Određivanje optimalnih tokova snaga primenom modifikovanog gravitacionog algoritma

Jordan Radosavljević i Milan Tomović
Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Univerzitet u Prištini
Kosovska Mitrovica, Srbija
jordan.radosavljevic@pr.ac.rs, milan_tomovic@yahoo.com

Sadržaj— **U ovom radu je za rešavanje problema optimalnih tokova snaga (OTS) predložen modifikovani gravitacioni pretraživački algoritam (MGPA). Modifikacija originalnog gravitacionog pretraživačkog algoritma (GPA) se ogleda u uvođenju opozicionog rešenja u odnosu na tekuće optimalno rešenje u svakoj iteraciji proračuna. Predloženi algoritam je testiran na standardnom IEEE 30 test sistemu za dve različite objektivne funkcije: minimizacije troškova goriva generatora i simultane minimizacije troškova goriva i indikatora naponske stabilnosti. Dobijeni rezultati pokazuju da predloženi algoritam daje bolja rešenja u poređenju sa originalnim GPA i drugim metodama iz literature.**

Ključne reči-optimalni tokovi snaga; gravitacioni pretraživački algoritam; opozicija optimalnog rešenja; naponska stabilnost.

I. UVOD

Problem OTS se može definisati kao određivanje optimalnih vrednosti upravljačkih promenljivih, kao što su aktivne snage i moduli napona generatora, prenosnih odnosa regulacionih transformatora i reaktivnih snaga otočnih kompenzatora, radi ostvarivanja zadate objektivne funkcije (npr. minimizacija troškova goriva, minimizacija gubitaka snage, poboljašnje naponskih prilika, itd.), uz istovremeno zadovoljenje različitih funkcionalnih ograničenja u elektroenergetskom sistemu (EES-u). To je u osnovi nelinearan, nekonveksan, statički, optimizacioni problem velikih dimenzija, sa kontinualnim i diskretnim kontrolnim promenljivim.

Postoje dve grupe metoda za rešavanje problema OTS. U prvu grupu spadaju determinističke (klasične) metode [1], a u drugu grupu se mogu svrstati heurističke populacione optimizacione metode [2]. Klasične metode optimizacije kao što su linearno programiranje (LP), nelinearno programiranje (NLP), kvadratno programiranje (QP), Njutnova metoda (N), sekvencionalno kvadratno programiranje (SQP) i metode unutrašnje tačke (IPM) su bazirane na estimaciji globalnog optimuma. Generalno gledano, većina ovih tehnika primenjuje analizu osetljivosti i algoritme zasnovane na nalaženju gradijenta optimizacione funkcije pri tom linearizujući tu objektivnu funkciju i razmatrana ograničenja u okolini radne tačke [3]. Međutim, zbog poteškoća u diferenciranju, nelinearnosti i nekonveksnosti problema OTS, ove metode često ne mogu da obezbede globalni optimum. Osim toga, ne mogu se primeniti kada objektivna funkcija nije data u algebarskom obliku. Zato je važno razviti optimizacione metode koje su u stanju da prevaziđu ove nedostatke [4].

U poslednjih dvadeset godina, razvijene su mnoge populacione metode za rešavanje kompleksnih optimizacionih problema. Glavna karaketristika ovih metoda je sukcesivno ponavljenje velikog broja operacija. Performanse ovih metoda jako zavise od pravilnog podešavanja odgovarajućih algoritamskih parametara [5]. Nažalost, za to podešavanje često ne postoje opšta pravila već se ono vrši na osnovu iskustva, odnosno principa probaj-greši. Veliki broj ovih metoda, kao što su diferencijalna evolucija (DE), genetski algoritam (GA), modifikovani genetski algoritam (MGA), unapređeni genetski algoritam (EGA), simulirano kaljenje (SA), evoluciono programiranje (EP), tabu pretraga (TS), bio-geografska optimizacija (BBO), veštačka kolonija pčela (ABC), optimizacija rojem čestica (PSO), gravitacioni pretraživački algoritam (GPA), itd. su primenjivani u rešavanju problema OTS za različite objektivne funkcije.

Tokom poslednjih godina predloženi su i neki hibridni algoritmi za rešavanje problema OTS [5-8], [11]. Hibridni algoritmi nastaju integracijom dve optimizacione metode, čime se pokušava ostvariti sinergija njihovih najboljih karakteristika.

U ovom radu je predložen jedan modifikovani gravitacioni pretraživački algoritam (MGPA) za rešavanje problema OTS. Modifikacija originalnog GPA se sastoju u uvođenju opozicione populacije tekućeg optimalnog rešenja u svakoj iteraciji proračuna. Na taj način se poboljšava konvergencija originalnog GPA i dobijaju bolja rešenja. Predloženi MGPA je primenjen na standardnom IEEE 30 test sistemu. Problem OTS je rešavan za dve objektivne funkcije: (i) minimizacija troškova goriva generatora; (ii) istovremena minimizacija troškova goriva i poboljšanje naponske stabilnosti EES-a. Dobijeni rezultati su poređeni sa rezultatima iz literature.

