

Coordinated Control of Phase Shifting Transformers in the Power System

Authors

Roman Korab
Robert Owczarek
Marcin Połomski

Keywords

power system, phase shifting transformer, unscheduled flow, particle swarm optimisation

Abstract

In response to the growing problem of unscheduled flows, more and more transmission system operators in Europe provide their systems with phase shifting transformers (PST). However, the operations of several PSTs deployed close to each other must be coordinated for them to be effective and to avoid their harmful interactions. Coordination of a group of such devices leads to a problem of multidimensional optimisation. This paper presents a method of optimal PST setting based on the particle swarm optimisation (PSO) algorithm. As an optimisation criterion the minimization of unscheduled flow through the given system has been applied. The impact of the number of particles in the swarm and their maximum permissible velocity on the optimisation algorithm's efficiency was analysed. Results are presented for a 118-node test grid.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017308

Received: 14.02.2017

Received in revised form: 09.05.2017

Accepted: 28.06.2017

Available online: 30.09.2017

1. Introduction

The electricity market liberalisation and increased use of RES (mainly wind turbines) in the European power system are two major factors that have resulted in the large-scale appearance in interconnected transmission systems of so-called unscheduled flows (UF), i.e. equalising flows of active power between individual systems. This phenomenon is especially visible in the power systems of Central and Eastern Europe – CEE, where the excess power from wind power plants in the north of Germany is sent to load sites in the south of Germany and to Austria using the transmission grids of neighbouring countries, especially Poland and the Czech Republic. The uncontrollable increase in the unscheduled flows in recent years is a serious problem for TSOs. Significantly increasing the transmission grid's load, these flows threaten the secure operation of the interconnected systems. In addition, they force the TSOs to limit the transmission capacity of the cross-border interconnections made available to electricity market participants, and to apply emergency remedial measures. The main reason for this condition is the underdeveloped transmission grid in Germany in the north-south direction and commercial transactions between Germany and Austria [1, 2, 3].

In response to the growing problem of unscheduled flows, the TSOs in the CEE region decided to install phase shifting transformers (PST) to manage power flows at cross-border interconnections. Devices of this type have been already installed in selected cross-border lines between Poland and Germany, and the Czech Republic and Germany, and will soon be installed in subsequent lines in this area. PST is a special transformer installed in a transmission line to adjust the voltage phase angle, and thereby to alter the active power flow, in the line. With it the power flow in an interconnection can to some extent be increased or decreased. However, if several PSTs are deployed close to each other, adverse interactions can occur [4, 5, 6]. Consequently, the operations of several PSTs with interactive impact on the transmission grid must be adequately coordinated. Several methods of power flow control devices' co-ordination have been reported in literature [7–12].

This paper shows how to control the PST in order to obtain a condition that is optimal or almost optimal for the system from the perspective of an adopted criterion. A method of optimizing PST settings, based on the particle swarm optimisation algorithm (PSO), called stepPSO, is presented. As an optimisation criterion the minimization of unscheduled flow through the given system

has been applied. The impact was analysed of the number of particles in the swarm and their maximum permissible velocity on the optimisation algorithm's efficiency. Results are presented for a 118-node test grid.

2. PSO algorithm

The PSO algorithm was proposed in 1995 by Kennedy and Eberhart [13]. The algorithm is biologically inspired and based on the social behaviour of animal swarms (e.g. birds or fish) that work together to gain benefits, such as finding food or escaping predators.

The PSO algorithm operates on a group of particles (called a swarm), which is a set of potential solutions to the problem. The optimisation process is iteratively implemented and consists in finding better and better positions of the particles in the search space, and as a result, finding the optimal position (the best solution), to which the whole group (swarm) is attracted. In the optimisation process, the position of each particle is determined based of its previous experience and the experience of the whole group [14]. Position of i -th particle is updated by stochastic speed v_i . Such approach is described by the following relationships [15]:

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

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

where: N – number of particles in the swarm, D – number of decision variables (problem dimension), c_1, c_2 – acceleration factors, r_1, r_2 – random numbers in $[0, 1]$ range, ω – inertia weight, x_i^k – position of i -th particle in k -th iteration step, v_i^k – velocity of i -th particle in k -th iteration step, p_i^k – the best position so far of i -th particle, p_g^k – the best position found by the swarm leader, k – iteration step.

Factors c_1, c_2 control the range of motion of a particle in a single iteration. In most cases they are both identical. Factor ω is responsible for the balance between the abilities of a global and local search of the area of possible solutions. Its high value allows for a global search, while a smaller value prompts a local search. This multiplier may be constant or variable in the optimisation process [16].

The PSO algorithm operation may lead to a situation where the particles go beyond the search space limits. To avoid this, velocity limits are usually imposed [17]:

$$\begin{aligned} \text{if } v_{id}^k > V_{d \max}, \quad & \text{then } v_{id}^k = V_{d \max} \\ \text{if } v_{id}^k < V_{d \min}, \quad & \text{then } v_{id}^k = V_{d \min} \end{aligned} \quad (3)$$

where: $V_{d \max}$ – maximum particle velocity for decision variable d , $V_{d \min}$ – minimum particle velocity for decision variable d ; it is usually assumed that $V_{d \min} = -V_{d \max}$.

3. Optimisation problem formulation

The optimisation task was to find the optimal settings of four PSTs for minimizing the unscheduled flow (objective function) through area O1 of the test grid. The PSTs were installed in lines

O1–O2 (15–33 and 19–34) and O1–O3 (23–24 and 30–38) (Fig. 2). The search space limits were determined by the maximum and minimum settings of each PST. The mathematical task was formulated in the following form:

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

where [10]:

$$UF = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^l |P_i| - \left| \sum_{i=1}^l P_i \right| \right) \quad (5)$$

subject to constraints:

$$x_{d \min} \leq x_d \leq x_{d \max} \quad (6)$$

where: $f(\mathbf{x})$ – objective function, UF – unscheduled (transit) flow through the system, l – number of interconnection lines in the system, P_i – active power flow in i -th interconnection line (with the plus sign when it goes out of the system, and the minus sign when it comes into the system), \mathbf{x} – vector of variables containing PST settings, \mathbb{R}^4 – 4-dimensional real vector space, x_d – setting of d -th PST, $x_{d \min}, x_{d \max}$ – minimum and maximum settings of d -th PST.

It should be explained here that the objective function (5) is calculated from actual flows in interconnection lines (inter-system connections), including scheduled flows (from the area's power balance) and unscheduled flows (from power transits) alike, and in the calculation the scheduled flows reduce themselves. For example, considering Fig. 1, if the flows in the interconnection lines for system (area) C result from both power transits (100 MW) and the area balance (export of 100 MW), then the objective function (5) calculated for system C amounts to 100 MW:

$$UF_C = \frac{1}{2} ((|-100| + |200|) - (|-100 + 200|)) = \frac{1}{2} (300 - 100) = 100 \text{ MW}$$

that is as much as the unscheduled (transit) flow for that area. For the remaining areas, the unscheduled flows are zero.

