

# Rešavanje problema ekonomične raspodele snaga generatora primenom fazorske optimizacije roja čestica

Milena Jevtić, Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević, Sanela Arsić i Dardan Klimenta

**Apstrakt**— Minimizacija troškova goriva i emisije štetnih gasova u termoelektranama podešavanjem izlaznih snaga generatora je jedan od važnih problema u upravljanju elektroenergetskim sistemima. Ovaj problem je poznat kao Combined economic emission dispatch (CEED) problem. U ovom radu je za rešavanje CEED problema predložen meta-heuristički algoritam pod nazivom Fazorska optimizacija roja čestica, koji predstavlja unapređenu varijantu Optimizacije roja čestica. Parametri Fazorske optimizacije roja čestica se tokom iteracija automatski podešavaju pa je ovaj algoritam, adaptivni i neparametarski, što je njegova prednost. Performanse predloženog algoritma za rešavanje CEED problema se u radu ocenjuju na standardnom IEEE test sistemu sa 30 čvorova i 6 generatora. Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da ovaj algoritam ima bolje karakteristike od algoritama koji su primenjeni u drugim publikovanim radovima za rešavanje CEED problema.

**Ključne reči** - Combined economic emission dispatch; Fazorska optimizacija roja čestica; Upravljanje elektroenergetskim sistemima.

## I. UVOD

Ekonomična raspodela snaga generatora sa istovremenom minimizacijom emisije štetnih gasova (eng. Combined Economic and Emission Dispatch (CEED)) predstavlja podešavanje izlaznih snaga određenog broja generatora u termoelektranama, pri zadatom opterećenju i pri zadatim ograničenjima u sistemu, minimizirajući troškove goriva i emisiju štetnih gasova. Funkcije koje opisuju emisiju štetnih gasova i troškove goriva, uzimajući u obzir efekat ventila u elektrani, su nelinearne i nekonveksne tako da je CEED problem u literaturi rešavan metaheurističkim optimizacionim algoritmima koji daju približno rešenje. U publikovanim radovima je predložen veći broj metaheurističkih algoritama u

Milena Jevtić – Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija (e-mail: mjevtic@tfbor.bg.ac.rs).

Miroljub Jevtić – Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Univerzitet u Prištini, Knjaza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija (e-mail: miroljub.jevtic@pr.ac.rs).

Jordan Radosavljević - Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Univerzitet u Prištini, Knjaza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija (e-mail: jordan.radosavljevic@pr.ac.rs).

Sanela Arsić – Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija (e-mail: saarsic@tfbor.bg.ac.rs).

Dardan Klimenta - Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Univerzitet u Prištini, Knjaza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija (e-mail: dardan.klimenta@pr.ac.rs).

cilju dobijanja što tačnijeg i što bržeg rešenja ovog problema [1], [2], [3]. Brzina i tačnost ovih algoritama utiču na kvalitet softvera, u koje se inkorporiraju, a koji služe za upravljanje emisijom gasova i troškovima goriva u termoelektrani.

U ovom radu se za rešavanje CEED problema predlaže primena jednog od najnovijih algoritama, Fazorske optimizacije roja čestica (eng. Phasor particle swarm optimization (PPSO)) [4].

Cilj ovog rada je da se pokaže da PPSO može efikasno da se primeni za rešavanje CEED problema i da daje bolje rezultate u odnosu na druge algoritme koji su u literaturi primenjivani za rešavanje istog problema.

## II. CEED MODEL

Funkcija troškova goriva generatora u termoelektrani obično ima kvadratni oblik:

$$F_g(P_g) = a_g + b_g P_g + c_g P_g^2, \quad g = 1, 2, \dots, G \quad (1)$$

gde su:  $F_g$  (\$/h) troškovi goriva  $g$ - tog generatora,  $P_g$  (MW) izlazna snaga  $g$ -tog generatora,  $a_g$ ,  $b_g$  i  $c_g$  koeficijenti.