II. FORMULACIJA PROBLEMA OTS

Problem OTS se može formulisati na sledeći način:

$$\min J(\mathbf{x},\mathbf{u}) \tag{1}$$

Pod ograničenjima:

$$g(\mathbf{x},\mathbf{u}) = 0 \tag{2}$$

$$h(\mathbf{x},\mathbf{u}) \le 0 \tag{3}$$

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} \tag{4}$$

gde je J objektivna funkcija koju treba minimizirati;
x je vektor zavisno promenljivih čiji su elementi aktivna snaga balansno-referentnog čvora P_{G1}, moduli napona potrošačkih čvorova V_L, reaktivne snage generatora Q_G i tokovi snaga po granama mreže S_l. Prema tome, vektor **x** se može izraziti kao:

$$\mathbf{x} = \left[P_{G1}, V_{L1}...V_{LNL}, Q_{G1}...Q_{GNG}, S_{l1}...S_{lNTL}\right] \tag{5}$$

gde su NL, NG i NTL broj potrošačkih čvorova, broj generatora i broj prenosnih vodova, respektivno.

u je vektor upravljačkih promenljivih, čiji su elementi aktivne snage generatora P_G (osim aktivne snage balansno referentnog čvora P_{G1}), moduli napona generatora V_G, položaji regulacionih otcepa transformatora T, i reaktivne snage otočnih VAR kompenzatora Q_C. Shodno tome, **u** se može izraziti kao:

$$\mathbf{u} = \left[P_{G2}...P_{GNG}, V_{G1}...V_{GNG}, T_1...T_{NT}, Q_{C1}...Q_{CNC}\right] \tag{6}$$

gde su NT i NC broj regulacionih transformatora i broj otočnih VAR kompenzatora, respektivno.

Ograničenje tipa jednakosti (2) su jednačine bilansa aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima EES-a:

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j \left(G_{ij} \cos\delta_{ij} + B_{ij} \sin\delta_{ij}\right) = 0 \tag{7}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j \left(G_{ij} \sin\delta_{ij} - B_{ij} \cos\delta_{ij}\right) = 0 \tag{8}$$

gde je $i = 1,...,NB$; NB je ukupan broj čvorova u sistemu; P_D je potrošnja aktivne snage, Q_D je potrošnja reaktivne snage, δ_{ij} je razlika uglova fazora napona čvorova i i j, G_{ij} i B_{ij} su realni i imaginarni deo elementa matrice admitansi čvorova na poziciji ij.

Ograničenja tipa nejednakosti (3) su funkcionalna ograničenja zavisno promenljivih:

$$V_{Li}^{\min} \le V_{Li} \le V_{Li}^{\max}, \quad i = 1,...,NL \tag{9}$$

$$Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max}, \quad i = 1,...,NG \tag{10}$$

$$S_{li} \le S_{li}^{\max}, \quad i = 1,...,NTL \tag{11}$$

Ograničenja iskazana jednačinom (4) definišu oblast mogućih vrednosti upravljačkih promenljivih:

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max}, \quad i = 2,...,NG \tag{12}$$

$$V_{Gi}^{\min} \le V_{Gi} \le V_{Gi}^{\max}, \quad i = 1,...,NG \tag{13}$$

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max}, \quad i = 1,...,NT \tag{14}$$

$$Q_{Ci}^{\min} \le Q_{Qi} \le Q_{Ci}^{\max}, \quad i = 1,...,NG \tag{15}$$

Važno je napomenuti da su upravljačke promenljive samoograničene strukturom optimizacione metode. Ograničenja zavisnih promenljivih se obuhvataju uvođenjem kvadratnih penalnih članova u okviru objektivne funkcije [9]. Shodno tome, nova proširena objektivna funkcija koja se minimizira postaje:

$$\begin{aligned} J_p = J &+ \lambda_P \left(P_{G1} - P_{G1}^{\lim}\right)^2 + \lambda_V \sum_{i=1}^{\mathrm{NL}} \left(V_{Li} - V_{Li}^{\lim}\right)^2 + \\ &+ \lambda_Q \sum_{i=1}^{\mathrm{NG}} \left(Q_{Gi} - Q_{Gi}^{\lim}\right)^2 + \lambda_S \sum_{i=1}^{\mathrm{NTL}} \left(S_{li} - S_{li}^{\lim}\right)^2 \end{aligned} \tag{16}$$

gde su λ_P, λ_V, λ_Q i λ_S odgovarajući penalni faktori;
x^{lim} je granična vrednost zavisno promenljive x koja se definiše kao: $x^{lim} = x^{max}$ ako je $x > x^{max}$ i $x^{lim} = x^{min}$ ako je $x < x^{min}$.

