Analiza naponskih prilika i gubitaka u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima energije primjenom solvera CONOPT

STEVAN R. RAKOČEVIĆ, Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora

MARTIN P. ČALASAN, Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora

TATJANA R. KONJIĆ, Univerzitet u Tuzli,

Elektrotehnički fakultet, Tuzla, Bosna i Hercegovina

Stručni rad

UDC: 621.311.1

DOI: 10.5937/tehnika2006749R

U ovom radu je predstavljena upotreba solvera CONOPT, ugrađenog u softverskom paketu GAMS, za proračun optimalnih tokova snaga u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima energije. Testiranje mogućnosti primjene solvera CONOPT, u cilju minimizacije gubitaka u mreži, izvršeno je na IEEE radikalnoj distributivnoj mreži sa 33 čvora, pri čemu su mjesta priključivanja i snage obnovljivih izvora preuzete iz dostupne literature. Rezultati koji su dobijeni primjenom solvera CONOPT upoređeni su sa rezultatima dobijenim primjenom metaheurističkih i hibridnih algoritama. Pokazano je da solver CONOPT daje bolje rezultate u pogledu minimalnih vrijednosti gubitaka aktivne snage.

Ključne riječi: distributivna mreža, CONOPT, gubici aktivne snage, naponske prilike, obnovljivi izvori

1. UVOD

Proračun optimalnih tokova snaga predstavlja problem pronalaženja vrijednosti proizvodnje svih generatorskih jedinica, tokova snaga kroz vodove, modula i faznih stavova napona u čvorovima itd. kako bi se izvršila minimizacija određene optimizacione funkcije. Za optimizacionu funkciju mogu se odabrati gubici aktivne snage u mreži, cijena proizvodnje generatorskih jedinica, vrijednost emisije CO₂ ili neke njihove kombinacije i modifikacije. Međutim, kao i kod ostalih optimizacionih problema potrebno je, pored optimizacione funkcije, definisati i niz ograničenja u vidu jednakosti i nejednakosti, koja dodatno usložnjavaju ovaj problem, dok ga međusobna zavisnost promjenjivih svrstava u klasu visoko nelinearnih problema [1].

Važnost problema optimalnih tokova snaga raste shodno nezaustavljivom razvoju u elektroenergetskom sektoru u poslednjih nekoliko decenija. Pored velikog broja tehnologija koje se implementiraju u modernim i tržišno orijentisanim elektroenergetskim sistemima, tr-

eba izdvojiti obnovljive izvore energije. Oni predstavljaju proizvodne jedinice koje koriste energiju sunca, vjetra, vode, biomase i geotermalne toplote za proizvodnju električne energije.

Ovakvi izvori električne energije, sa akcentom na izvore koji koriste energiju sunca i vjetra [2], postaju integralna komponenta savremenih distributivnih mreža. Pažljivim odabirom mjesta priključivanja obnovljivih izvora, kao i optimizacijom njihove proizvodnje, doprinosi se smanjivanju gubitaka aktivne snage u mreži.

U literaturi se za rješavanje problema optimalne alokacije i snage obnovljivih izvora najčešće koriste brojni metaheuristički algoritmi: Particle Swarm Optimization (PSO) [3], Phasor Particle Swarm Optimization (PPSO) [4], Backtracking Search Optimization Algorithm (BSOA) [5], Augmented Lagrangian Genetic Algorithm (ALGA) [6], Ant Lion Optimization Algorithm (ALOA) [7], Particle Swarm Optimization with Constriction Factor Approach (PSOCFA) [8]. Neki autori predlažu primjenu kombinovanih, odnosno hibridnih metoda: hybrid PIPSO-SQP [9], kombinacija Genetic algorithm (GA) i Particle Swarm Optimization (PSO) [10], Binary Particle Swarm Optimization and Shuffled Frog Leap (BPSO-SLFA) [11], kombinacija Harmony Search Algorithm (HSA) i Particle Artificial Bee Colony Algorithm (PABCA) [12], Shuffle Bat Algorithm (ShBAT) [13].

Adresa autora: Stevan Rakočević, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Džordža Vasiingtona bb, Crna Gora

e-mail: martinc@ucg.ac.me

Rad primljen: 25.11.2020.

Rad prihvaćen: 07.12.2020.

Ovaj rad se bavi ispitivanjem mogućnosti primjene solvera CONOPT, koji je integrisan u softverskom paketu GAMS, za proračun optimalnih tokova snaga u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima. U tom cilju koristiće se modifikovana IEEE 33-čvorna mreža, pri čemu će podaci o vrijednost snage, kao i mjesta priključivanja obnovljivih izvora, biti preuzeti iz literature. Cilj ovoga rada je da se na osnovu upoređivanja dobijenih i literaturno poznatih vrijednosti gubitaka aktivne snage u ovako modifikovanoj mreži pokaže kvalitet solvera CONOPT u rješavanju problema optimalnih tokova snaga.