Funkcija  $F_g(P_g)$  postaje ne-konveksna kada se uzme u obzir promena snage zbog sekventnog otvaranja ventila u termoelektrani (efekat ventila) [5]:

$$F_g(P_g) = a_g + b_g P_g + c_g P_g^2 + \left| d_g \sin\left(e_g (P_g^{\min} - P_g)\right) \right| \quad (2)$$

gde su:  $d_g$  i  $e_g$  koeficijenti koji se odnose na efekat ventila i  $P_g^{\min}$  donja granična snaga  $g$ -tog generatora.

Funkcija koja modeluje emisiju gasova u termoelektrani se predstavlja kao zbir kvadratne i eksponencijalne funkcije izlazne snage generatora [6], [7]:

$$E_g(P_g) = \alpha_g + \beta_g P_g + \eta_g P_g^2 + \xi_g \exp(\lambda_g P_g) \quad (3)$$

gde su:  $E_g$  (t/h) količina gasova koji se emituju tokom rada  $g$ -tog generatora,  $P_g$  (MW) izlazna snaga  $g$ -tog generatora, i  $\alpha_g$ ,  $\beta_g$ ,  $\eta_g$ ,  $\xi_g$  i  $\lambda_g$  emisijski koeficijenti.

Ako se (1) i (2) kombinuju sa (3), dobija se sledeća funkcija [8]:

$$FE = w \sum_{g \in G} F_g(P_g) + (1-w) \gamma \sum_{g \in G} E_g(P_g) \quad (4)$$

gde su:  $\gamma$  factor skaliranja,  $w$  težinski faktor čija vrednost se uzima u granicama  $0 < w < 1$ , i  $G$  je ukupni broj generatora koji se razmatraju, priključenih na system. CEED problem se rešava tako što se izabere faktor  $w$  a zatim minimizuje funkcija (4). Izborom gornje granice težinskog faktora,  $w = 1$ , minimizuje se samo funkcija  $F_g(P_g)$ , izborom donje granice,  $w = 0$ , minimizuje se samo funkcija  $E_g(P_g)$ , dok izbor drugih vrednosti težinskog faktora odgovara istovremenoj minimizaciji troškova goriva i emisije gasova. Faktor skaliranja  $\gamma$  je uveden da bi se funkcija (4), rešavala kao jednociljni optimizacioni problem umesto kao dvociljni.

Minimizacija se vrši za zadate granice snage svakog generator, tj.

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (5)$$

gde su:  $P_g^{\min}$ ,  $P_g^{\max}$  i  $P_g$  su minimalna, maksimalna i stvarna snaga  $g$ -tog generatora, i za zadatu ravnotežu između proizvedene snage i utrošene snage, tj.

$$\sum_{g \in G} P_g - P_D - P_{loss} = 0, \quad (6)$$

gde su:  $P_D$  ukupna snaga svih potrošača i  $P_{loss}$  gubici snage u prenosnom sistemu.

Gubici snage u prenosnom sistemu,  $P_{loss}$ , se izražavaju kao kvadratna funkcija trenutne snage generatora, tj. iz Kronove formule gubitaka [8], kao:

$$P_{loss} = \sum_{g \in G} \sum_{j \in G} P_g B_{gj} P_j + \sum_{g \in G} B_{0g} P_g + B_{00} \quad (7)$$

gde su  $B_{gj}$  i  $B_{0g}$  koeficijenti  $B$ -loss matrice a  $B_{00}$  je konstanta.