III. MGPA ALGORITAM

A. *Standardni GPA algoritam*

Gravitacioni pretraživački algoritam (GPA) je relativno nova populaciona heuristička optimizaciona metoda koju su razvili autori u [10]. Odlične karakteristike GPA su potvrđene u rešavanju različitih optimizacionih problema [10-12], [16]. Kod GPA, pretraživački agenti čine skup masa koje međusobno interaguju shodno Njutnovim zakonima gravitacije i kretanja. U ovom algoritmu agenti se posmatraju kao objekti čije se performanse kvantifikuju preko njihovih masa. Svi objekti se međusobno privače silom gravitacije, koja uzrokuje globalno kretanje objekata ka objektima sa većom masom. Pozicija mase (agenta) korespondira sa rešenjem problema. Gravitaciona i inerciona masa agenta se određuju na osnovu vrednosti fitnes funkcije. Drugim rečima, svaka masa predstavlja jedno rešenje. Algoritam se odvija pravilnim podešavanjem gravitacionih i inercionih masa. Tokom vremena, objekte manjih masa će privući objekat najveće mase koja predstavlja optimalno rešenje problema.

GPA se može posmatrati kao mali izolovani sistem masa (agenata) koji se pokoravaju Njutnovim zakonima gravitacije i kretanja. U sistemu sa N masa (agenata), pozicija agenta i je definisana na sledeći način:

$$X_i = \left[x_i^1, ..., x_i^k, ..., x_i^n\right] \quad \text{za} \quad i = 1,2,...,N \tag{17}$$

gde je n dimenzija prostora pretraživanja, tj. broj upravljačkih promenljivih, a x_i^k definiše poziciju agenta i u dimenziji k.

Nakon određivanja fitnes vrednosti tekuće populacije, izračunava se masa svakog agenta prema sledećem izrazu [10]:

$$M_i(t) = m_i(t) \Big/ \sum_{i=1}^{N} m_j(t) \tag{18}$$

gde je:

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (19)$$

pri čemu $fit_i(t)$ predstavlja fitnes vrednost agenta i u trenutku (iteraciji) t. $best(t)$ i $worst(t)$ se definišu na sledeći način (za problem minimizacije):

$$best(t) = \min_{j \in \{1,\dots,N\}} fit_j(t) \quad (20)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1,\dots,N\}} fit_j(t) \quad (21)$$

U skladu sa Njutnovom teorijom gravitacije, ukupna sila koja deluje na agenta i u dimenziji k u iteraciji t se određuje pomoću izraza

$$F_i^k(t) = \sum_{j \in Kbest, j \neq i} r_j G(t) \frac{M_j(t) M_i(t)}{R_{i,j}(t) + \varepsilon} (x_j^k(t) - x_i^k(t)) \quad (22)$$

gde je r_j slučajan broj u intervalu [0,1], $G(t)$ je gravitaciona konstanta u iteraciji t, $M_i(t)$ i $M_j(t)$ su mase agenata i i j, ε je mala konstanta i $R_{ij}(t)$ Euklidova distanca između agenata i i j:

$$R_{ij}(t) = \left\| X_i(t), X_j(t) \right\|_2 \quad (23)$$

Kbest predstavlja skup prvih K agenata sa najboljim fitnes vrednostima i najvećom masom. Ovaj skup se linearno smanjuje tokom vremena, počevši od vrednosti K_0, tako da na kraju ostaje samo jedan agent.

Shodno drugom Njutnovom zakonu kretanja, ubrzanje agenta i u iteraciji t, u dimenziji k se određuje kao:

$$a_i^k(t) = F_i^k(t) / M_i(t) \quad (24)$$

Strategija pretraživanja po ovom konceptu se može opisati kao nalaženje sledeće brzine i pozicije agenta na osnovu njegove trenutne brzine, ubrzanja i pozicije:

$$v_i^k(t+1) = r_i v_i^k(t) + a_i^k(t) \quad (25)$$

$$x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \quad (26)$$

gde je r_i slučajan broj u intervalu [0, 1]. Broj r_i se koristi da obezbedi slučajni karakter pretraživanja. x_i^k predstavlja poziciju agenta i u dimenziji k, v_i^k je brzina a a_i^k ubrzanje agenta i u dimenziji k.

Mora se istaći važnost gravitacione konstante $G(t)$ u kontroli performansi GPA. Na početku algoritma se zadaje njena početna vrednost, da bi se tokom vremena smanjivala po određenom zakonu, čime se kontroliše preciznost pretraživanja. Drugim rečima, gravitaciona konstanta je funkcija početne vrednosti G_0 i tekuće iteracije t:

$$G(t) = G_0 \exp\left(-\alpha \frac{t}{tmax}\right) \quad (27)$$

gde je α konstanta koju specificira korisnik, t je tekuća iteracija a *tmax* maksimalan broj iteracija.

