INFOTEH-JAHORINA Vol. 12, March 2013.

Određivanje optimalnih tokova snaga u distributivnim mrežama primenom gravitacionog pretraživačkog algoritma

Jordan Radosavljević, Miroljub Jevtić i Dardan Klimenta
Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici
Kosovska Mitrovica
Srbija
jordan.radosavljevic@pr.ac.rs

Sadržaj— **Optimalni tokovi snaga (OTS) u distributivnim mrežama se ostvaruju svrsishodnom koordinacijom rada distribuiranih generatora (DG), regulacionih transformatora i kompenzatora reaktivnih snaga. Standardna matematička formulacija OTS kao nelinearnog optimizacionog zadatka sa ograničenjima tipa jednakosti i nejednakosti je u ovom radu prilagođena specifičnostima distributivnih mreža, i obuhvata DG sa neobnovljivim i obnovljivim izvorima energije. Za rešavanje ovog nelinearnog optimizacionog zadatka je predložen gravitacioni pretraživački algoritam (GPA). Predloženi postupak je uspešno testiran na reprezentativnoj test mreži, rešavanjem problema OTS za tri različite objektivne funkcije: minimizacije troškova goriva DG, minimizacije gubitaka snage u distributivnoj mreži i simultane minimizacije troškova goriva i gubitaka snage. Verifikacija i poređenje performansi predloženog GPA je izvršeno u odnosu na genetički algoritam. Pokazano je da GPA daje kvalitetnija rešenja za kraće vreme.**

Ključne reči - optimalni tokovi snaga, distributivna mreža, distribuirani generatori, gravitacioni pretraživački algoritam

I. UVOD

U savremenim distributivnim mrežama postoji tendencija za većim učešćem DG u napajanju pripadajućeg konzuma. Sa dobro planiranim lokacijama i snagama DG, mogu se ostvariti značajna poboljšanja naponskog profila, smanjenja gubitaka snage i ekonomske ušteda u lokalnoj distributivnoj mreži, kao i smanjenje zavisnosti od napojne distributivne mreže [1]. Na nivou eksploatacije distributivne mreže, ovi benefiti se mogu dodatno povećati efikasnom koordinacijom rada DG, regulacionih transformatora i uređaja za kompenzaciju reaktivnih snaga. To se u suštini svodi na rešavanje problema optimalnih tokova snaga (OTS) u distributivnim mrežama.

Problem OTS u distributivnim mrežama se može definisati kao određivanje optimalnih vrednosti upravljačkih promenljivih radi ostvarivanja zadate objektivne funkcije, uz istovremeno zadovoljenje različitih tehničkih ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti.

U referenci [2] je dat jedan pristup za rešavanje ovog problema, koji je podeljen na dva segmenta. U prvom segmentu se rešava problem ekonomskog dispečinga, tj, određuje optimalna raspodela snaga između DG i napojne mreže. Sa tako određenim optimalnim snagama, u drugom segmentu se određuju optimalne vrednosti reaktivnih snaga kondenzatora i DG u cilju minimizacije gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži. Problemom ekonomskog dispečinga u mikromreži koja sadrži više tipova DG su se bavili autori u radu [3]. Pri tome su uvažili ograničenja bilansa snaga i sigurnosti napajanja potrošača. Drugi tipovi objektivne funkcije i tehničkih ograničenja nisu uzimani u obzir.

Problem OTS je prvobitno definisan i rešavan za prenosne elektroenergetske mreže. Tek poslednjih godina, sa porastom distribuirane proizvodnje i nastankom tzv. aktivnih distributivnih mreža, ovaj problem postaje aktuelan i za distributivne mreže. U opštem slučaju, problem OTS se definiše kao nelinearan, nekonveksni, statički, optimizacioni problem velikih dimenzija, sa kontinualnim i diskretnim promenljivim i ograničenjima tipa jednakosti i nejednakosti. Za rešavanje problema OTS u prenosnim mrežama veoma efikasnim su se pokazale heurističke metode, kao što je genetički algoritam [4], [5], diferencijalni evolutivni algoritam [6], i gravitacioni pretraživački algoritam [7], [8].