Da bi se zadovoljilo ograničenje (6), tokom iterativnog procesa optimizacije, jedan od generatora (npr. generator  $G$ ) je odabran kao zavisni (labav) generator. Za taj generator vrednost izlazne snage,  $P_G$ , se računa iz sledeće jednačine:

$$P_G = P_D + P_{loss} - \sum_{g=1}^{G-1} P_g \quad (8)$$

Gubici snage,  $P_{loss}$ , se onda dobijaju na sledeći način: (i) zadavanje početne vrednosti  $P_{loss} = P_{loss}^{(0)} = 0$  u (8), (ii) određivanje vrednosti  $P_G^{(0)}$  iz (8) za  $P_{loss} = P_{loss}^{(0)} = 0$ , (iii) izračunavanje nove vrednosti  $P_{loss}^{(1)}$  primenom (7), (iv) proveravanje da li je razlika između dve uzastopne vrednosti gubitaka snage manja ili jednaka zadatoj dozvoljenoj toleranciji  $\delta$ , tj.

$$\left| P_{loss}^{(1)} - P_{loss}^{(0)} \right| \leq \delta \quad (9)$$

i (v) izračunavanje vrednosti  $P_G^{(1)}$  primenom (8) za  $P_{loss} = P_{loss}^{(1)}$ . Ako je razlika  $\left| P_{loss}^{(1)} - P_{loss}^{(0)} \right|$  manja ili jednaka zadatoj toleranciji  $\delta$ , ograničenje (6) koje predstavlja ravnotežu snaga, je zadovoljeno. U suprotnom, procedura se ponavlja. Kada je vrednost  $P_G$  izračunata, potrebno je proveriti da li se vrednost  $P_G$  nalazi u odgovarajućim granicama (5). Zatim se definiše promenljiva,  $P_G^{\lim}$ , na sledeći način:

$$P_G^{\lim} = \begin{cases} P_G^{\max} & \text{ako je } P_G > P_G^{\max} \\ P_G^{\min} & \text{ako je } P_G < P_G^{\min} \\ P_G & \text{ako je } P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

Da bi se osiguralo da zavisna promenljiva  $P_G$  ostaje u zadatim granicama, funkciji cilja (4) se dodaje kvadratni penalni član sa penalnim faktorom,  $\lambda_p$ . Na taj način se dobija proširena funkcija cilja:

$$FE_p = FE + \lambda_p (P_G - P_G^{\lim})^2 \quad (11)$$

### III. PSO I PPSO

Optimizacija roja čestica (eng. Particle swarm optimization (PSO)) je inspirisana ponašanjem rojeva u prirodi u potrazi za hranom [9]. Jedinke u jatu menja svoju poziciju i brzinu kretanja postepeno se krećući ka izvoru hrane. U PSO, svaka jedinica (čestica) u jatu je predstavljena vektorima pozicije i brzine, na sledeći način:

$$X_i(t) = [x_i^1(t), \dots, x_i^k(t), \dots, x_i^n(t)] \quad (12)$$

$$V_i(t) = [v_i^1(t), \dots, v_i^k(t), \dots, v_i^n(t)] \quad (13)$$

gde su  $X_i(t)$  i  $V_i(t)$  vektor pozicije i vektor brzine  $i$ -te čestice u vremenu (iteraciji)  $t$ ;  $x_i^k(t)$  i  $v_i^k(t)$  su pozicija i brzina  $i$ -te čestice  $k$ -te dimenzije. Početne vrednosti vektora su slučajno odabrane. Brzine i pozicije čestica u narednoj iteraciji su određene pomoću sledećih jednačina:

$$v_i^k(t+1) = w(t)v_i^k(t) + C_1 r_1 (pbest_i^k(t) - x_i^k(t)) + C_2 r_2 (gbest^k(t) - x_i^k(t)) \quad (14)$$

$$x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \quad (15)$$

U (14),  $w(t)$  je inercijalna težina,  $C_1$  i  $C_2$  su parametri regulacije ubrzanja čestica,  $r_1$  i  $r_2$  su are the uniformno raspoređeni slučajni brojevi unutar granica  $[0,1]$ ,  $pbest_i^k(t)$  je najbolja pozicija  $i$ -te čestice  $k$ -te dimenzije (individualna najbolja pozicija), i  $gbest^k$  je globalno najbolja pozicija u celoj populaciji. Drugi član u (14) predstavlja exploracioni deo PSO. Inercijalna težina vrši uravnoteženje između lokalnog i globalnog pretraživanja rešenja. U početnom stadijumu procesa pretraživanja vrednost  $w$  je velika kako bi se pojačala globalna eksploracija. U poslednjem stadijumu vrednost  $w$  se smanjuje kako bi se dobila bolja lokalna eksploracija.