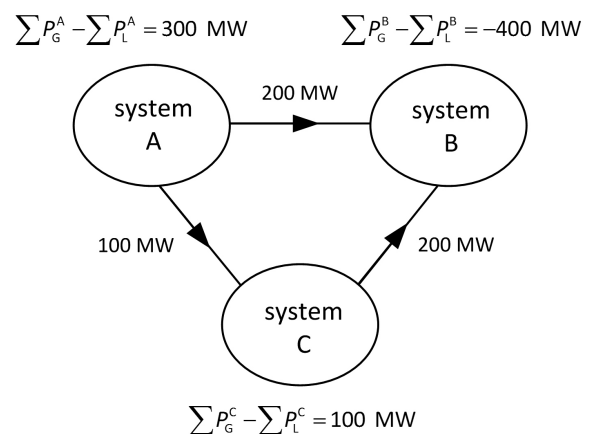


Fig. 1. Illustration of unscheduled flow determination in area C for power exchange between three systems: P_G – power generation, P_L – power demand in the area

In this task, because of the lack of an analytical formula that describes the dependence of the objective function on decision variables (PST settings), this problem must be solved by a method that relies solely on the simulation model evaluation. To solve the problem a PSO algorithm-based method was used. An advantage of this algorithm is that it does not need to know the objective function gradient, and is highly likely to find the global optimum [14].

To avoid the situation where (in the process of determining PST settings) the optimisation algorithm “sticks” to the extreme values of the admissible setting range, an approach was adopted that includes the so-called penalty function. The penalty function is introduced as an additional component of the objective function. Its mathematical formula is the following:

$$\min F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^4 \tag{7}$$

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

where: $F(\mathbf{x})$ – objective function including penalty function, $f(\mathbf{x})$ – original objective function, $p(\mathbf{x})$ – penalty function, a – constant penalty factor (experimentally selected).

4. IEEE118 test grid

The IEEE118 test grid [18] of 118 nodes and 186 branches was used for the tests. The grid was divided into three areas (Fig. 2). Grid node 69 was the balancing node. Area O1 is internally balanced. Area O3 exports power to area O2, but due to the grid structure and parameters a portion of that export is directed through area O1 grid, generating an unscheduled flow in this area. The arrows in Fig. 2 show the power flow directions through inter-area connections in the system’s baseline condition (prior to optimisation). Details of the test grid’s baseline conditions are shown in Tab. 1.

5. PST settings optimisation algorithm – step PSO method

(8) In the study, an approach was applied based on the combination of the classical Newton-Raphson load flow analysis used to determine the grid operating condition for PST setting

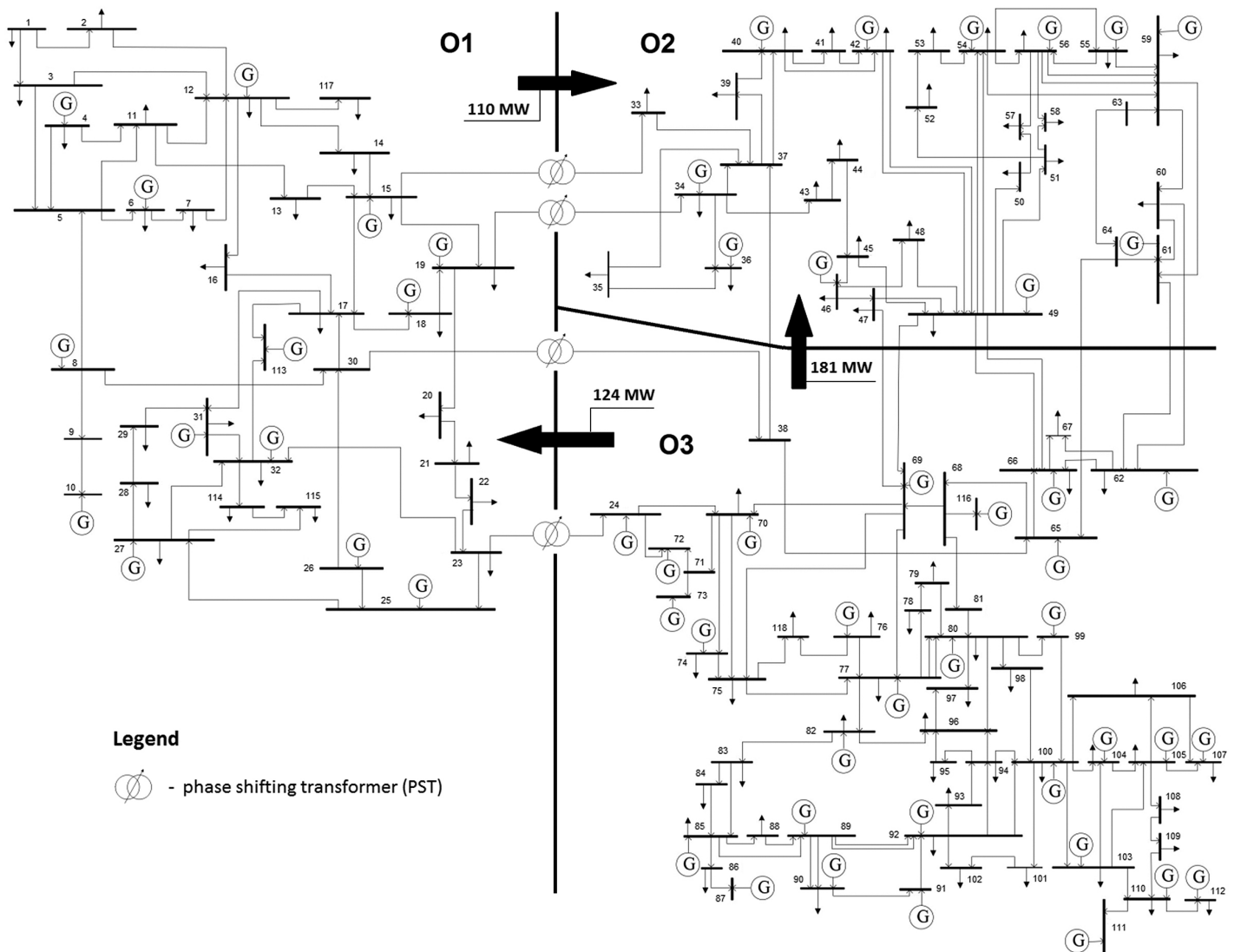


Fig. 2. Diagram of IEEE118 test grid [18] with adopted PST locations and division into three areas

Test grid area	Demand	Generation	Unscheduled flow	Active power losses
	P_L	P_G	UF	P_{str}
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
O1	963	983	110	34
O2	1342	1086	13	35
O3	1937	2290	13	48
Whole grid	4242	4359	136	117

Tab. 1. Test grid baseline conditions

setpoints, with the PSO algorithm used for the settings' optimisation. In the original stepPSO method the PST settings were subject to step changes by the value resulting from the angle change, per the number of changed tabs. The method's block diagram is shown in Fig. 3.

During the PSO algorithm initialization, an initial swarm of particles in a preselected number is generated, and each particle is allocated a random position from a set of permissible solutions, and a random velocity. The position of each particle is represented by a vector containing the settings of individual PSTs (potential solutions). The algorithm then proceeds to the procedures executed for a single particle in a swarm. Based on the particle location (PST setting), a test grid model is prepared, taking into account the proposed PST settings, and then the power flow is determined by the Matpower programme in the MATLAB environment [19]. The result is an objective function (unscheduled flow) value, which is then fed to PSO algorithm. Once the adjustment (objective function values) has been determined, the best positions of each swarm particle are updated and the swarm leader is selected. Then the iteration process begins. The particle velocities and positions are modified, the value of the adaptation function for each particle is determined, the swarm leader is updated, and the best particle