U ovom radu se predlaže primena GPA za rešavanje problema OTS u distributivnim mrežama. Primena predloženog postupka omogućava određivanje optimalnih rešenja za različite tipove objektivnih funkcija, uz istovremeno uvažavanje svih tehničkih ograničenja koja karakterišu distributivnu mrežu. Postupak je primenjen na reprezentantivnoj test mreži, rešavanjem OTS za tri različite objektivne funkcije: (Slučaj 1) minimizacija troškova goriva DG, (Slučaj 2) minimizacija gubitaka snage u distributivnoj mreži i (Slučaj 3) simultana minimizacija troškova goriva DG i gubitaka snage u distributivnoj mreži.

II. FORMULACIJA PROBLEMA OTS U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Smisao OTS je minimizacija izabrane objektivne funkcije kroz optimalno podešavanje upravljačkih promenljivih, uz uvažavanje različitih ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti. Opšta matematička formulacija problema OTS se iskazuje sledećim relacijama [4]-[9]:

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

Pod ograničenjima:

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

$$u \in U \tag{3}$$

$$h(x,u) \le 0 \tag{4}$$

gde je F objektivna funkcija koju treba minimizirati, x i u su vektori zavisnih i upravljačkih promenljivih, respektivno.

Za distributivne mreže sa DG, elementi vektora zavisno promenljivih (x) su: aktivna snaga iz napojne mreže P_{gr}, moduli napona potrošačkih čvorova uključujući DG koji se modeluju kao PQ čvorovi V_L, reaktivne snage DG koji se modeluju kao PV čvorovi Q_{DG} i snage po granama mreže S_l. Shodno tome, vektor x ima sledeći oblik:

$$x = \left[P_{gr},\ V_{L1}...V_{LNL}, Q_{DG1}...Q_{DGNPV}, S_{l1}...S_{lN}\right]^T \tag{5}$$

gde je: NL, NPV i N broj potrošačkih čvorova, broj PV čvorova i ukupan broj čvorova (grana) u distributivnoj mreži, respektivno.

Vektor upravljačkih promenljivih (u) čine: aktivne snage DG sa neobnovljivom energijom P_{DG}, modul napona korenog čvora V_0, moduli napona PV čvorova V_{PV}, položaji regulacionih otcepa regulacionih transformatora (regulatora napona) t i reaktivne snage otočnih VAR kompenzatora Q_C. Prema tome, vektor upravljačkih promenljivih sa može izraziti na sledeći način:

$$u = \left[P_{DG1} \ldots P_{DGNNR}, V_0, V_{PV1} \ldots V_{PVNPV}, t_1 \ldots t_{NT}, Q_{C1} \ldots Q_{CNC}\right]^T \tag{6}$$

gde je: NNR, NPV, NT i NC broj DG sa neobnovljivom energijom, broj PV čvorova, broj regulacionih transformatora i broj otočnih VAR kompenzatora, respektivno.

A. *Objektivna funkcija*

Problem OTS se može definisati za različite oblike objektivne funkcije. U ovom radu su razmatrana tri slučaja.

Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva

$$F_1 = f_{gr}(P_{gr}) + \sum_{i=1}^{NNR} f_i(P_{DGi}) \tag{7}$$

gde su $f_{gr}(P_{gr})$ i $f_i(P_{DGi})$ funkcije troškova goriva od aktivne snage, za napojnu mrežu i distribuirane generatore, respektivno. U ovom radu je usvojena kvadratna zavisnost:

$$f_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \tag{8}$$

pri čemu su a_i, b_i i c_i koeficijenti kvadratne funkcije troškova.

Slučaj 2: Minimizacija gubitaka snage

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N} Ploss_i \tag{9}$$

gde su $Ploss_i$ gubici snage u grani i mreže, i=1,…,N. Gubici snage se određuju proračunom tokova snaga u distributivnoj mreži.

Slučaj 3: Simultana minimizacija troškova goriva i gubitaka snage:

$$F_3 = F_1 + w_{Ploss} \cdot F_2 \tag{10}$$

gde je w_{Ploss} težinski faktor za funkciju gubitaka snage.