Maksimalan broj iteracija *tmax*, veličina populacije N, početna vrednost gravitacione konstante G_0 i vrednost konstante α su kontrolni parametri kojima se utiče na performanse algoritma.

B. Opozicija tekućeg optimalnog rešenja

Uvođenjem opozicionog rešenja, odnosno opozicione populacije se kod heurističkih metoda povećavaju šanse za pronalaženje rešenja koje je bliže globalnom optimumu. U opštem slučaju, opoziciona vrednost neke promenljive je njena reflektovana vrednost u odnosu na centar opsega definisanosti [13]. Međutim opoziciono rešenje, tj. opoziciona populacija se može generisati i na druge načine, u zavisnosti od toga kako se definiše tačka u odnosu na koju se vrši refleksija, tako da postoje kvazi opozicija, kvazi refleksija, proširena opozicija, reflektovana proširena opozicija itd. [14]. Nedostatak primene opozicione populacije kod heurističkih metoda je povećavanje vremena proračuna, jer se ukupna populacija sa N povećava na $2N$.

U ovom radu se predlaže primena opozicije tekućeg optimalnog rešenja u okviru GPA. Pri tome je izbegnuto proširivanje ukupne populacije na $2N$. Opoziciona vrednost tekućeg optimalnog rešenja se nalazi u blizini globalnog optimuma, naročito kako se broj iteracija povećava i algoritam bliži kraju. Opozicija tekućeg optimalnog rešenja se definiše na sledeći način [14,15]:

Neka je $X(x^1,\dots,x^k,\dots,x^n)$ tačka u n dimenzionom prostoru pretrage, $X_{best}(x_{best}^1,\dots,x_{best}^k,\dots,x_{best}^n)$ najbolje rešenje u tekućoj populaciji, a x^k i $x_{best}^k \in [a^k, b^k]$, $k = 1,\dots,n$. Opozicija tekućeg optimalnog rešenja X se označava sa $\breve{X}(\breve{x}^1,\dots,\breve{x}^k,\dots,\breve{x}^n)$, i izračunava kao:

$$\breve{x}^k = 2x_{best}^k - x^k, \; k = 1,\dots,n. \quad (28)$$

Ovde je centar opozicije X_{best}. Ukoliko postoji mogućnost da opoziciona promenljiva $\breve{x}^k$ izađe van granica $[a^k, b^k]$, dodeljuje joj se nova vrednost na sledeći način:

$$\breve{x}^k = \begin{cases} a^k, \text{ ako je } \breve{x}^k < a^k \\ b^k, \text{ ako je } \breve{x}^k > b^k \end{cases} \quad (29)$$

Modifikacija originalnog gravitacionog pretraživačkog algoritma se ogleda u uvođenju opozicionog rešenja u odnosu na tekuće optimalno rešenje u svakoj iteraciji proračuna. Neka je $X_{best}(t) = (x_{best}^1(t),\dots,x_{best}^k(t),\dots,x_{best}^n(t))$ najbolje rešenje u tekućoj populaciji. Pozicija agenta i u dimenziji k, u tekućoj (t+1) iteraciji se koriguje na sledeći način:

$$x_i^k(t+1) = \begin{cases} \breve{x}_i^k(t), \text{ kada je } r_i < P_i(t) \\ x_i^k(t+1), \text{ kada je } r_i > P_i(t) \end{cases} \quad (30)$$

gde je r_i slučajan broj iz opsega [0,1], $\breve{x}_i^k(t)$ je opozicija tekućeg optimalnog rešenja $x_i^k(t)$ pri čemu je $x_{best}^k(t)$ centar opozicije. $P_i(t)$ je verovatnoća kretanja (pomeranja) agenta *i*, koja se određuje na sledeći način [14]:

$$P_i(t) = \frac{best(t) - fit_i(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (31)$$

C. Primena MGPA za rešavanje OTS

Broj upravljačkih promenljivih u modelu OTS definiše dimenziju *n* agenta *i* koji predstavlja potencijalno rešenje problema. U sistemu od *N* agenata, položaj agenta *i* je:

$$X_i = \left[x_i^1, ..., x_i^k, ..., x_i^n\right] \quad (32)$$

Pri čemu je: $i=1,2,...,N$ i $n=2NG-1+NT+NC$.

Elemenati agenta X_i su zapravo elementi vektora upravljačkih promenljivih **u**, tj. aktivne snage generatora (osim aktivne snage balansno referentnog čvora), moduli napona generatora, položaji regulacionih otcepa transformatora i reaktivne snage otočnih VAR kompenzatora.