Rad je organizovan na sljedeći način. U poglavlju 2 postavljen je problem optimalnih tokova snaga i dat je opis optimizacione funkcije i ograničenja koja moraju biti ispunjena. Opšte informacije o softverskom paketu GAMS i solveru CONOPT date su u poglavlju 3. U poglavlju 4 predstavljen je opis IEEE radijalne distributivne mreže sa 33 čvora i rezultati simulacije na istoj, dok su u poglavlju 5 data završna razmatranja i smjernice za sljedeći rad.

2. OPTIMALNI TOKOVI SNAGA

Proračun optimalnih tokova snaga predstavlja optimizacioni problem, u kojem je potrebno izvršiti minimizaciju optimizacione funkcije uz poštovanje definisanih ograničenja. Opšta formulacija optimizacionog problema ovoga tipa može se dati sljedećim relacijama:

$$\begin{aligned} \min(OF(x, y)), \\ g(x, y) = 0, \\ h(x, y) \leq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

gdje je:

$OF(x, y)$ - optimizaciona funkcija koju treba minimizovati, $g(x, y)$ - funkcija koja opisuje ograničenje tipa jednakosti, $h(x, y)$ - funkcija koja opisuje ograničenje tipa nejednakosti, x - vektor zavisnih promjenjivih (naponi u čvorovima, reaktivna snaga generatora, itd) i y - je vektor kontrolnih promjenjivih (aktivna snaga generatora, reaktivna snaga baterija kondezatora, položaj odcijepa na regulacionom transformatoru, itd). Za optimizacionu funkciju u ovom radu odabrana je minimizacija gubitaka aktivne snage u mreži. Ova funkcija se može definisati na sljedeći način:

$$P_{loss} = \frac{G_{ij}}{2} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_j - \theta_i)], \quad (2)$$

gdje je: G_{ij} - provodnost grane između čvora i i j , V_i i V_j - vrijednosti napona u čvorovima i i j respektivno, θ_i i θ_j - fazni stavovi napona u čvorovima i i j respektivno.

Za ograničenja tipa jednakosti u ovom radu posmatraće se bilansi aktivnih i reaktivnih snaga, koji se

matematički mogu zapisati prema sljedećim relacijama:

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] = 0, \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] = 0, \quad (4)$$

gdje su: P_G i Q_G - aktivna i reaktivna snaga generatora, respektivno, P_L i Q_L - aktivna i reaktivna snaga potrošača, respektivno, B_{ij} - supcetansa grane između čvorova i i j i N_b - skup svih čvorova j koji su povezani sa čvorom i .

Na kraju, ograničenja tipa nejednakosti su u problemu proračuna optimalnih tokova snaga najčešće pogonska ograničenja koja moraju biti ispunjena za pravilan rad sistema:

- Ograničenja vrijednosti napona u čvorovima:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}, \quad (5)$$

- Ograničenje aktivne i reaktivne snage generatora:

$$P_G^{min} \leq P_{Gi} \leq P_G^{max}, \quad (6)$$

$$Q_G^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_G^{max}, \quad (7)$$

- Ograničenje aktivnih i reaktivnih snaga kroz vodove:

$$P_{ij}^{min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{max}, \quad (8)$$

$$Q_{ij}^{min} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij}^{max}, \quad (9)$$

- Ograničenje faznih stavova napona u čvorovima:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

3. GAMS/CONOPT

GAMS (General Algebraic Modeling softver) je softverski paket koji služi za matematičko modelovanje i optimizaciju u industrijskim ili naučnim aplikacijama. Sastoji se od kompajlera i velikog broja ugrađenih solvera, među kojima je i CONOPT.

Slika 1 - Proces rješavanja problema u GAMS-u

Velika prednost GAMS-a je u tome što daje mogućnost preciznog rješavanja linearnih i nelinearnih optimizacionih problema, pri čemu varijable optimizacionog modela mogu biti: kontinualne, diskretne i binarne.