B. *Ograničenja*

Ograničenje tipa jednakosti (2) čine jednačina bilansa snaga i jednačine za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama. Bilans snaga u distributivnoj mreži u kojoj su priključeni DG sa obnovljivom i neobnovljivom energijom se može izraziti jednačinom:

$$\sum_{i=1}^{NNR} P_{DGi} + P_{gr} = \sum_{i=1}^{NL} P_{Li} + \sum_{i=1}^{N} Loss_i - \sum_{i=1}^{NR} P_{DGi} \tag{11}$$

gde je NR broj DG sa obnovljivom energijom.

Za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama se već standardno koristi metoda nazad/napred, čije su jednačine date u [10,11].

Ograničenja iskazana jednačinom (3) definišu oblast mogućih vrednosti upravljačkih promenljivih, kao što su: aktivne snage DG, modul napona korenog čvora mreže, moduli napona PV čvorova, položaji regulacionih otcepa transformatora i reaktivne snaga otočnih VAR kompenzatora:

$$P_{DGi}^{\min} \le P_{DGi} \le P_{DGi}^{\max} \qquad i = 1,\ldots,NNR \tag{12}$$

$$V_0^{\min} \le V_0 \le V_0^{\max} \tag{13}$$

$$V_{DGi}^{\min} \le V_{DGi} \le V_{DGi}^{\max} \qquad i = 1,\ldots,NPV \tag{14}$$

$$t_i^{\min} \le t_i \le t_i^{\max} \qquad i = 1,\ldots,NT \tag{15}$$

$$Q_{Ci}^{\min} \le Q_{Ci} \le Q_{Ci}^{\max} \qquad i = 1,\ldots,NC \tag{16}$$

Ograničenja tipa nejednakosti (4) su funkcionalna ograničenja zavisno promenljivih stanja, koja obuhvataju: ograničenja modula napona potrošačkih čvorova, ograničenja reaktivnih snaga DG i ograničenja po maksimalnoj snazi grana distributivne mreže:

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} \qquad i = 1,\ldots,NL \tag{17}$$

$$Q_{DGi}^{\min} \le Q_{DGi} \le Q_{DGi}^{\max} \qquad i = 1,\ldots,NPV \tag{18}$$

$$S_i \le S_i^{\max} \qquad i = 1,\ldots,N \tag{19}$$

Da bi se u postupku određivanja optimalnog rešenja obezbedilo zadovoljenje ograničenja zavisno promenljivih, objektivna funkcija se proširuje uvođenjem kvadratnih penalnih članova, kojima se uvažavaju ta ograničenja [9]. Shodno tome, proširena objektivna funkcija koja se minimizira postaje:

$$F_p = F + \lambda_V \sum_{i=1}^{NL} \left(V_i - V_i^{\lim}\right)^2 + \lambda_{QDG} \sum_{i=1}^{NPV} \left(Q_{DGi} - Q_{DGi}^{\lim}\right)^2 + \lambda_S \sum_{i=1}^{N} \left(S_i - S_i^{\lim}\right)^2 \quad (20)$$

gde su: λ_V, λ_{QDG} i λ_S odgovarajući penalni faktori. $x^{\lim}$ je granična vrednost zavisno promenljive x, koja se definiše na sledeći način:

$$x^{\lim} = x^{\max} \text{ if } x > x^{\max}, \text{ i } \quad x^{\lim} = x^{\min} \text{ if } x < x^{\min} \quad (21)$$

III. GRAVITACIONI PRETRAŽIVAČKI ALGORITAM

Gravitacioni pretraživački algoritam (GPA) je jedan nov heuristički pretraživački algoritam koji su razvili autori u radu [12]. Ovaj algoritam ima veliki potencijal da ostvari proboj u optimizacionim metodama [7]. Odlične performanse GPA su potvrđene primenom u rešavanju različitih optimizacionih problema u [7] i [13]-[17].