Algoritam PPSO je predložio Gholamghasemi M. sa koautorima 2019. godine [4]. Parametri  $C_1$  i  $C_2$ , koji se u algoritmu PSO zadaju ručno, u PPSO algoritmu su modelovani faznim uglom ( $\theta$ ) definisanim u teoriji fazora. Na taj način, PPSO, za razliku od PSO, postaje adaptivni i neparatarski algoritam. Vrednost  $w(t)$  je u PPSO jednaka nuli. Brzina u svakoj iteraciji se ažurira na sledeći način.

$$V_i(t) = |\cos \theta_i(t)|^{2 \sin \theta_i(t)} \times (Pbest_i(t) - X_i(t)) + |\sin \theta_i(t)|^{2 \cos \theta_i(t)} \times (Gbest(t) - X_i(t)) \quad (16)$$

gde su:  $Pbest_i(t)$  i  $Gbest(t)$  vektori individualne i globalne najbolje pozicije;  $X_i(t)$  je vektor trenutne pozicije  $i$ -te čestice u  $t$ -toj iteraciji;  $\theta_i$  jedno-dimenzioni fazni ugao vektora  $\vec{X}_i \angle \theta_i$  za  $i$ -tu česticu. Za početnu populaciju koja se sastoji od  $N$  čestica (za  $t = 1$ ), vektor  $\vec{X}_i$  je:  $\vec{X}_i = |X_i| \angle \theta_i$  ( $i = 1:N$ ). Na početku pretraživanja rešenja, generisano je  $N$  slučajnih čestica (rešenja) u  $n$ -dimenzionom prostoru problema sa faznim uglom  $\theta_i$  dobijenim iz ravnomerne raspodele  $\theta_i = U(0, 2\pi)$ , i sa početnom granicom brzine  $V_{i,max}$ . Donja i gornja granica  $V_i(t)$  su definisane sledećim intervalom  $[-V_{i,max}(t), V_{i,max}(t)]$ .

Pozicije čestica se ažuriraju pomoću sledeće jednačine:

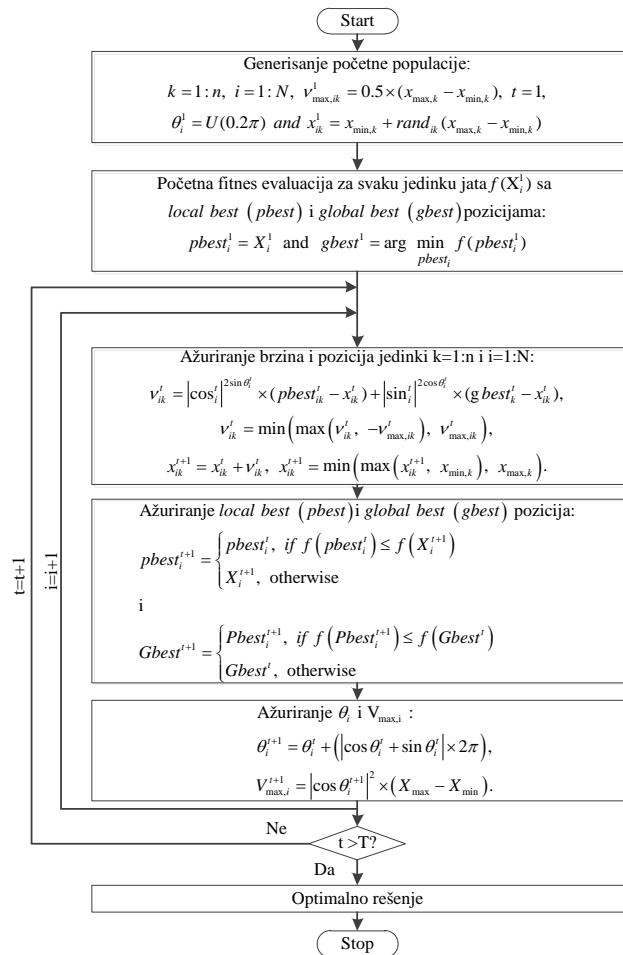
$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + \vec{V}_i(t) \quad (17)$$