Procedura primene MGPA za rešavanje problema OTS se može opisati kroz sledećih 12 koraka:

Korak 1. Određivanje prostora mogućih rešenja. Definisanje algoritamskih parametara: *N*, *tmax*, G_0, α.
Korak 2: Inicijalizacija: generisanje početne populacije od *N* agenata slučajnim izborom vrednosti upravljačkih promenljivih iz zadatog opsega min-max.
Korak 3: Proračun tokova snaga.
Korak 4: Izračunavanje fitnes vrednosti agenata u skladu sa izabranom objektivnom funkcijom.
Korak 5: Ažuriranje vrednosti: *G(t)* (27), *best(t)* (20), *worst(t)* (21), $M_i(t)$ (18) za $i=1,2,...,N$.
Korak 6: Izračunavanje ukupne sile u različitim pravcima (22).
Korak 7: Izračunavanje ubrzanja agenata (24).
Korak 8: Ažuriranje brzine i pozicije agenata (25) i (26)
Korak 9: Proračun opozicije tekućeg optimalnog rešenja (28)
Korak 10: Izračunavanje verovatnoće kretanja agenata (31).
Korak 11: Korekcija pozicije agenata shodno (30)
Korak 12: Ponavljanje koraka 3-11 sve dok se ne postigne maksimalni broj iteracija, *tmax*.

Opisani algoritam je realizovan u programskom paketu MATLAB R2011b. Za algoritamske parametre usvojene su sledeće vrednosti: N=50, $tmax$=200, G_0=100 i α=20.

IV. TEST PRIMER

Predloženi algoritam je testiran na standardnom IEEE 30 test sistemu. Ukupna aktivna snaga potrošnje je 2.834 r.j. za baznu snagu od 100 MVA. Podaci o parametrima vodova, transformatora, generatora i potrošača su preuzeti iz reference [9]. IEEE 30 test sistem ima 6 generatora u čvorovima 1, 2, 5, 8, 11 i 13, i 4 regulaciona transformatora između čvorova 6-9, 6-10, 4-12 i 28-27. Donja i gornja granica regulacionih otcepa transformatora su 0.9 r.j. i 1.1 r.j., respektivno. Pored toga, u čvorovima 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24, i 29 su priključeni otočni VAR kompenzatori. Donja i gornja granica VAR kompenzatora su 0.0 r.j. i 0.05 r.j., respektivno. Minimalne i maksimalne vrednosti napona generatorskih čvorova su 0.95 r.j. i 1.1 r.j., respektivno. Granice za napone potrošačkih čvorova su 0.95 r.j. i 1.05 r.j.

A. Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva generatora

Karakteristika potrošnje goriva agregata *f* se definiše kao kvadratna funkcija od izlazne aktivne snage P_G. Objektivna funkcija *J* je minimizacija troškova goriva svih agregata :

$$J = \sum_{i=1}^{NG} f_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{NG} \left(a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2\right) \quad (33)$$

gde su a_i, b_i i c_i koeficijenti troškova *i*-tog agregata. Za P_{Gi} u (MW) koeficijenti troškova su: a_i u ($/h), b_i u ($/MWh) i c_i u ($/MW^{2}h).

U tabeli I su prikazani rezultati proračuna OTS. Primenom MGPA ukupni troškovi goriva se sa 901.94942 $/h u baznom slučaju smanjuju na 800.56144 $/h, što predstavlja smanjenje troškova od 11.24 %.

B. Slučaj 2: Minimizacija troškova goriva i indikatora naponske stabilnosti

Jedan od zahteva koji se postavlja pred EES je sposobnost da sačuva prihvatljive vrednosti napona u svim čvorovima mreže, kako u normalnim radnim uslovima, tako i pri povećanju opterećenja, promeni konfiguracije sistema ili delovanju poremećaja u sistemu. Upravljačke promenljive koje nisu pravilno podešene mogu dovesti do progresivnog i nekontrolisanog pada napona, koji kasnije može da inicira pojavu naponskog kolapsa [4].

Statički pristup za analizu naponske stabilnosti podrazumeva određivanje indikatora blizine naponskog kolapsa. Jedan od indikatora naponske stabilnosti koji se često koristi je *L* indeks potrošačkih čvorova sistema [17], koji se izračunava na osnovu rezultata proračuna tokova snaga.