Kod GPA, pretraživački agenti predstavljaju skup masa koje međusobno deluju jedne na druge, 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 privlače silom gravitacije, koja uzrokuje globalno kretanje objekata ka objektima sa većom masom [12]. Pozicija mase (agenta) korenspodira sa rešenjem problema. Gravitaciona i inerciona masa agenta se određuju na osnovu vrednosti fitnes funcije. Drugim rečima, svaka masa predstavlja jedno rešenje. Algoritam se odvija pravilnim podešavanjem gravitacionih i inercionih masa.

GPA se može posmatrati kao jedan izolovan sistem masa. To je kao mali veštački svet masa koje se pokoravaju Njutnovim zakonima gravitacije i kretanja.

Da bi se objasnio GPA, polazi se od sistema koji se sastoji od N agenata (masa). Pozicija agenta i u okviru tog sistema je definisana na sledeći način:

$$X_i = \left(x_i^1, \ldots, x_i^d, \ldots, x_i^n\right) \quad \text{za} \quad i = 1,2,\ldots,N \quad (22)$$

gde je sa x_i^d definisana pozicija agenta i u dimenziji d. Sa n je označena dimenzija prostora pretraživanja.

Nakon evaluacije fitnes vrednosti tekuće populacije, izračunava se masa svakog agenta prema sledećem izrazu [12], [17]:

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} m_j(t)} \quad (23)$$

gde je:

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (24)$$

gde $fit_i(t)$ predstavlja fitnes vrednost agenta i u trenutku t. $best(t)$ i $worst(t)$ su najbolja i najgora fitnes vrednost svih agenata, koje se definišu na sledeći način (za problem minimizacije):

$$best(t) = \min_{j \in \{1,\ldots,N\}} fit_j(t) \quad (25)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1,\ldots,N\}} fit_j(t) \quad (26)$$

U skladu sa Njutnovom teorijom gravitacije, ukupna sila koja deluje na agenta i u dimenziji d u trenutku t se određuje na sledeći način:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in Kbest, j \neq i} rand_j G(t) \frac{M_j(t) \times M_i(t)}{R_{i,j}(t) + \varepsilon} \left(x_j^d(t) - x_i^d(t)\right) \quad (27)$$

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

$$R_{ij}(t) = \left\| X_i(t), X_j(t) \right\|_2 \quad (28)$$

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 trenutku t, u dimenziji d se određuje prema sledećoj jednačini:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \quad (29)$$

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

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (30)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (31)$$

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

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 vremena t:

$$G(t) = G_0 e^{-\alpha \frac{t}{T}} \quad (32)$$

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

Kontrolni parameteri koje definiše korisnik i kojima se utiče na performanse GPA su: maksimalan broj iteracija (generacija) T, veličina populacije (broj agenata) N, početna vrednost gravitacione konstante G_0 i vrednost konstante α.

A. Primena GPA na rešavanje OTS

U tabeli I je kroz 9 koraka opisana procedura primene GPA za rešavanje problema OTS u distributivnim mrežama.

TABELA I. POCEDURA GPA ZA REŠAVANJE OTS

Korak 1	Određivanje prostora mogućih rešenja.
Korak 2	Inicijalizacija: generisanje slučajne populacije između minimalnih i maksimalnih vrednosti upravljačkih promenljivih za problem OTS.
Korak 3	Evaluacija fitnes vrednosti agenata shodno objektivnoj funkciji OTS.
Korak 4	Ažuriranje vrednosti $G(t)$ (j-na 32), $best(t)$ i $worst(t)$ (j-ne 25 i 26) i $M_i(t)$ (j-na 23) za i=1,2,...,N.
Korak 5	Izračunavanje ukupne sile u različitim pravcima (j-na 27).
Korak 6	Izračunavanje ubrzanja (j-na 29).
Korak 7	Ažuriranje brzine i pozicije agenata (j-ne 30 i 31).
Korak 8	Ponavljati Korake 3-7 sve dok se ne postigne kriterijum za završetak postupka (maksimalan broj iteracija T).
Korak 9	Stop.

Opisana procedura je realizovana u MATLAB 2008b programskom okruženju i testirana na 2.20 Ghz PC, sa 3.0 GB RAM. Kontrolni parametri GPA su prikazani u tabeli II.