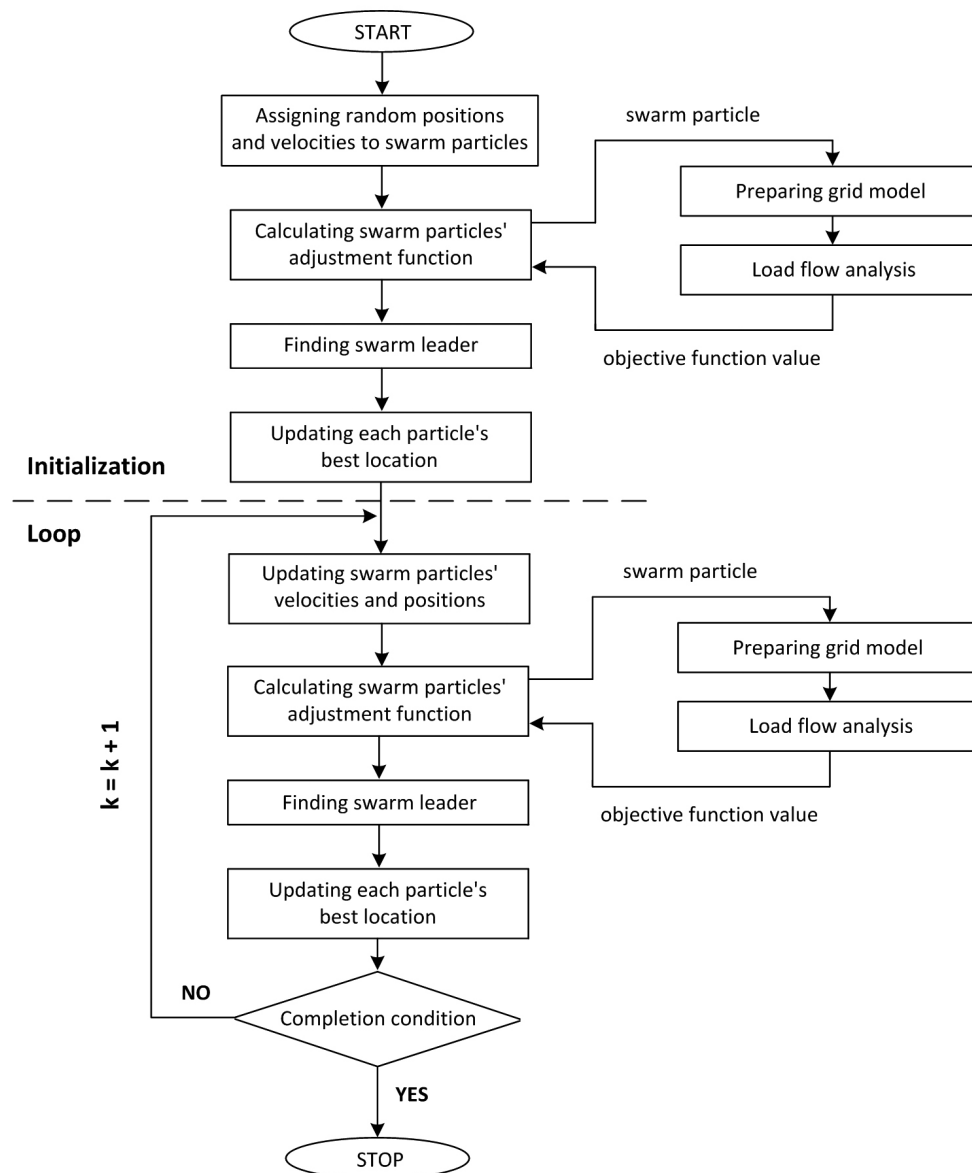


Fig. 3. PST settings optimisation algorithm – stepPSO method

positions are updated [20]. The algorithm runs iteratively until the completion condition (e.g. preset number of iterations) is met.

6. Calculation results for test grid

The following optimisation algorithm parameters were adopted:

- inertia weight $\omega = 0.73$
- acceleration factors $c_1 = c_2 = 1,5$
- maximum PST setting $X_{\max} = 32$ taps
- minimum PST setting $X_{\min} = -X_{\max} = -32$ taps
- angle adjustment step $20.1^\circ/32$ taps
- constant penalty factor $a = 0.07$
- maximum number of iterations in the optimisation process 150.

The acceleration and inertia factors corresponded to the values obtained by the constriction factor method [21]. For all analysed PSTs, the same maximum and minimum settings were adopted. The optimisation algorithm performance was tested for the maximum permitted velocity 32, 16, 8, 4, 2 (while $V_{\min} = -V_{\max}$)

and for the number of swarm particles 20, 40, 60 and 80. For each algorithm parameter setting, 20 numerical tests were performed, and then the mean of the results was calculated.

Fig. 4 and 5 show the swarm optimisation results for the criterion of the minimum unscheduled flow through the test grid's area O1. Based on Fig. 4, the clear impact of the speed constraints on the optimisation algorithm performance (average number of objective function calls) is noticeable. Here, the number of goal function calls (based on the number of swarm particles and the average number of iterations needed to obtain the best solution) directly translates into the optimisation duration (every goal function call entails the need to calculate the power flow). Fig. 5 shows the convergence of the optimisation process and it can be concluded that less swarm particles can be used to obtain the best solution.

Shown in Tab. 2 and Fig. 6 are the optimisation results obtained in the last iteration of the algorithm. It should be noted that the algorithm had found the PST settings that allowed for significant reduction of the unscheduled flow across the test grid area O1 in

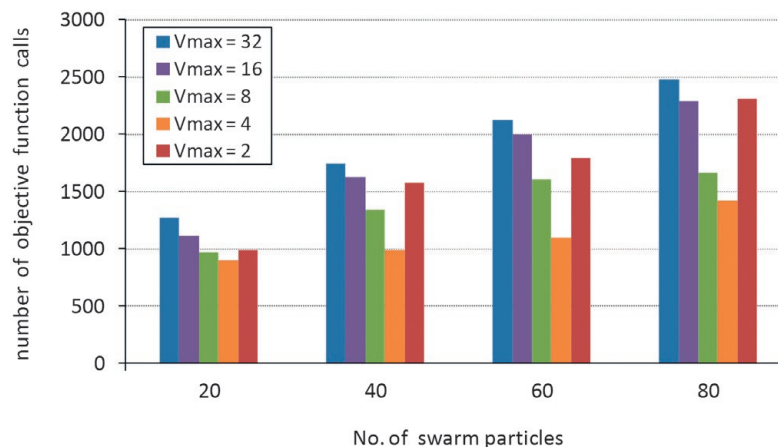


Fig. 4. Impact of swarm particle number and maximum allowed velocity V_{\max} on swarm optimisation algorithm performance (average results of 20 numerical tests)

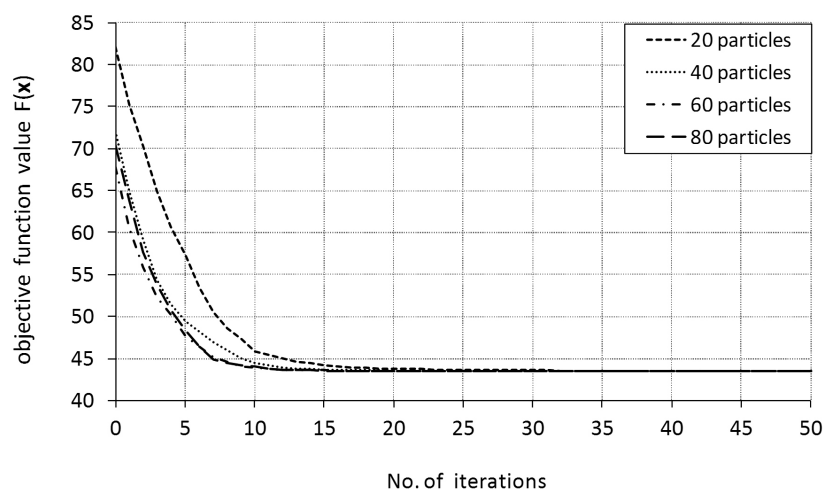


Fig. 5. Changes in objective function (formula (7)) in successive iterations of the swarm optimisation algorithm for maximum allowable velocity $V_{\max} = 4$ and various swarm particle numbers (average results of 20 numerical tests)