Posle ažuriranja brzine čestice i pozicije primenom (16) i (17), fazni ugao  $\theta_i$  i maksimalna brzina  $V_{i,max}$  za sledeću iteraciju izračunavaju se iz sledećih jednačina:

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + |\cos \theta_i(t) + \sin \theta_i(t)| \times (2\pi) \quad (18)$$

$$V_{i,max}(t+1) = |\cos \theta_i(t)|^2 \times (X_{max} - X_{min}) \quad (19)$$

Na Sl. 1 nacrtan je dijagram toka PPSO.



Sl. 1. Dijagram toka PPSO

#### IV. REZULTATI SIMULACIJE

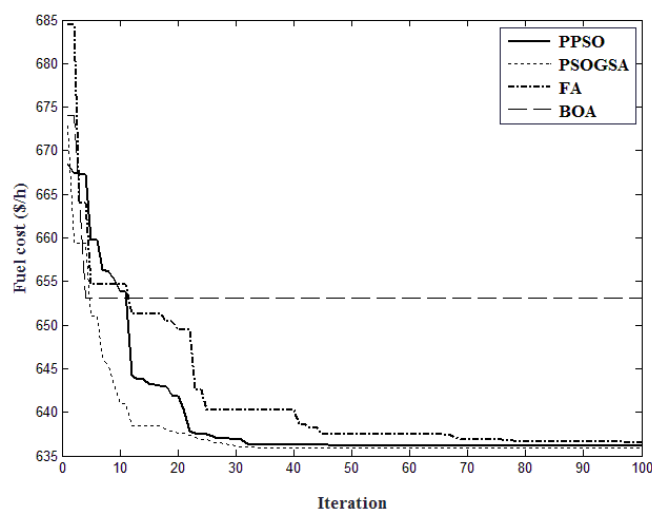
Testiranje PPSO algoritma u ovom radu se vrši na standardnom IEEE test sistemu sa 30 čvorova, 6 generatora i ukupnom potrošnjom od 283.4 MW. Uzimaju se u obzir efekat ventila u termoelektranama i gubici snage u sistemu.  $B$ -loss matrica i koeficijenti troškova i emisije usvojeni su iz [8]. Implementacija PPSO se sprovodi na platformi od 1.6 GHz sa 3 GB RAM primenom MATLAB R2017a. Kao rezultati uzimaju se najbolje vrednosti dobijene posle 30 puštanja algoritma. Veličina dozvoljene greške u (9) je  $\delta = 10^{-6}$  MW, dok je faktor skaliranja  $\gamma_{NOx}$  jednak 1,000 (\$/t). Minimizaciona se vrši sa tri vrednosti težinskog faktora:  $w = 1$  (minimizacija samo troškova goriva),  $w = 0$  (minimizacija samo  $NO_x$  emisije) i  $w = 0.5$  (istovremena minimizaciona troškova goriva i emisije  $NO_x$  gasova). Rezultati dobijeni primenom PPSO upoređuju se sa rezultatima dobijenim pomoću tri sledeća algoritma: (i) hibridnog algoritma koji se sastoji od PSO i gravitacionog pretraživačkog algoritma (eng. PSO - Gravitational Search Algorithm (PSOGSA)) [10], koji je pokazao najbolje rezultate pri rešavanju CEED problema bez uzimanja u obzir efekta ventila [1], [11]; (ii) algoritma optimizacije leptira (eng. Butterfly Optimization Algorithm (BOA)) [12], kao jednog od najnovijih meta-heurističkih

algoritama; i (iii) algoritma svica (eng. Firefly Algorithm (FA)) [13], kao jednog od najpoznatijih algoritama.