Za potrošački čvor *j*, definiše se L_j indeks na sledeći način [16]:

$$L_j = \left|1 - \sum_{i=1}^{NPV} F_{ji} \frac{V_i}{V_j}\right|, \quad \text{za } j = 1, 2, ..., NPQ \quad (34)$$

$$F_{ji} = -[Y_1]^{-1}[Y_2] \quad (35)$$

gde je *NPV* broj *PV* čvorova i *NPQ* broj potrošačkih čvorova. Y_1 i Y_2 su submatrice matrice admitansi čvorova EES-a u kojoj su vrste grupisane na *PQ* i *PV* čvorove:

$$\begin{bmatrix} I_{PQ} \\ I_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 Y_2 \\ Y_3 Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{PQ} \\ V_{PV} \end{bmatrix} \quad (36)$$

L_j indeks se izračunava za sve *PQ* čvorove. *L* indeks je globalni pokazatelj naponske stabilnosti čitavog EES-a i određuje se na sledeći način:

$$L = \max(L_j), \quad j = 1,2,\ldots,NPQ \qquad (37)$$

L indeks se kreće u intervalu od 0 do 1, pri čemu niža vrednost odgovara stabilnijem režimu rada sistema. Kada je vrednost L indeksa jednaka 1 tada govorimo o naponskom kolapsu.

U cilju poboljšanja naponske stabilnosti i rada sistema daleko od tačke naponskog kolapsa, proračun OTS se obavlja sa sledećom objektivnom funkcijom:

$$J = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + \eta \cdot L \qquad (38)$$

U ovom radu je izabrano da težinski faktor η iznosi 6000 kao u [16]. Rezultati proračuna OTS su prikazani u tabeli I. Primenom MGPA za troškove goriva agregata se dobija vrednost 800.75856 $/h a za vrednost L indeksa 0.12428 r.j. U odnosu na slučaj 1, L indeks je smanjen za 2.91 %, dok su troškovi goriva neznatno povećani za oko 0.025 %.

C. Poređenje rezultata

Najpre je izvršeno poređenje rezultata proračuna OTS primenom standardnog GPA i predloženog MGPA. Obavljeno je po 20 uzastopnih proračuna OTS primenom obe metode za obe varijante objektivne funkcije. U tabeli II su dati statistički pokazatelji dobijenih rezultata. U oba analizirana slučaja, predloženi MGPA daje niže minimume i maksimume optimalnih rešenja, kao i niže vrednosti standardne devijacije rezultata (vrednosti objektivne funkcije) u odnosu na standardni GPA.

Rezultati dobijeni pomoću MPGA poređeni sa rezultatima iz literature. U tabeli III je dat uporedni prikaz ovih rezultata za oba analizirana slučaja.

Iz tabele III se može videti da neke od navedenih metoda imaju niže vrednosti objektivnih funkcija u onosu na MGPA. Međutim, nakon proračuna tokova snaga sa vrednostima upravljačkih promenljivih navedenih u ovim referencama, pokazalo se da su neka od prijavljenih optimalnih rešenja nemoguća i/ili netačna. Za nemoguća rešenja se smatraju ona koja za posledicu imaju narušavanje makar jednog funkcionalnog ograničenja, kao što su ograničenja napona potrošačkih čvorova i ograničenja reaktivnih snaga generatora. U konkretnim slučajevima došlo se do sledećih zaključaka:

C1. Slučaj 1

- Za optimalno rešenje publikovano u [16], narušena su ograničenja po naponima u svim potrošačkim čvorovima, osim u čvorovima 4, 6, 7 i 28. Pored toga, prekoračene su i granične vrednosti reaktivnih snaga generatora u čvorovima 2 i 8. Tačna vrednost aktivne snage balansno referentnog čvora je 177.7828 MW umesto 175.7498 MW, a tačna vrednost troškova goriva je 805.4366 $/h umesto navedenih 798.6751 $/h.
- Kod rezultata publikovanih u [18] narušeno je ograničenje po naponu u čvoru 3, a kod [19] narušeno je ograničenje po naponu u čvorovima 3 i 9.
- Optimalno rešenje iz [20] je nemoguće jer su narušena ograničenja napona u svim potrošačkim čvorovima izuzev čvorova 7, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 29 i 30.
- Za optimalne vrednosti upravljačkih promenljivih u [21], narušene su granične vrednosti napona u svim potrošačkim čvorovima.