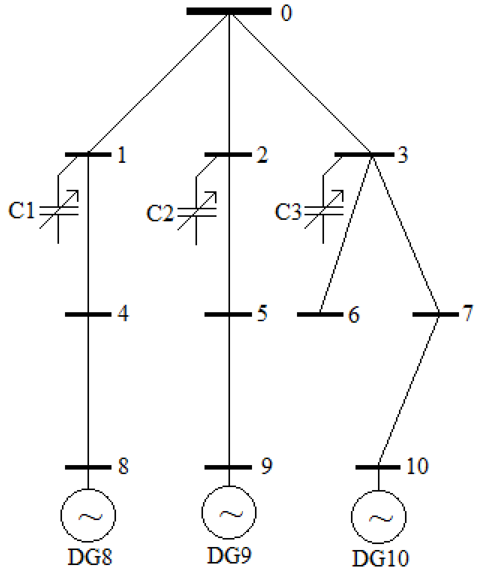
TABELA II. KONTROLNI PARAMETRI GPA

Veličina populacije N	50
Maksimalan broj iteracija T	100
Početna vrednost gravitacione konstante G_0	100
Konstanta α	20

IV. TESTIRANJE

Predloženi postupak je primenjen na realnoj SN distributivnoj mreži sa tri fidera [18], koja je modifikovana uključivanjem tri DG i tri otočna VAR kompenzatora, kao na slici 1. Podaci o parametrima vodova i nominalnim snagama potrošača su date u tabeli III. Distribuirani generator u čvoru 8 sastoji se od nekoliko jedinica gorivnih ćelija, a distribuirani generatori u čvorovima 9 i 10 od jedinica mikroturbina, čije su karakteristike preuzete iz reference [2]. Usvojeno je da DG8 i DG10 rade kao PQ čvorovi sa faktorom snage 0.9 (proizvode reaktvnu snagu), dok DG9 ima mogućnost nezavisne kontrole aktivne snage i modula napona, te se stoga modeluje kao PV čvor. Podaci o DG, uključujući i koeficijente funkcije troškova goriva, su dati u tabeli IV. Granične vrednosti upravljačkih promenljivih su navedene u tabeli V. Maksimalne i minimalne vrednosti napona potrošačkih čvorova, uključujući DG koji se modeluju kao PQ čvorovi, su 1.05 r.j. u 0.95 r.j, respektivno.

Predloženi GPA pristup je primenjen za rešavanje problema OTS u datoj distributivnoj mreži za tri različite objektivne funkcije. U tabeli VI su prikazani rezultati, koji obuhvataju optimalne vrednosti upravljačkih promenljivih i odgovarajuće vrednosti objektivnih funkcija. Pored navedena tri slučaja optimizacije, definisan je jedan bazni slučaj kod koga su sve upravljačke promenljive postavljene na nominalne vrednosti.



Slika 1. Jednopolna šema SN distributivne mreže.

TABELA III. PARAMETRI VODOVA I SNAGE POTROŠAČA

Otprem. čvor	Prijem. čvor	Parametri vodova			Snage u prijem. čvoru	
		R (Ω)	X (Ω)	B (S)	P_L (kW)	Q_L (kW)
0	1	0.20900	0.11700	0.000116	1262.4	256.2
0	2	0.20900	0.11700	0.000116	2416.6	490.5
0	3	0.20900	0.11700	0.000116	612.7	124.4
1	4	0.41800	0.23400	0.000232	435.1	88.3
2	5	0.52250	0.29250	0.000290	1148.0	233.0
3	6	0.41800	0.23400	0.000232	0	0
3	7	0.41800	0.23400	0.000232	575.4	116.8
4	8	0.83600	0.46800	0.000464	0	0
5	9	0.41800	0.23400	0.000232	1188.2	241.2
7	10	0.41800	0.23400	0.000232	0	0