Test grid area	Line 15–33	Line 19–34	Line 23–24	Line 30–38	UF	R ²⁾	W ³⁾
	PST1	PST2	PST3	PST4			
	tap No.	tap No.	tap No.	tap No.			
O1 ¹⁾	20 (12.6°)	17 (10.7°)	-13 (-8.2°)	-25 (-15.7°)	3	97	-18
O2					4	69	63
O3					4	69	10
Whole grid					11	92	18

1) Test grid area for which the unscheduled flow was minimized

2) Unscheduled flow reduction relative to baseline system (see Tab. 1)

3) Increase in active power losses relative to baseline system (see Tab. 1)

Tab. 2. Swarm optimisation results

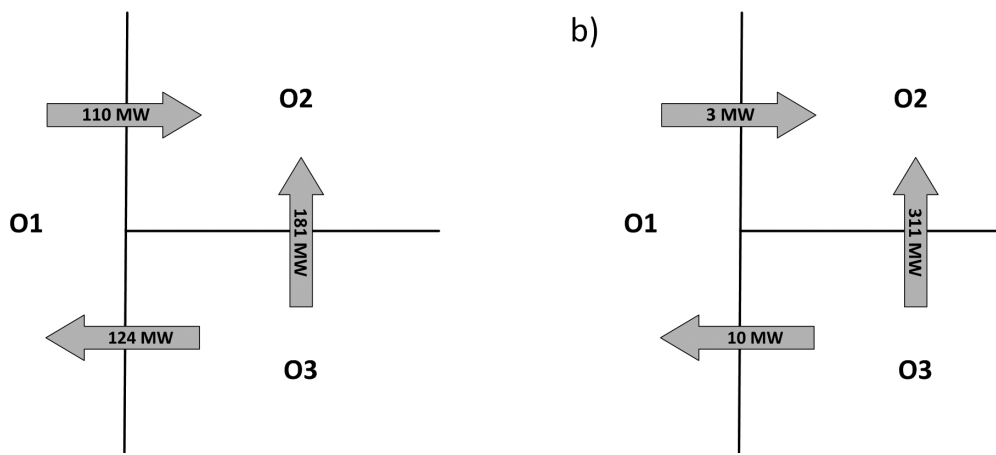


Fig. 6. Active power flows between test grid areas: a) before optimisation, b) after optimisation

relation to the baseline system (prior to optimisation). However, as shown by the results in Tab. 2, this is done at the expense of the increase in active power losses across the network.

7. Summary

The operations of several PSTs deployed close to each other must be coordinated for them to be effective and to avoid their harmful interactions. In this paper, the problem of PST coordination has been solved by optimising PST settings, based on the swarm algorithm. As an optimisation criterion the minimization of unscheduled flow through the given system has been applied. The proposed method was tested on test grid IEEE118, and the results showed its good performance.

An increase in the optimisation algorithm performance was found with the maximum particle speed V_{max} limitation to ca. 10% of the maximum value of variable X_{max} . It has been shown that the unscheduled flow can be decreased by PST at the expense of increased active power losses across the entire grid. Despite the good results of the proposed PST settings optimisation method obtained in the test grid, more research is still needed. Tests should be performed using a more complex grid model (here a series of tests is planned for a model of the 400/220/110 kV grid of several interconnected national power systems (PL, DE, CZ, SK, HU, AT, UA), assuming various balance conditions in individual areas).

REFERENCES

1. H. Majchrzak, K. Purchała, "Przepływy nieplanowe i ich wpływ na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego" [Unplanned power flows and their impact on power system security], *Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój*, No. 3–4, 2012, pp. 8–15.
2. "Position of ČEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS regarding the issue of Bidding Zones Definition" [online], http://www.pse.pl/uploads/pliki/Position_of_CEPS_MAVIR_PSEO_SEPS-Bidding_Zones_Definition.pdf [access: February 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" [online], http://www.pse.pl/uploads/pliki/Unplanned_flows_in_the_CEE_region.pdf [access: February 2017].
4. S. Bieroński, R. Korab, R. Owczarek, "Wpływ regulacji przesuwników fazowych instalowanych w rejonie Europy Środkowo-Wschodniej na transgraniczne przepływy mocy" [Regulation effect of phase shifting transformers installed in the CEE region on cross-border power flows], *Kwartalnik Elektryka*, Vol. 2, 2015, pp. 7–22.
5. R. Korab, R. Owczarek, "Application of phase shifting transformers in the tie-lines of interconnected power systems", *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 8, 2015, pp. 166–170.
6. R. Korab, R. Owczarek, "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*, Vol. 64, No. 1, 2016, pp. 127–133.
7. A. Oudalov, R. Cherkaoui, A.J. Germond, M. Emery, "Coordinated power flow control by multiple FACTS devices", Power Tech Conference, Bologna, Italy, 23–26 June 2003.
 8. B. Marinescu, J.M. Coulondre, "A coordinated phase shifting control and remuneration method for a zonal congestion management scheme", Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 10–13 Oct. 2004.
 9. A. Marinakis, M. Glavic, T. Van Cutsem, "Control of phase shifting transformers by multiple transmission system operators", Power Tech Conference, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007, pp. 119–124.
 10. A. Marinakis, M. Glavic, T. Van Cutsem, "Minimal Reduction of Unscheduled Flows for Security Restoration: Application to Phase Shifter Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, 2010, pp. 506–515.
 11. J. Verboomen, "Optimisation of transmission systems by use of phase shifting transformers", PhD Thesis, Technische Universiteit Delft 2008.
 12. U. Häger et al., "Multi-Agent System for Coordinated Control of Facts Devices", International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba, Brazil, 8–12 Nov. 2009, pp. 1–6.
 13. J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Particle Swarm Optimisation", International Conference on Neural Networks, Perth, Australia 1995, pp. 1942–1948.
 14. M. Szczepanik, T. Burczyński, "Swarm optimisation of stiffeners locations in 2-D structures", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 60, No. 2, 2012, pp. 241–246.
 15. Y. Shi, R.C. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer", International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska, 4–9 May 1998, pp. 69–73.
 16. R.C. Eberhart, Y. Shi, "Particle swarm optimisation: developments, applications and resources", Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 27–30 May 2001, pp. 81–86.
 17. J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Swarm Intelligence", Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco 2001.
 18. "Power Systems and Evolutionary Algorithms" [online], <http://www.al-roomi.org/power-flow/118-bus-system> [access: February 2017].
 19. R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, R.J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 1, 2011, pp. 12–19.
 20. M. Szczepanik, "Algorytmy rojowe w optymalizacji układów mechanicznych" [Swarm algorithms in optimisation of mechanical structures], Monograph, Silesian University of Technology, Gliwice 2013.
 21. R.C. Eberhart, Y. Shi, "Comparing inertia weights and construction factors in particle swarm optimisation", Congress on Evolutionary Computation, San Diego, USA, July 2000, pp. 84–88.

Roman Korab

Silesian University of Technology

e-mail: roman.korab@polsl.pl

Assistant Professor at the Institute of Electrical Power and Systems Control of the Silesian University of Technology in Gliwice. His research interests are focused primarily on the problems of operator planning and control of the power system operation in a developed electricity market.

Robert Owczarek

Silesian University of Technology

e-mail: robert.owczarek@polsl.pl

PhD student at the Institute of Electrical Power and Systems Control of the Silesian University of Technology in Gliwice. He deals with issues related to the use of phase shifting transformers to control power flows in cross-border interconnections, analysis of power flows in the power system and particle swarm optimisation.