TABELA I. REŠENJE OTS U IEEE 30 SISTEMU PRIMENOM MGPA

	Bazi slučaj	Slučaj 1	Slučaj 2
P_{G1} (MW)	99.22227	177.28684	178.93810
P_{G2} (MW)	80	48.78884	49.29090
P_{G5} (MW)	50	21.41216	21.16699
P_{G8} (MW)	20	21.03207	18.81017
P_{G11} (MW)	20	11.93773	11.61708
P_{G13} (MW)	20	12.00000	12.81647
V_{G1} (r.j.)	1.05	1.08189	1.08305
V_{G2} (r.j.)	1.04	1.06295	1.06580
V_{G5} (r.j.)	1.01	1.03287	1.03929
V_{G8} (r.j.)	1.01	1.03734	1.03870
V_{G11} (r.j.)	1.05	1.07416	1.09996
V_{G13} (r.j.)	1.05	1.05494	1.02962
$T_{11(6\text{-}9)}$ (r.j.)	1.078	1.01421	1.05264
$T_{12(6\text{-}10)}$ (r.j.)	1.069	0.95896	0.95318
$T_{15(4\text{-}12)}$ (r.j.)	1.032	0.98197	0.95426
$T_{36(28\text{-}27)}$ (r.j.)	1.068	0.97927	0.98173
Q_{C10} (MVAr)	0	3.83552	4.99760
Q_{C12} (MVAr)	0	2.05827	4.99997
Q_{C15} (MVAr)	0	3.85339	4.99400
Q_{C17} (MVAr)	0	5.00000	4.99990
Q_{C20} (MVAr)	0	3.14790	4.99999
Q_{C21} (MVAr)	0	4.99662	4.99941
Q_{C23} (MVAr)	0	3.91127	4.99861
Q_{C24} (MVAr)	0	5.00000	4.99995
Q_{C29} (MVAr)	0	2.95327	4.99999
Troškovi ($/h)	901.94942	**800.56144**	**800.75856**
L indeks (r.j.)	0.17233	0.12800	**0.12428**
Gubici sn. (MW)	5.82225	9.05755	9.23979

TABELA II. MIN, MAX I STANDARDNA DEVIJACIJA REZULTATA U 20 UZASTOPNIH PONAVLJANJA GPA I MGPA

	GPA			MGPA		
	Min	Max	Std.	Min	Max	Std.
Slučaj 1	800.586	801.173	0.1384	800.561	800.703	0.0407
Slučaj 2	1564.9	1648.7	19.693	1564.4	1587.2	6.6190

C2. Slučaj 2

- Optimalno rešenje publikovano u [16] se može kvalifikovati kao nemoguće jer su narušena ograničenja reaktivnih snaga generatora u čvorovima 8, 11 i 13, kao i ograničenja napona u svim potrošačkim čvorovima.
- Za optimalne vrednosti upravljačkih promenljivih koje su date u [18] prekoračene su donje granice reaktivnih snaga generatora u čvorovima 11 i 13.
- Za optimalno rešenje iz [20] narušene su granične vrednosti reaktivnih snaga generatora u čvorovima 1, 8, 11 i 13, kao i ograničenja napona svi potrošačkih čvorova izuzev čvora 30. Kod optimalnog rešenja prijavljenog u

[21] narušena su ograničenja napona potrošačkih čvorova 27 i 29.

TABELA III. POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA

Slučaj	Metoda	Troškovi ($/h)	*L* indeks	Pgub. (MW)
Slučaj 1	GSA [16]	798.6751	0.130759	8.386
	ABC [17]	800.66	0.1381	9.0328
	PSO [18]	800.41	0.1296	-
	AGA [19]	799.8441	-	8.9166
	EGA [20]	799.56	0.111	8.697
	BBO [21]	799.1116	-	8.63
	EGA [22]	802.06	-	-
	GPM [23]	804.853	-	10.486
	MGPA	**800.56144**	0.12800	9.05755
Slučaj 2	GSA [16]	806.6013	0.116247	9.91618
	ABC [17]	801.6650	0.1379	9.2954
	PSO [18]	801.16	0.1246	-
	EGA [20]	802.06	0.1056	-
	BBO [21]	805.7252	0.1104	10.21
	MGPA	**800.75856**	**0.12428**	9.23979

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je primenjen MGPA za rešavanje problema OTS. U odnosu na klasičan GPA uvedena je opoziciona populacija tekućeg optimalnog rešenja čime se povećavaju šanse za pronalaženje globalnog optimuma. Minimizacija troškova goriva generatora i istovremena minimizacija troškova goriva i indikatora naponske stabilnosti su objektivne funkcije koje su korišćene pri proračunu OTS. Dobijeni rezultati pokazuju efikasnost predloženog pristupa u rešavanju problema OTS. Pokazano je da MGPA ima bolje performanse u odnosu na klasičan GPA i druge metode iz literature.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarsta prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta TR 33046.

LITERATURA

[1] S. Frank, I. Stepanovice, S. Rebenack, "Optimal power flow: a bibliographic survey I Formulations and determenistic methods", Energy Syst., Vol. 3, Issuse 3, pp. 221-258, 2012.

[2] S. Frank, I. Stepanovice, S. Rebenack, "Optimal power flow: a bibliographic survey II Nondeterministic and hybrid methods", Energy Syst., Vol. 3, Issuse 3, pp. 259-289, 2012.

[3] D. Šošić, J. Stojković, "Određivanje optimalne raspodele tokova snaga pomoću modifikovanog genetskog algoritma", Infoteh-Jahorina, Vol. 13, pp. 57-63, mart 2014.