TABELA IV. PODACI O DG

DG	Tip	Način rada	P_{DGnom} (kW)	Q_{DG} (kVAr)	Koeficijenti funkc. troškova		
					a *($/h)*	*b* *($/kWh)*	*c* *($/kW²h)*
DG8	MT	PQ	1000	cosφ=0.9	1	$15\cdot10^{-3}$	$14\cdot10^{-6}$
DG9	FC	PV	1800	-1350÷1350	3	$11\cdot10^{-3}$	$7.9\cdot10^{-6}$
DG10	FC	PQ	600	cosφ=0.9	3	$1.2\cdot10^{-3}$	$35\cdot10^{-6}$
Komer. mreža	SN mreža	Ref. čvor	-	-	0	$25\cdot10^{-3}$	0

TABELA V. GRANIČNE VREDNOSTI UPRAVLJAČKIH PROMENLJIVIH

Uprav. promenlj.	Min	Max
P_{DG8} (kW)	0	1000
P_{DG9} (kW)	0	1800
P_{DG10} (kW)	0	600
V_0 (p.u.)	0.97	1.03
V_{DG9} (p.u.)	0.98	1.03
Q_{C1} (kVAr)	0	500
Q_{C2} (kVAr)	0	500
Q_{C3} (kVAr)	0	500

TABELA VI. REŠENJA PROBLEMA OTS ZA RAZMATRANE SLUČAJEVE

Upravlj. promenlj. i obj. funkcije	Bazni slučaj	Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva	Slučaj 2: Minimizacija gubitaka snage	Slučaj 3: Minimizacija troškova goriva i gubitaka snage
P_{DG8} (kW)	1	342.7	381.9	346.5
P_{DG9} (kW)	1800	892.2	1800.0	1795.6
P_{DG10} (kW)	600	317.9	476.3	372.2
V_0 (p.u.)	1	1.0039	1.0016	1.0015
V_{DG9} (p.u.)	1	0.9991	1.0005	1.0009
Q_{C1} (kVAr)	500	287.8	72.1	209.9
Q_{C2} (kVAr)	500	250.0	2.8	10.0
Q_{C3} (kVAr)	500	369.0	42.5	35.7
F_1 ($/h)	201.0167	186.2800	193.3815	192.7196
F_2 (kW)	13.63	13.36	7.94	8.84

U cilju verifikacije i poređenja dobijenih rezultata, isti problem OTS je rešen primenom genetičkog algoritma (GA), koji je jedan od najpopularnijih i najviše korišćenih heurističkih optimizacionih metoda. Za to je upotrebljena MATLAB realizacija GA, čiji su parametri prilagođeni parametrima predloženog GPA, tj. za veličinu populacije usvojeno je 50, a za maksimalan broj generacija 100. Ostali parametri GA su standardni (kako je definisano u programu).

Za svaki od tri analizirana slučaja dobijeno je po 10 rešenja primenom obe metode, njihovim uzastopnim izvršavanjem (najpre 10 uzastopnih izvršavanja predloženog GPA postupka, a zatim 10 uzastopnih izvršavanja referentnog GA metoda).

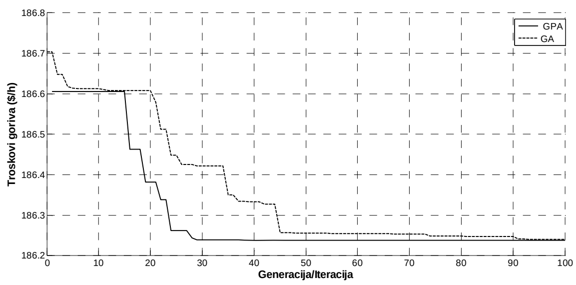
A. Diskusija rezultata

Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva. Kao što se može videti iz tabele VI, ukupni torškovi goriva se sa 201.02 $/h u baznom slučaju, primenom predloženog GPA smanjuju na 186.28 $/h. Jasno je da podešavanje upravljačkih promenljivih na optimalne vrednosti iz tabele VI, dovode do smanjenja troškova goriva od 7.33% u odnosu na bazni slučaj, uz neznatno smanjenje gubitaka snage. U tabeli VII su dati uporedni rezultati za GPA i GA pristup. Može se videti da su rezultati dobijeni primenom GPA bolji od rezultata dobijenih primenom referentnog GA metoda. Na slici 2 su prikazani profili konvergencije GPA i GA metoda pri prešavanju problema OTS za Slučaj 1. Očigledno je da GPA ima bolju konvergenciju i brže nalazi optimalno rešenje u odnosu na referentnu GA metodu.