Marcin Połomski

Silesian University of Technology

e-mail: marcin.polomski@polsl.pl

Graduate of the Silesian University of Technology in Gliwice. Now an assistant professor in the Institute of Electrical Engineering and Computer Science at the Faculty of Electrical Engineering of his alma mater. His research interests focus mainly on issues related to numerical methods, parallel and distributed calculations, and the applications of optimization methods.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 97–103. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Skoordynowane sterowanie przesuwnikami fazowymi w systemie elektroenergetycznym

Autorzy

Roman Korab
Robert Owczarek
Marcin Połomski

Słowa kluczowe

system elektroenergetyczny, przesuwnik fazowy, przepływ nieplanowy, optymalizacja rojem cząstek

Streszczenie

W odpowiedzi na rosnący problem przepływów nieplanowych coraz większa liczba operatorów systemów przesyłowych w Europie wyposaża swoje systemy w przesuwniki fazowe (PST). Jednakże użycie kilku PST zainstalowanych geograficznie lub elektrycznie blisko siebie musi być skoordynowane w celu skutecznego wykorzystania tych urządzeń i uniknięcia ich niekorzystnych interakcji. Koordynacja grupy takich urządzeń prowadzi do problemu optymalizacji wielowymiarowej. W artykule przedstawiono metodę optymalizacji nastaw PST opartą na algorytmie roju cząstek (PSO). Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację przepływu nieplanowego przez dany system. Przeanalizowano wpływ liczby cząstek roju oraz ich maksymalnej dozwolonej prędkości na efektywność algorytmu optymalizacji. Przedstawiono wyniki dla sieci testowej zawierającej 118 węzłów.

Data wpływu do redakcji: 14.02.2017

Data wpływu do redakcji po recenzjach: 09.05.2017

Data akceptacji artykułu: 28.06.2017

Data publikacji online: 30.09.2017

1. Wprowadzenie

Liberalizacja rynku energii elektrycznej oraz zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii (głównie wiatrowych) w europejskim systemie elektroenergetycznym to dwa zasadnicze czynniki, które spowodowały, że w połączonych systemach przesyłowych na szeroką skalę pojawiły się tzw. przepływy nieplanowe (ang. *Unscheduled Flows* – UF; nieplanowe przepływy wyrównawcze mocy czynnej pomiędzy poszczególnymi systemami). Zjawisko to jest szczególnie widoczne w systemach elektroenergetycznych Europy Środkowo-Wschodniej (ang. *Central and Eastern Europe* – CEE), 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. Niekontrolowany wzrost przepływów nieplanowych, jaki ma miejsce w ostatnich latach, jest poważnym problemem dla operatorów systemów przesyłowych (OSP). Przepływy te, znacząco zwiększając obciążenie sieci przesyłowej, prowadzą do zagrożenia bezpiecznej pracy połączonych systemów. W dodatku zmuszają OSP do ograniczania ilości mocy przesyłanych połączeń transgranicznych, udostępnianych uczestnikom rynku energii elektrycznej, oraz do stosowania nadzwyczajnych środków zaradczych. Główną przyczyną tego stanu jest niedostatecznie rozwinięta sieć przesyłowa w Niemczech na kierunku północ – południe oraz transakcje handlowe pomiędzy Niemcami a Austrią [1, 2, 3].

W odpowiedzi na rosnący problem przepływów nieplanowych OSP z rejonu CEE zdecydowali się na zainstalowanie tzw. przesuwników fazowych (ang. *Phase Shifting Transformers* – PST) do zarządzania

przepływami mocy na połączeniach transgranicznych. Urządzenia tego typu są już zainstalowane w wybranych liniach transgranicznych na przekrojach Polska – Niemcy i Czechy – Niemcy, a w najbliższych latach będą instalowane w kolejnych liniach wymiany w tym obszarze. 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 lub elektrycznie 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. Kilka metod koordynacji urządzeń sterujących przepływem mocy zostało przedstawionych w literaturze [7–12].

W niniejszym artykule pokazano, jak PST powinny być sterowane w celu uzyskania optymalnej czy prawie optymalnej, z punktu widzenia przyjętego kryterium, sytuacji dla danego systemu. Zaprezentowana została metoda optymalizacji nastaw PST, bazująca na algorytmie roju cząstek (algorytmie rojowym, ang. *Particle Swarm Optimization* – PSO; metoda stepPSO). Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację przepływu nieplanowego przez dany system. Przeanalizowano wpływ liczby cząstek roju oraz ich maksymalnej dozwolonej prędkości na efektywność algorytmu optymalizacji. Przedstawiono wyniki dla sieci testowej zawierającej 118 węzłów.

2. Algorytm PSO

Algorytm PSO został zaproponowany w 1995 roku przez Kennedy'ego

i Eberharta [13]. Algorytm jest inspirowany biologicznie i bazuje na zachowaniu społecznym roju zwierząt (np. ptaków lub ryb), które współpracują ze sobą w celu uzyskania korzyści, m.in. znalezienia pożywienia czy ucieczki przed drapieżnikiem. 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, a 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 [14]. Położenie i -tej cząstki jest uaktualniane przez stochastyczną prędkość v_i . Takie podejście opisują poniższe zależności [15]:

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

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

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.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 97–103. When referring to the article please refer to the original text.

PL

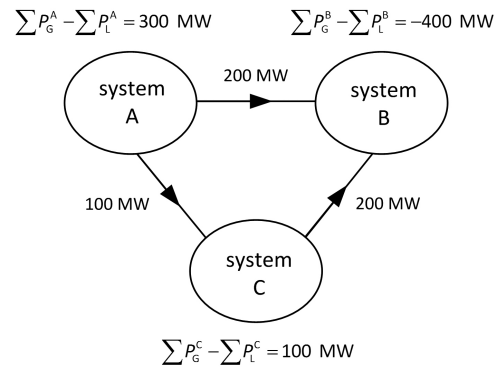
W większości przypadków oba są identyczne. Współczynnik ω odpowiada za równowagę pomiędzy zdolnością do globalnego i lokalnego przeszukiwania obszaru możliwych rozwiązań. Jego duża wartość umożliwia globalne przeszukiwanie, natomiast mniejsza – lokalne. Mnożnik ten może być stały lub ulegać zmianom w procesie optymalizacji [16].

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 [17]:

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

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 $V_{d \min} = -V_{d \max}$.