[4] A. A. Abou El Ela, M. A. Abido, S. R. Spea, "Optimal power flow using differential evolution algorithm", Electrical Engineering, Vol. 91, pp. 69-78, 2009.

[5] M. Ghasemi, S. Ghavidel, S. Rahmani, A. Roosta, H. Falah, "A novel hybrid algorithm of imperialist competetive algorithm and teaching learning algorithm for optimal power flow problem with non-smooth cost function", Eng. Appl. Artif. Intellig, Vol. 29, pp. 54-69, 2014.

[6] M. R. Narimani, R. A. Abarghooee, B. Z. M. Shahrekohne, K. Gholami, "A novel approach to multi-objective optimal power flow by a new hybrid optimization algorithm considering generator constraints and multi-fuel type", Energy, Vol. 49, pp. 119-136, 2013.

[7] T. Niknam, M. R. Narimani, R. A. Abarghooee, "A new hybrid algorithm for optimal power flow considering prohibited zones and valve point effect", Energy Conv. Manage, Vol. 58, pp. 197-206, 2012.

[8] A. A. Christy, P. A. D. Raj Vimal, "Adaptive biogeography based predator-prey optimization technique for optimal power flow", Electr. Power Energy Syst., Vol. 62, pp. 344-352, 2014.

[9] O. Alsac, B. Stott, "Optimal load flow with steady-state security", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 93, No. 3 pp. 745-751, 1974.

[10] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, "GSA: A gravitational search algorithm", Infor. Sci., Vol. 179, pp. 2232-2248, 2009.

[11] J. Radosavljević, N. Arsić, M. Jevtić, "Optimal power flow using hybrid PSOGSA algorithm", 55th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON2014), October 14-17, 2014, Riga, Latvia, pp. 136-140.

[12] J. Radosavljević, M. Jevtić, N. Arsić, D. Klimenta, "Optimal power flow for distribution networks using gravitational search algorithm", Electrical Engineering, Vol. 96, Iss. 4, pp. 335-345, 2014.

[13] H. R. Tizhoosh, "Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence", Inter. Conf. on Comput. Intellig. for Model. Contr. and Automat. 1 , Vol. 1, pp. 695-701, 2005.

[14] Z. Seif, M. B. Amadi, "An opposition-based algorithm for function optimization", Engineer. Appl. of Artif. Intell., Vol. 37, pp. 293-306, 2015.

[15] Q. Xu, L. Wang, B. He, N. Wang, "Modified opposition-based differential evolution for function optimization", Jour. Comput. Inform. Syst. , Vol. 7, pp. 1582-1591, 2011.

[16] S. Duman, U. Guvenc, Y. Sonmez, N. Yorukeren, "Optimal power flow using gravitational search algorithm", Energy Con. Manag., Vol. 59, pp. 86-95, 2012.

[17] A. M. Rezaei, A. Karami, "Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem", Elect. Power Energy Syst., Vol. 53, pp. 219-230, 2013.

[18] M. A. Adibo, "Optimal power flow using particle swarm optimization", Elect. Power Energy Syst., Vol. 24, pp. 563-571, 2002.

[19] A. Abdel-Fattah, Y. A. Al-Turki, A. M. Abosorrah, "Optimal power flow using adapted genetic algorithm with adjusting population size", Elect. Power Compon. Syst.., Vol. 40, pp. 1285-1299, 2012.

[20] K. M. Sailaja, S. Maheswarapu, "Enhaced genetic algorithm based computation technique for multi-objective optimal power flow", Elect. Power Energy Syst.,Vol. 32, pp. 736-742, 2010.

[21] A. Bhattacharya, P. K. Chattopadhyay, "Application of biogeography-based optimization to solve different optimal power flow problems", IET Generation, Transm. & Distrib., Vol. 5, pp. 70-80, 2011.

[22] A. T. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas, V. Pertridis, "Optimal power flow by enhanced genetic algorithm", Energy IEEE Trans. Power Syst.., Vol. 17, No. 2, pp. 229-236, 2002.

[23] K. Y. Lee, Y. M. Park, J. L. Ortiz, "A united approach to optimal real and reactive power dispatch", IEEE Trans. Power App. Syst.,Vol. 104, No.5 pp. 1147-1153, 1985.

ABSTRACT

This paper presents a modified gravitational search algorithm (MGSA) for solving the optimal power flow problem (OPF). Modification the original gravitational search algorithm (GSA) is reflected in introducing the current optimum opposition. Proposed algorithm has been tested on the standard IEEE 30 bus test system with different objectives that reflect fuel cost minimization of generator units and simultaneous minimization of the fuel cost and voltage stability indicator. Simulation results show that the MGSA algorithm provides better solution compared to the original GSA and other methods from literature.

OPTIMAL POWER FLOW USING MODIFIED GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM

Jordan Radosavljević and Milan Tomović