Slučaj 2: Minimizacija gubitaka snage. Kao što se može videti iz tabele VI, minimizacija gubitaka snage kao objektivna funkcija OTS rezultuje smanjenje gubitaka od 41.75%, i smanjenje troškova goriva od 3.8% u odnosu na bazni slučaj. U odnosu na Slučaj 1, gubici snage se smanjuju za 40.56% dok se troškovi goriva povećavaju za 3.8%. Uporedni rezultati između GPA i GA za Slučaj 2 su dati u tabeli VIII. Gubici snage u slučaju primene GPA metoda su za 12.46% manji u odnosu na rešenje koje se dobija primenom referentnog GA metoda. Na slici 3 su dati profili konvergencije GPA i GA metoda za Slučaj 2, koji pokazuju da GPA ima bolju konvergenciju i brže nalazi optimalno rešenje.

TABELA VII. POREĐENJE REZULTATA GPA I GA PRISTUPA ZA SLUČAJ 1

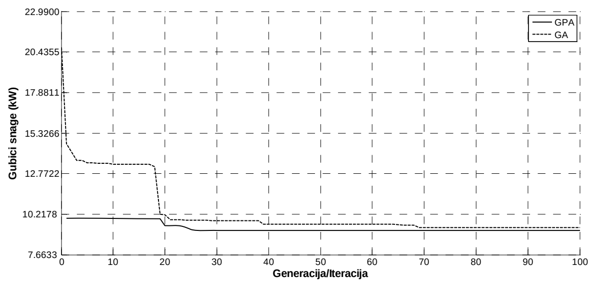
Metoda	Troškovi goriva ($/h)			Srednje vreme trajanja proračuna (s)
	Min	Sred. vr.	Max	
GPA	186.2800	186.2901	186.3489	13.5958
GA	186.2823	186.3289	186.3601	17.8755



Slika 2. Poređenje konvergencije GPA i GA metoda pri rešavanju problema OTS za Slučaj 1.

TABELA VIII. POREĐENJE REZULTATA GPA I GA PRISTUPA ZA SLUČAJ 2.

Metoda	Gubici snage (kW)			Srednje vreme trajanja proračuna (s)
	Min	Sred. vr.	Max	
GPA	7.940	8.915	9.620	11.3548
GA	9.070	10.00	12.17	17.5018



Slika 3. Poređenje konvergencije GPA i GA metoda pri rešavanju problema OTS za Slučaj 2.

Slučaj 3: Minimizacija troškova goriva i gubitaka snage. Simultana minimizacija troškova goriva i gubitaka snage predstavlja multi-objektivni problem OTS. Primenom GPA dobija se jedno kompromisno optimalno rešenje, koje omogućava smanjenje troškova goriva od 4.13% i smanjenje gubitaka snage od 34.14% u odnosu na bazni slučaj. Ovi rezultati su poređeni sa rezultatima dobijenim primenom referentnog GA metoda. Na osnovu uporednih rezultata prikazanih u tabeli IX, jasno je da predloženi GPA pristup raševanja problema OTS u distributivnim mrežama ima bolje performanse u odnosu na referentni GA metod.

TABELA IX. POREĐENJE REZULTATA GPA I GA PRISTUPA ZA SLUČAJ 3.

Metod	Troškovi goriva ($/h)	Gubici snage (kW)	Srednje vreme trajanja proračuna (s)
	Sred. vredn.	Sred. vredn.	
GPA	192.8601	10.0370	11.6222
GA	192.8844	10.1910	18.2849

V. ZAKLJUČAK

U radu je predložen gravitacioni pretraživački algoritam za rešavanje problema optimalnih tokova snaga u distributivnim mrežama. Postupak je uspešno primenjen za rešavanje problema OTS u SN distributivnoj mreži sa tri distribuirana generatora. Dobijeni rezultati pokazuju efikasnost predloženog pristupa, koji omogućava određivanje optimalnih rešanja problema OTS pri različitim objektivnim funkcijama. Pokazano je da predloženi GSA metod ima bolje performanse za rešavanje problema OTS u odnosu na referentni GA metod.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansiranju projekta TR 33046 u okviru koga je nastao ovaj rad.