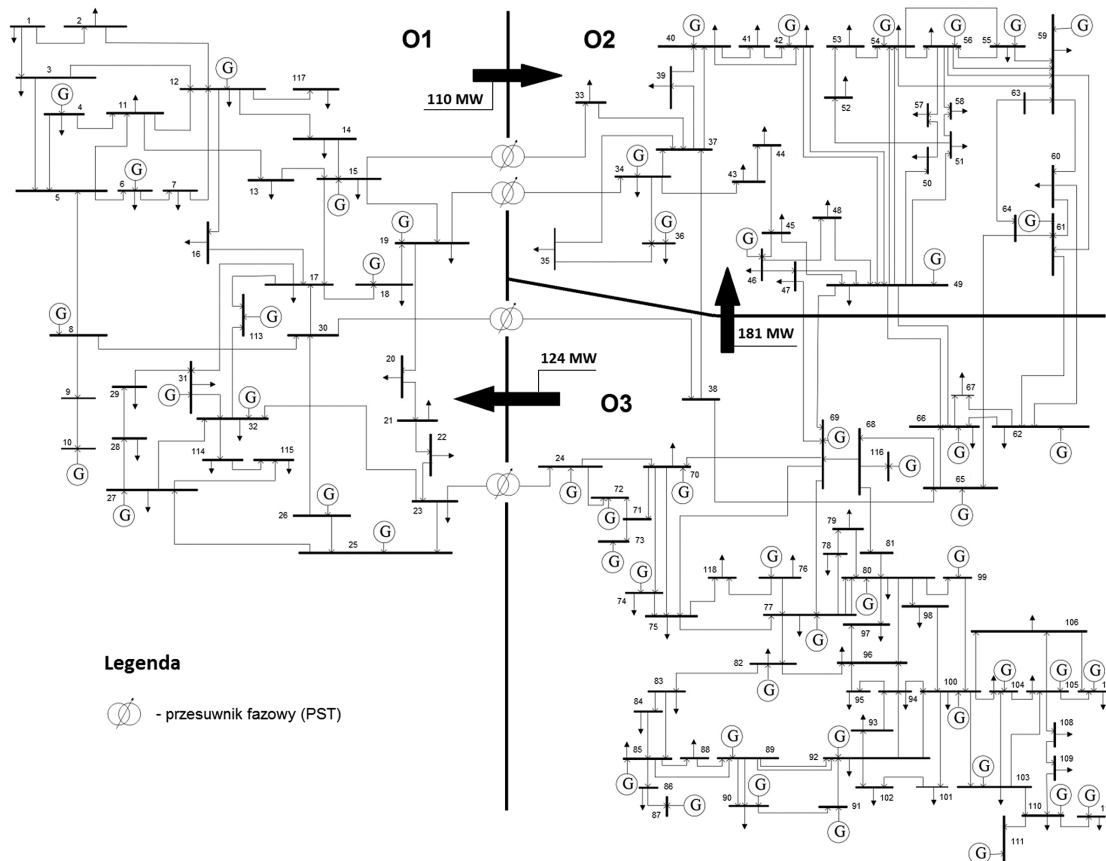
3. Sformułowanie problemu optymalizacji
Zadanie optymalizacji polegało na poszukiwaniu optymalnych nastaw czterech PST przy minimalizacji przepływu nieplanowanego (funkcja celu) przez obszar O1 sieci testowej. PST zainstalowane były w liniach na przekroju O1–O2 (linie 15–33 i 19–34) oraz O1–O3 (linie 23–24 i 30–38) (rys. 2). Granice przestrzeni poszukiwań określone były przez




Rys. 1. Ilustracja wyznaczania przepływu nieplanowanego dla obszaru C przy wymianie mocy między trzema systemami: P_G – moc wytwarzana, P_L – moc odbierana w obszarze

Obszar sieci testowej	Zapotrzebowanie	Generacja	Przepływ nieplanowany	Straty mocy czynnej
	P_L [MW]	P_G [MW]	UF [MW]	P_{str} [MW]
O1	963	983	110	34
O2	1342	1086	13	35
O3	1937	2290	13	48
Całość	4242	4359	136	117

Tab. 1. Dane dla stanu bazowego sieci testowej



Legenda

 - przesuwnik fazowy (PST)

Rys. 2. Schemat sieci testowej IEEE118 [18] wraz z założoną lokalizacją PST i podziałem na trzy obszary

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 97–103. When referring to the article please refer to the original text.

PL

maksymalne i minimalne nastawy każdego PST. Matematycznie zadanie zostało sformułowane w następującej formie:

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

gdzie [10]:

$$UF = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^l |P_i| - \left| \sum_{i=1}^l P_i \right| \right) \quad (5)$$

przy ograniczeniach:

$$x_{d \min} \leq x_d \leq x_{d \max} \quad (6)$$

gdzie: $f(\mathbf{x})$ – funkcja celu, UF – przepływ nieplanowany (tranzytowy) przez dany system, l – liczba linii wymiany danego systemu, P_i – przepływ mocy czynnej w i -tej linii wymiany (liczony ze znakiem plus, kiedy wpływa z systemu, i ze znakiem minus, kiedy wpływa do systemu), \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.

Należy tutaj wyjaśnić, że funkcja celu (zależność 5) jest obliczana na podstawie rzeczywistych przepływów w liniach wymiany (połączenia międzysystemowe), obejmujących zarówno przepływy planowane (wynikające z bilansu mocy obszaru), jak i przepływy nieplanowane (wynikające z tranzytów mocy), przy czym w obliczeniach przepływy planowane redukują się. Przykładowo, rozważając rys. 1, jeżeli przepływy w liniach wymiany dla systemu (obszaru) C wynikają zarówno z tranzytów mocy (100 MW), jak i z bilansu tego obszaru (eksport 100 MW), to funkcja celu (5), obliczona dla systemu C, daje wartość równą 100 MW:

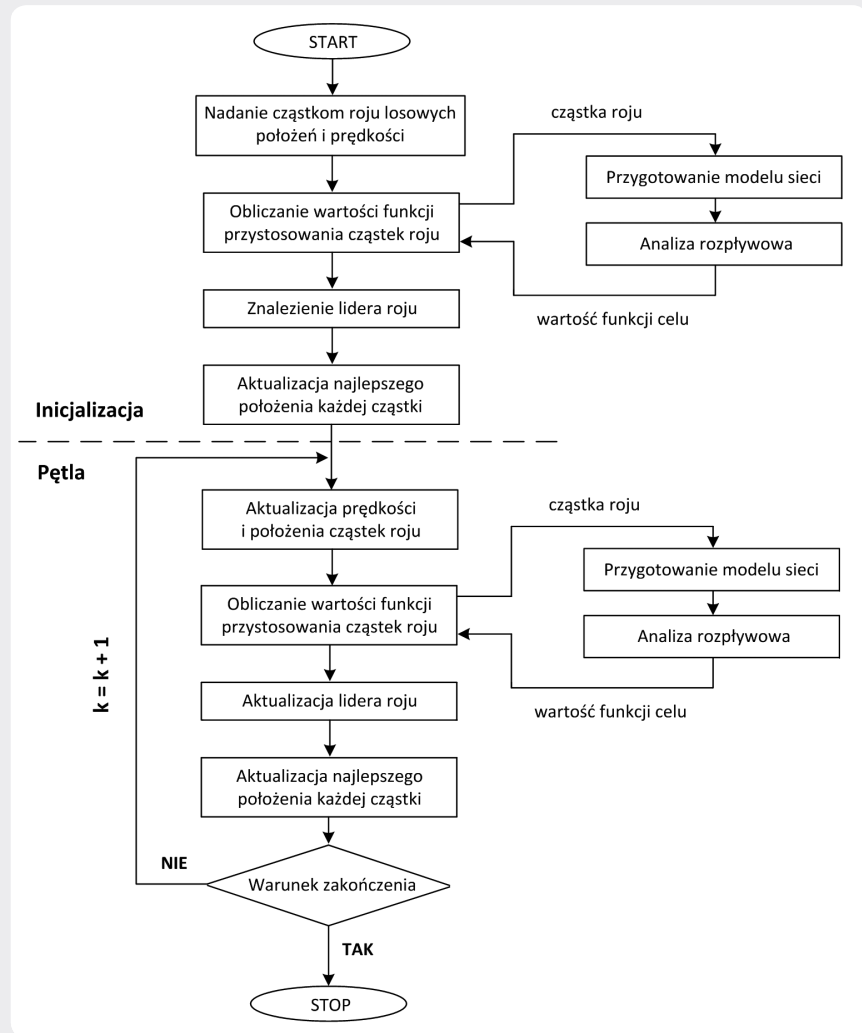
$$\begin{aligned} UF_C &= \frac{1}{2} ((|-100|+|200|) - (|-100+200|)) = \\ &= \frac{1}{2} (300-100) = 100 \text{ MW} \end{aligned}$$

czyli tyle, ile wynosi przepływ nieplanowany (tranzytowy) dla tego obszaru. Dla pozostałych obszarów przepływy nieplanowane są równe zero.