Konstante testiranih algoritama, koji se primenjuju u simulaciji, date su u Tabeli 1. U Tabeli 2 date su minimalne i maksimalne vrednosti rezultata i njihove standardne devijacije za primenjene algoritme. Iz Tabele 2 sledi da je minimalna vrednost troškova goriva, dobijena primenom PPSO najmanja u odnosu na minimalne vrednosti dobijene pomoću drugih testiranih algoritama. Minimalne vrednosti emisije  $\text{NO}_x$  gasova su iste u slučaju primene PPSO, PSO GSA i FA. Te vrednosti su bolje (manje) nego u slučaju primene BOA. Standardne devijacije rezultata dobijenih pomoću PPSO su manje nego standardne devijacije rezultata dobijenih pomoću PSO GSA, FA i BOA. U Tabeli 3 date su najbolje vrednosti izlaznih snaga generatora, troškova goriva i emisije gasova, dobijene primenom PPSO za  $w = 1$ ,  $w = 0$  i  $w = 0.5$ .

Na Sl. 3 date su krive konvergencije algoritama PPSO, PSO GSA, FA i BOA algorithms u slučaju minimizacije troškova goriva. Sa Sl. 3 se vidi da PPSO konvergira ka minimalnoj vrednosti za broj iteracija koji je isti kao u slučaju PSO GSA. U poređenju sa FA, PPSO konvergira ka minimalnoj vrednosti za manji broj iteracija. Broj iteracija BOA je manji u odnosu na ostale algoritme ali BOA daje lošije vrednosti minimalnih troškova goriva, emisije gasova i

standardne devijacije rezultata. Sl. 3 pokazuje da su početne brzine konvergencije velike za sve primenjene algoritme.



Sl. 3. Krive konvergencije PPSO, PSO GSA, FA i BOA u za slučaj minimizacije troškova goriva.

TABELA 1  
KOEFIJICIENTI ALGORITAMA KOJI SU TESTIRANI NA STANDARDNOM IEEE TEST SISTEMU SA 30 ČVOROVA I 6 GENERATORA

PPSO		PSOGSA						FA				BOA					
$N$	$T$	$N$	$T$	$G_0$	$\alpha$	$C_1$	$C_2$	$N$	$T$	$A$	$\beta_{min}$	$\gamma$	$N$	$T$	$c$	$a$	$p$
50	200	50	200	1	20	0.5	1.5	50	200	0.25	0.2	1	50	200	0.01	0.1	0.8

TABELA 2  
MINIMALNE I MAKSIMALNE VREDNOSTI I STANDARDNE DEVIJACIJE, DOBIJENE PRIMENOM PPSO, PSO GSA, FA I BOA NA STANDARDNOM IEEE TEST SISTEMU SA 30 ČVOROVA I 6 GENERATORA

Algoritam		PPSO	PSOGSA	FA	BOA
Minimizacija troškova goriva ( $w = 1$ )	Min	635.82129	635.82284	635.83288	640.37240
	Max	647.29186	698.99430	642.65875	663.92341
	SD*	2.376452	18.37740	2.904691	5.989508
Minimizacija emisije $\text{NO}_x$ gasova ( $w = 0$ )	Min	0.1941785	0.1941785	0.1941785	0.1942077
	Max	0.1941785	0.2195708	0.1941785	0.1966057
	SD*	5.8637e-11	6.23630	1.0606e-10	5.7676e-04
$w = 0.5$	SD*	2.9438e-2	9.68220	1.96486e-1	2.5305474

