20	16	16	31



Rys. 3. Wykres zmian wartości funkcji celu (zależność (6)) w kolejnych iteracjach algorytmu optymalizacji rojowej dla liczby cząstek roju 40 dla różnych wartości V_{\max} (wartości średnie z 30 testów numerycznych)

Tablica 2. Zestawienie wyników optymalizacji

Obszar sieci testowej	Linia 15–33	Linia 19–34	Linia 23–24	Linia 30–38	$P_{bstr}^{1)}$	$P_{str}^{2)}$	$R^{3)}$
	PST1	PST2	PST3	PST4			
	zaczep	zaczep	zaczep	zaczep			
O1					MW	MW	%
O2	-3	-4	-5	11	34	36	-6
O3	(-1,9°)	(-2,5°)	(-3,1°)	(6,9°)	35	31	11
Całość					48	47	2
					117	115	2

- 1) Straty mocy czynnej w stanie bazowym układu (przed optymalizacją).
- 2) Straty mocy czynnej po optymalizacji.
- 3) Redukcja strat mocy czynnej w stosunku do układu bazowego.

6. PODSUMOWANIE

Użycie kilku PST zainstalowanych geograficznie blisko siebie w systemie elektroenergetycznym musi być skoordynowane w celu skutecznego wykorzystania tych urządzeń i uniknięcia ich niekorzystnych interakcji. W artykule problem koordynacji PST został rozwiązany poprzez optymalizację nastaw PST, opartą na algorytmie rojowym. Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację strat mocy czynnej w sieci testowej. Przeanalizowano wpływ maksymalnej dozwolonej prędkości cząstek na efektywność algorytmu optymalizacji. Stwierdzono wzrost efektywności algorytmu optymalizacji w przypadku ograniczenia prędkości cząstek V_{max} do około 10% maksymalnej wartości zmiennej X_{max} .

7. BIBLIOGRAFIA

1. Majchrzak H., Purchała K.: Przepływy nieplanowe i ich wpływ na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego, *Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój* 2012, nr 3–4, s. 8–15.
2. Position of ČEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS regarding the issue of Bidding Zones Definition, http://www.pse.pl/uploads/pliki/Position_of_CEPS_MAVIR_PSEO_SEPS-Bidding_Zones_Definition.pdf (dostęp: luty 2017).
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,

http://www.pse.pl/uploads/pliki/Unplanned_flows_in_the_CEE_region.pdf (dostęp: luty 2017).

4. Bieroński S., Korab R., Owczarek R.: Wpływ regulacji przesuwników fazowych instalowanych w rejonie Europy Środkowo-Wschodniej na transgraniczne przepływy mocy, *Kwartalnik Elektryka* 2015, zeszyt 2, s. 7–22.
5. Korab R., Owczarek R.: Application of phase shifting transformers in the tie-lines of interconnected power systems, *Przegląd Elektrotechniczny* 2015, nr 8, s. 166–170.
6. Korab R., Owczarek R.: Impact of phase shifting transformers on cross-border power flows in the Central and Eastern Europe region, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 2016, vol. 64, no. 1, pp. 127–133.
7. Kennedy J., Eberhart R.C.: Particle Swarm Optimization, *International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1995, pp. 1942–1948.
8. Szczepanik M.: Algorytm rojowy w optymalizacji układów mechanicznych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
9. Shi Y., Eberhart R.C.: A modified particle swarm optimizer, *International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage, Alaska, 4–9 May 1998, pp. 69–73.
10. Eberhart R.C., Shi Y.: Particle swarm optimization: developments, applications and resources, *Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, Korea, 27–30 May 2001, pp. 81–86.
11. Kennedy J., Eberhart R.C.: *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco 2001.
12. Power Systems and Evolutionary Algorithms, <http://www.al-roomi.org/power-flow/118-bus-system> (dostęp: luty 2017).
13. 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* 2011, vol. 26, no. 1, pp. 12–19.
14. Eberhart R.C., Shi Y.: Comparing inertia weights and construction factors in particle swarm optimization, *Congress on Evolutionary Computation*, San Diego, USA, July 2000, pp. 84–88.

SWARM OPTIMIZATION OF SETTINGS OF PHASE SHIFTING TRANSFORMERS IN A POWER SYSTEM

In response to the growing problem of unscheduled flows, a larger and larger number of transmission system operators in Europe equip their systems with phase shifting transformers (PSTs). PSTs are special transformers which installed in a transmission line enable regulation of the voltage phase angle and thereby change of the active power flow in the line. However, the use of several PSTs installed geographically close to each other must be coordinated in order to efficiently use those devices and avoid their adverse interactions. The coordination of a group of such devices leads to a multidimensional optimization problem. In this paper, the coordination problem was solved by optimization of settings of all analyzed PSTs, based on the swarm algorithm. This approach was examined and tested on an IEEE 118-bus test system. The minimization of active power losses in this system was used as the optimization criterion. The impact of maximum allowed velocity of particles on the effectiveness of the optimization algorithm was analyzed. The result shows that the improved effectiveness of the proposed approach can be obtained by careful selection of this parameter.

Keywords: power system, phase shifting transformer, particle swarm optimization, active power losses.