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 PSO. Zaletą tego algorytmu jest to, że nie wymaga znajomości gradientu funkcji celu i daje duże prawdopodobieństwo znalezienia optimum globalnego [14].

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:

$$\min F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + p(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^4 \quad (7)$$



Rys. 3. Algorytm optymalizacji nastaw PST – metoda stepPSO

Obszar sieci testowej	Linia 15–33	Linia 19–34	Linia 23–24	Linia 30–38	UF	R ²⁾	W ³⁾
	PST1	PST2	PST3	PST4			
	nr zacze pu	nr zacze pu	nr zacze pu	nr zacze pu	[MW]	[%]	[%]
O1 ¹⁾					3	97	-18
O2	20 (12,6°)	17 (10,7°)	-13 (-8,2°)	-25 (-15,7°)	4	69	63
O3					4	69	10
Całość					11	92	18

- 1) Obszar sieci testowej, dla którego minimalizowano przepływ nieplanowany.
- 2) Redukcja przepływu nieplanowego w stosunku do układu bazowego (patrz tab. 1).
- 3) Wzrost strat mocy czynnej w stosunku do układu bazowego (patrz tab. 1).

Tab. 2. Zestawienie wyników optymalizacji rojowej

$$p(\mathbf{x}) = a \sum_{d=1}^4 x_d^2 \quad (8)$$

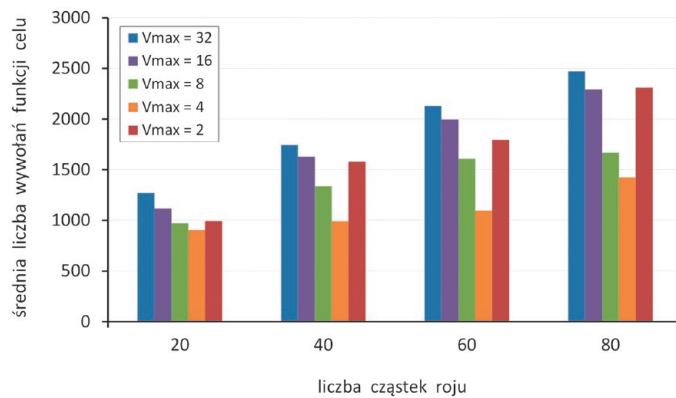
gdzie: $F(\mathbf{x})$ – funkcja celu uwzględniająca funkcję kary, $f(\mathbf{x})$ – oryginalna funkcja celu, $p(\mathbf{x})$ – funkcja kary, a – stały współczynnik kary (dobierany eksperymentalnie).

4. Sieć testowa IEEE118

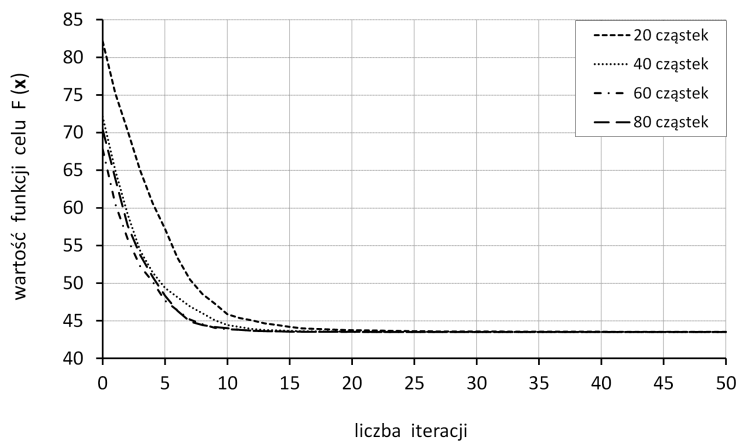
Do badań wykorzystana została sieć testowa IEEE118 [18] zawierająca 118 węzłów oraz 186 gałęzi. Sieć została podzielona na trzy obszary (rys. 2). Węzeł sieci nr 69 był węzłem wewnętrznym. Obszar O1 jest obszarem wewnętrznie zbilansowanym. Obszar O3 eksportuje moc do obszaru O2, jednak struktura i parametry sieci powodują, że część tego eksportu odbywa się

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 97–103. When referring to the article please refer to the original text.

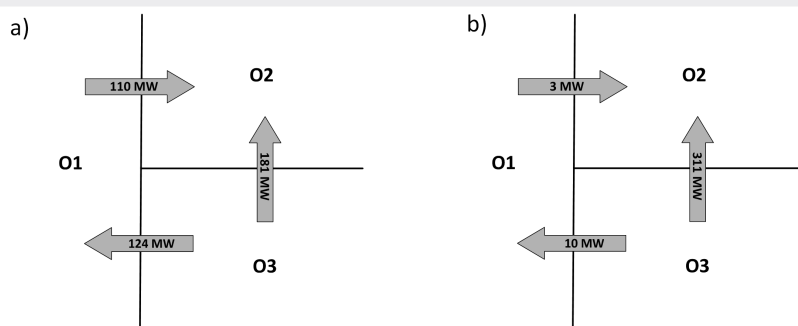
PL



Rys. 4. Wpływ liczby cząstek roju oraz maksymalnej dozwolonej prędkości V_{\max} na efektywność algorytmu optymalizacji rojowej (wartości średnie z 20 testów numerycznych)



Rys. 5. Wykres zmian wartości funkcji celu (zależność (7)) w kolejnych iteracjach algorytmu optymalizacji rojowej dla maksymalnej dozwolonej prędkości $V_{\max} = 4$ dla różnej liczby cząstek roju (wartości średnie z 20 testów numerycznych)



Rys. 6. Przepływy mocy czynnej na przekrojach międzyobszarowych sieci testowej: a) przed optymalizacją, b) po optymalizacji

przez sieć obszaru O1, wzbudzając w tym obszarze przepływ nieplanowany. Strzałki na rys. 2 przedstawiają kierunek przepływu mocy na przekrojach międzyobszarowych w stanie bazowym układu (przed optymalizacją). Dane dla stanu bazowego sieci testowej pokazano w tab. 1.

5. Algorytm optymalizacji nastaw PST – metoda stepPSO

W badaniach zastosowano podejście bazujące na połączeniu klasycznej metody wyznaczania rozprzyszczenia mocy (metody Newtona-Raphsona) do wyznaczenia stanu pracy sieci dla zadanych wartości nastaw PST oraz algorytmu PSO do optymalizacji nastaw PST. W opracowanej metodzie stepPSO nastawy PST podlegały zmianom

skokowym o wartość wynikającą ze zmiany kąta, przypadającą na liczbę przełączanych zaczepek. Schemat blokowy opracowanej metody został przedstawiony na rys. 3. Podczas inicjalizacji algorytmu PSO wygenerowany zostaje początkowy rój cząstek o zadanej liczebności, a każdej z cząstek nadawane są losowe położenia, ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych, oraz losowe wartości 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 położenia cząstki (nastaw PST) przygotowujemy jest model sieci testowej, uwzględniający proponowane nastawy PST, po czym wyznaczony jest rozprzyszczenie mocy za pomocą pracującego w środowisku MATLAB programu Matpower [19]. W rezultacie uzyskiwana zostaje wartość funkcji celu (wartość przepływu nieplanowego), która to następnie przekazywana jest do algorytmu PSO. Po wyznaczeniu przystosowania (wartości funkcji celu) dla każdej cząstki roju aktualizowane są 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 położenia cząstek [20]. Algorytm działa iteracyjnie aż do momentu spełnienia warunku zakończenia (np. zadeklarowanej liczby iteracji).