\*SD označava standardnu devijaciju

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložen algoritam PPSO za rešavanje CEED problema. Performanse ovog algoritma pri rešavanju CEED problema su procenjavane na standardnom IEEE test sistemu sa 30 čvorova i 6 generatora. Pri tome, uzimani su u obzir uticaj efekta ventila u termoelektranama i gubici snage u elektroenergetskom sistemu. Zatim su dobijeni rezultati upoređeni sa rezultatima drugih algoritama: PSO GSA koji je u radu [1] pokazao najbolje rezultate pri

rešavanju CEED problema na IEEE test sistemu sa 30 čvorova i 6 generatora ali bez uzimanja u obzir efekta ventila; BOA, koji predstavlja jedan od najnovijih meta-heurističkih algoritama; FA, koji je jedan od često primenjivanih algoritama. Poređenjem testiranih algoritama, utvrđeno je da PPSO daje najbolje rezultate: Simulacioni rezultati su pokazali da PPSO ima dobre konvergentne osobine i daje najbolje vrednosti minimalnih troškova goriva u odnosu na algoritme PSO GSA, FA i BOA. Osim toga, utvrđeno je da su standardne devijacije

rezultata najmanje u slučaju primene PPSO, da su minimalne vrednosti emisije štetnih gasova iste u slučajevima primene PPSO, PSO-GSA i FA i da su one bolje nego u slučaju primene BOA.

TABELA 3

NAJBOLJE VREDNOSTI IZLAZNIH SNAGA, TROŠKOVA GORIVA I EMISIJE GASOVA, DOBIJENE PRIMENOM PPSO

Snaga, MW	$w = 1$	$w = 0$	$w = 0.5$
$P_{s,1}$	5.00000	41.09207	5.00000
$P_{s,2}$	13.44427	46.36641	18.32689
$P_{s,3}$	83.53982	54.44192	79.88927
$P_{s,4}$	74.84721	39.03759	74.81317
$P_{s,5}$	79.79982	54.44609	78.55621
$P_{s,6}$	28.65457	51.54889	28.76874
$P_{loss}$	1.88568	3.53297	1.95428
Troškovi goriva (\$/h)	635.82129	728.66678	638.65784
NO <sub>x</sub> (ton/h)	0.226433	0.1941785	0.223048

DODATAK

TABELA 4

B-LOSS MATRICE TEST SISTEMA [8]

Matrice	Elementi matrica
$B$	$\begin{bmatrix} 0.1382 & -0.0299 & 0.0044 & -0.0022 & -0.0010 & -0.0008 \\ -0.0299 & 0.0487 & -0.0025 & 0.0004 & 0.0016 & 0.0041 \\ 0.0044 & -0.0025 & 0.0182 & -0.0070 & -0.0066 & -0.0066 \\ -0.0022 & 0.0004 & -0.0070 & 0.0137 & 0.0050 & 0.0033 \\ -0.0010 & 0.0016 & -0.0066 & 0.0050 & 0.0109 & 0.0005 \\ -0.0008 & 0.0041 & -0.0066 & 0.0033 & 0.0005 & 0.0244 \end{bmatrix}$
$B_0$	$[-0.0107 \quad 0.0060 \quad -0.0017 \quad 0.0009 \quad 0.0002 \quad 0.0030]$
$B_{00}$	$[0.00098573]$

TABELA 5

KOEFICIJENTI TROŠKOVA GORIVA I EMISIJE NO<sub>x</sub> GASOVA I OGRANIČENJA GENERATORA ZA PRIMENJENI TEST SISTEM [8]

$g$	$a_g$	$b_g$	$c_g$	$d_g$	$e_g$	$\alpha_g$	$\beta_g$	$\eta_g$	$\zeta_g$	$\lambda_g$	$P_g^{min}$	$P_g^{max}$
1	10	200	100	18	3.7	4.091e-2	-5.554e-2	6.490e-2	2.0e-4	2.857	5	150
2	10	150	120	16	3.8	2.543e-2	-6.047e-2	5.638e-2	5.0e-4	3.333	5	150
3	20	180	40	14	4.0	4.258e-2	-5.094e-2	4.586e-2	1.0e-6	8.0	5	150
4	10	100	60	12	4.5	5.326e-2	-3.550e-2	3.380e-2	2.0e-3	2.0	5	150
5	20	180	40	13	4.2	4.258e-2	-5.094e-2	4.586e-2	1.0e-6	8.0	5	150
6	10	150	100	13.5	4.1	6.131e-2	-5.555e-2	5.151e-2	1.0e-5	6.667	5	150