LITERATURA

[1] S. Li, K. Tomsovic, T. Hiyama, "Load following functions using distributed energy resources", In: Procedings of the IEEE/PES 2000 summer meeting, July 2000, pp. 1756-1761, Seattle, Washington, USA.

[2] Y. Zhu, K. Tomsovic, "Optimal distribution power flow for systems with distributed energy resources", Electrical Power and Energy Systems, Vol 29, 2007, pp. 260-267.

[3] F. A. Mohamed, H. N. Koivo, "System modeling and online optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, 2010, pp. 398-407.

[4] L. L. Lai, J. T. Ma, R. Yokoyama, M. Zhao, "Improved genetic algorithms for optimal power flow under both normal and contigent operation states", Electrical Power & Energy Systems Vol. 19, No. 5, 1997, pp. 287-292.

[5] A. G. Bakirtzis, P. Biskas, C. E. Zoumas, V. Petridis, "Optimal power flow by enhaced genetic algorithm", IEEE Transactions on Power Systems Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 229-236.

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

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

[8] A. Bhattacharya, P. K. Roy, "Solution of multi-objective optimal power flow using gravitational search algorithm", IET Generation Transmission & Distribution, Vol. 6 No. 8, 2012, pp. 751-763.

[9] O. Alsac, B. Stott, "Optimal load flow with steady-state security", IEEE Transactions on Power Aparatus and Systems, Vol. 93, No. 3, 1974, pp. 745-751.

[10] C. S. Cheng, D. Shirmohammadi, "A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, 1995, pp. 671-679.

[11] S. Khushalani, J. M. Solanki, N. N. Schulz, "Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, 2007, pp. 1019-1025.

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

[13] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi, "Filter modeling using gravitational search algorithm", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 117-122.

[14] A. Bhattacharya, P. K. Roy, "Solution of multi-objective optimal power flow using gravitational search algorithm", IET Generation Transmission & Distribution, Vol. 6, No. 8, 2012, pp. 751-763.

[15] S. Duman, Y. Sonmez, U. Guvenc, et al., "Optimal reactive power dispatch using a gravitational search algorithm", IET Generation Transmission & Distribution, Vol. 6, No. 6, 2012, pp. 563-576.

[16] B. Shaw, V. Mukherje, S. P. Ghoshal, "A novel opposition-based gravitational search algorithm for combined economic and emission dispatch problems of power systems", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 35, 2012, pp. 21-33.

[17] M. Khajehzadeh, M. R. Taha, A. El-Shafie, Eslami M., "A modified gravitational search algorithm for slope stability analysis", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 25, 2012, pp. 1589-1597.

[18] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica, "Specijalizovani DMS algoritmi", DMS Group, Novi Sad, 2004.

ABSTRACT

This paper presents a gravitational search algorithm based approach to solve the optimal power flow problem in a distribution network with distributed generation units. The optimal power flow problem is formulated as a nonlinear optimization problem with equality and inequality constraints, where optimal control settings in case fuel cost minimization of distributed generation units, power loss minimization in the distribution network, and finaly simultaneous minimization of the fuel cost and power loss are obtained. A medium voltage distribution network with three distributed generation units is used to examination and testing the performance of the proposed approach. Simulation results obtained from the proposed gravitational search algorithm approach are compared with that obtained using a genetic algorithm approach. The results show the effectiveness and robustness of the proposed gravitational search algorithm approach.

OPTIMAL POWER FLOW FOR DISTRIBUTION NETWORKS USING GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM

Jordan Radosavljević, Miroljub Jevtić and Dardan Klimenta
Faculty of Technical Sciences,
University of Priština in Kosovska Mitrovica, Serbia