6. 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 $X_{\max} = 32$ zaczepek
- minimalna nastawa PST $X_{\min} = -X_{\max} = -32$ zaczepek
- wartość skoku regulacji kąta $20,1^\circ/32$ zaczepek
- stały współczynnik kary $a = 0,07$
- maksymalna liczba iteracji procesu optymalizacji 150.

Wartości współczynników przyspieszenia i bezwładności odpowiadały wartościom uzyskanym za pomocą metody z współczynnikiem tłumienia (ang. *constriction factor*) [21]. Dla wszystkich analizowanych PST założono jednakowe maksymalne i minimalne nastawy. Efektywność algorytmu optymalizacji była testowana dla maksymalnej dozwolonej prędkości 32, 16, 8, 4, 2 (przy tym $V_{\min} = -V_{\max}$) oraz dla liczby cząstek roju 20, 40, 60 i 80. Dla każdego z ustawień parametrów algorytmu przeprowadzono 20 testów numerycznych, a następnie obliczono średnią z uzyskanych wyników.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono wyniki optymalizacji rojowej dla kryterium minimalizacji przepływu nieplanowego przez obszar O1 sieci testowej. Na podstawie rys. 4 można zauważyć wyraźny wpływ ograniczeń prędkości na efektywność algorytmu optymalizacji (średnią liczbę wywołań funkcji celu). Tutaj liczba wywołań funkcji celu (liczona na podstawie liczby cząstek roju oraz

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 97–103. When referring to the article please refer to the original text.

PL

średniej liczby iteracji do uzyskania najlepszego rozwiązania) ma bezpośrednio przełożenie na czas optymalizacji (każde wywołanie funkcji celu wiąże się z koniecznością obliczenia rozpręży mocy). Na rys. 5 widać zbieżność procesu optymalizacji oraz można wywnioskować, że mniejsza liczba cząstek roju może być zastosowana do uzyskania najlepszego rozwiązania.

W tab. 2 oraz na rys. 6 przedstawiono wyniki optymalizacji otrzymane w ostatniej iteracji algorytmu. Należy zauważyć, że algorytm znalazł wartości nastaw PST, które pozwoliły na znaczące zmniejszenie wartości przepływu nieplanowego przez obszar O1 sieci testowej w stosunku do układu bazowego (przed optymalizacją). Przy czym, jak dowodzą wyniki z tab. 2, odbywa się to kosztem wzrostu strat mocy czynnej w całej sieci.

7. Podsumowanie

Użycie kilku PST zainstalowanych geograficznie lub elektrycznie blisko siebie musi być skoordynowane w celu skutecznego wykorzystania tych urządzeń i uniknięcia ich niekorzystnych interakcji. W niniejszym artykule problem koordynacji PST został rozwiązany poprzez optymalizację nastaw PST, opartą na algorytmie rojowym. Jako kryterium optymalizacji zastosowano minimalizację przepływu nieplanowego przez dany system. Zaproponowana metoda została sprawdzona na sieci testowej IEEE118, a wyniki badań wykazały jej dobrą efektywność.

Stwierdzono wzrost efektywności algorytmu optymalizacji w przypadku ograniczenia prędkości cząstek V_{max} do ok. 10% maksymalnej wartości danej zmiennej X_{max} . Wykazano, że ograniczenie przepływu nieplanowego za pomocą PST może odbywać się kosztem wzrostu strat mocy czynnej w całej sieci.

Mimo dobrych wyników opracowanej metody optymalizacji nastaw PST, uzyskanych dla sieci testowej, nadal potrzeba więcej badań. Należy 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.

Bibliografia

- 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.
- Position of CEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS regarding the issue of Bidding Zones Definition [online], http://www.pse.pl/uploads/pliki/Position_of_CEPS_MAVIR_PSEO_SEPS-Bidding_Zones_Definition.pdf [dostęp: luty 2017].
- Joint study by CEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS, Unplanned flows in the CEE region in relation to the common market area Germany-Austria [online], http://www.pse.pl/uploads/pliki/Unplanned_flows_in_the_CEE_region.pdf [dostęp: luty 2017].
- Bieroński S., Korab R., Owczarek R., Wpływ regulacji przesuwników fazowych instalowanych w rejonie Europy Środkowo-Wschodniej na transgraniczne przepływy mocy, *Kwartalnik Elektryka* 2015, z. 2, s. 7–22.
- 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.
- 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, s. 127–133.
- Oudalov A., Cherkaoui R., Germond A.J., Emery M., Coordinated power flow control by multiple FACTS devices, Power Tech Conference, Bologna, Italy, 23–26 June 2003.
- Marinescu B., Coulondre J.M., A coordinated phase shifting control and remuneration method for a zonal congestion management scheme, Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 10–13 Oct. 2004.
- Marinakis A., Glavic M., Van Cutsem T., Control of phase shifting transformers by multiple transmission system operators, Power Tech Conference, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007, s. 119–124.
- 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* 2010, Vol. 25, No.1, s. 506–515.
- Verboomen J., Optimisation of transmission systems by use of phase shifting transformers, PhD Thesis, Technische Universiteit Delft 2008.
- Häger U. i in., Multi-Agent System for Coordinated Control of Facts Devices, International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba, Brazil, 8–12 Nov. 2009, s. 1–6.
- Kennedy J., Eberhart R.C., Particle Swarm Optimization, International Conference on Neural Networks, Perth, Australia 1995, s. 1942–1948.
- Szczepanik M., Burczyński T., Swarm optimization of stiffeners locations in 2-D structures, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 2012, Vol. 60, No. 2, s. 241–246.
- Shi Y., Eberhart R.C., A modified particle swarm optimizer, International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska, 4–9 May 1998, s. 69–73.
- Eberhart R.C., Shi Y., Particle swarm optimization: developments, applications and resources, Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, 27–30 May 2001, s. 81–86.
- Kennedy J., Eberhart R.C., Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco 2001.
- Power Systems and Evolutionary Algorithms [online], <http://www.al-roomi.org/power-flow/118-bus-system> [dostęp: luty 2017].
- 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, s. 12–19.
- Szczepanik M., Algorytmy rojowe w optymalizacji układów mechanicznych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- Eberhart R.C., Shi Y., Comparing inertia weights and construction factors in particle swarm optimization, Congress on Evolutionary Computation, San Diego, USA, July 2000, s. 84–88.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 97–103. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Roman Korab

dr hab. inż.

Politechnika Śląska

e-mail: roman.korab@polsl.pl

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Zainteresowania naukowe koncentrują się głównie wokół problemów związanych z operatorskim planowaniem pracy i sterowaniem pracą systemu elektroenergetycznego działającego w warunkach rozwiniętego rynku energii elektrycznej.

Robert Owczarek

mgr inż.

Politechnika Śląska

e-mail: robert.owczarek@polsl.pl

Doktorant w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z zastosowaniem przesuwników fazowych do sterowania przepływami mocy na połączeniach transgranicznych, analizą rozplywów mocy w systemie elektroenergetycznym oraz optymalizacją rojem cząstek.

Marcin Połomski

dr inż.

Politechnika Śląska

e-mail: marcin.polomski@polsl.pl

Absolwent Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki, na Wydziale Elektrycznym swojej macierzystej uczelni. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się głównie wokół zagadnień dotyczących metod numerycznych, obliczeń równoległych i rozproszonych oraz zastosowań wybranych metod optymalizacji.