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski pomognut od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] J. Radosavljević, "A solution to the combined economic and emission dispatch using hybrid PSO-GSA algorithm," *Appl. Artif. Intell.* vol. 30, no. 5, pp. 445-474, Jun. 2016.
- [2] D. W. Gong, Y. Zhang, C. L. Qi, "Environmental/economic power dispatch using a hybrid multi-objective optimization algorithm," *Int. J. Elec. Power*, vol. 32, pp. 607-614, Nov. 2010.
- [3] M. Jevtić, N. Jovanović, J. Radosavljević, D. Klimenta, "Moth swarm algorithm for solving combined economic and emission dispatch problem," *Elektron. Elektrotech.* vol. 23, pp. 21-28, Jun. 2017.
- [4] M. Gholamghasemi, E. Akbari, A. Rahimnejad, S. E. Razavi, S. Ghavidel, L. Li, "Phasor particle swarm optimization: a simple and efficient variant of PSO," *Soft Comput.* vol. 23, no. 19, pp. 9701-9718, March 2019.
- [5] L. Benasla, A. Belmadani, M. Rahli, "Spiral optimization algorithm for solving combined economic and emission dispatch," *Int. J. Elec. Power*, vol. 62, pp. 163-174, Nov. 2014.
- [6] A. Bhattacharya, P. K. Chattopadhyay, "Solving economic emission load dispatch problems using hybrid differential evolution," *Appl. Soft Comput.* vol. 11, no. 2, pp. 2526-2537, March, 2011.
- [7] U. Güvenç, Y. Sönmez, S. Duman, N. Yörükeren, "Combined economic and emission dispatch solution using gravitational search algorithm," *Sci. Iran.* vol. 19, no. 6, pp. 1754-1762, Dec. 2012.
- [8] D. Aydin, S. Ozyon, C. Yasar, and T. Liao, "Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem," *Int. J. Elec. Power*, vol. 54, pp. 144-153, Jan. 2014.
- [9] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. ICNN95' International Conference on Neural Networks, IEEE, Perth, WA, Australia, pp. 1942-1948, 27 Nov. - 1 Dec. 1995.
- [10] S. Mirjalli, S. Z. M. Hashim, H. M. Sardroudi, "Training feedforward neural networks using hybrid particle swarm and gravitational search algorithm," *App. Math. Comput.* vol. 218, no. 22, pp. 11125-11137, Jul. 2012.
- [11] J. Radosavljević, *Metaheuristic optimization in power engineering*, London, United Kingdom: IET, 2018.
- [12] S. Arora, S. Singh, "A hybrid optimization algorithm based on butterfly optimization algorithm and differential evolution," *Int. J. Swarm Intelligence*, vol. 3, no. 2/3, pp. 152-169, Oct. 2017.
- [13] X. S. Yang, "Firefly algorithm, Levy flights and global optimization," in *Research and development in intelligent systems XXVI*, vol. 26, pp. 209-218, London, United Kingdom: Springer-Verlag, 2010.

ABSTRACT

Minimization of fuel costs and pollutant emissions in thermal power plants by adjusting electric power outputs from generators represents important problem in power system management. This

problem is known as Combined economic emission dispatch (CEED) problem. In this paper, a meta-heuristic algorithm called Phasor particle swarm optimization, which is an improved variant of Particle swarm optimization, is proposed to solve the CEED problem. Parameters of Phasor particle swarm optimization are automatically adjusted during iterations, so this algorithm is adaptive and non-parametric, which is its advantage. The performance of the proposed algorithm for solving CEED problem is evaluated in a standard IEEE test system with 30 nodes and 6 generators. Based on the obtained results, it was determined that this algorithm has better

characteristics than the algorithms used in other published papers to solve the CEED problem.

**Solving combined economic and emission dispatch problem using Phasor particle swarm optimization**

Milena Jevtić, Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević, Sanela Arsić i Dardan Klimenta