Da bi se određeni optimizacioni problem modelovao u GAMS-u koriste se sljedeći elementi, shodno slici 1:

- Setovi (sets) – služe za definisanje indeksa koji će se koristiti u algebarskoj predstavi modela;
- Podaci (data) – ovdje se ubrajaju: parametri, tabele i skalari;
- Promjenjive (variables): predstavljaju nepoznate čije vrijednosti treba odrediti;
- Jednačine (equations) – služe za definisanje optimizacione funkcije i svih ograničenja;
- Model (model) – obuhvata optimizacionu funkciju i ograničenja, prethodno definisana pomoću jednačina;
- Iskaz za rješavanje (Solver statement) – šalje zahtjev GAMS-u za rješavanje definisanog modela;
- Izlaz (output) – može biti prikazan u GAMS-ovom interfejsu ili XLS fajlu [14].

U ovom radu kao solver za rješavanje optimalnih tokova snaga odabran je solver CONOPT iz više razloga, a neki od njih su:

- ima odlične performanse za rješavanje problema sa visokim stepenom nelinearnosti i ograničenja;
- u matematičkom zapisu modela se mogu naći i drugi izvodi funkcija;
- pokazuje visoke performanse u rješavanju modela sa velikim brojem ograničenja;
- pored mogućnosti rješavanja problema u kojima figurišu diferencijabilne funkcije, ima mogućnost i rješavanja modela i sa funkcijama koje nisu diferencijabilne.

CONOPT uzima u obzir uopšteni optimizacioni problem: definisan sljedećim jednačinama [15]:

$$\begin{aligned} \min(f(x)), \\ c(x) = b, \\ l \leq x \leq u, \end{aligned} \quad (11)$$

gdje je: $x \in \mathbb{R}^n$ - vektor promjenjivih, $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ - optimizaciona funkcija, $c: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ - nelinearno ograničenje tipa jednakosti, $b \in \mathbb{R}^m$, l i $u \in \mathbb{R}^n$ - ograničenja promjenjivih. Koraci CONOPT algoritma dati su dijagramom na slici 2 [15].

Slika 2 - Algoritam solvera CONOPT

4. SIMULACIJE I REZULTATI

Prethodno predstavljeni solver CONOPT primjenjen je za proračun optimalnih tokova snaga u IEEE radialnoj distributivnoj mreži sa 33 čvora. Parametri mreže, kao i aktivne i reaktivne snage potrošača date su u [16].

U proračunu su uzete sljedeće bazne vrijednosti:

$$S_b = 10 \text{ MVA}, V_b = 12.66 \text{ kV}, iZ_b = 16.028 \Omega.$$

Primjenom GAMS/CONOPT dobijeno je da inicijalni gubici u mreži, bez obnovljivih izvora, iznose 193.5 kW. Pored baznog slučaja proračun optimalnih tokova snaga je izveden za još 4 scenarija u kojima su priključivani: 1, 2, 3 i 6 obnovljivih izvora. Mjesta priključivanja i snage obnovljivih izvora preuzete su iz [4-5], [8-9] i [12].

Slika 3 - Naponi u čvorovima u slučaju sa i bez obnovljivih izvora

Na slici 3 prikazani su naponi u čvorovima, dok na slici 4 padovi napona po granama, za slučaj sa i bez obnovljivih izvora.

Slika 4 - Padovi napona po granama u slučaju sa i bez obnovljivih izvora

Mjesta priključivanja i snage obnovljivih izvora preuzete su iz [4], gdje je proračun izveden primjenom PPSO algoritma. Posmatrajući navedene slike zaključuje se da priključivanje obnovljivih izvora dovodi do povećavanja napona u priključnim čvorovima, i smanjivanja padova napona po granama. Međutim, treba

naglasiti da u praksi snaga obnovljivih izvora nije konstantna i da svi obnovljivi izvori imaju intermitentni karakter, što utiče na pulsacije njihove proizvodnje i promjene napona u mreži. Zbog toga, iako je to ovdje pokazano, ne može se izvesti generalan zaključak da priključivanje obnovljivih izvora doprinosi poboljšanju naponskih prilika u mreži. Kompenzacija naponskih kolebanja se može, u određenoj mjeri, kompenzovati upravljanjem reaktivnim snagama injeriranja/apsorbovanja od strane obnovljivih izvora ili ugradnjom SVC uređaja u određenim čvorištima mreže.

Slika 5 - Tokovi aktivnih snaga po granama u slučaju sa i bez obnovljivih izvora [4]

Na slici 5 i 6 prikazani su tokovi aktivnih i reaktivnih snaga, respektivno, u slučaju sa i bez obnovljivih izvora energije. Posmatrajući sliku 5 zaključujemo da se priključivanjem obnovljivih izvora energije smanjuje snaga koju mreža uzima iz napojnog čvora. Takođe, sa slike vidimo da dolazi do rasterećivanja vodova, odnosno smanjenja aktivnih snaga koje se njima prenose, pri čemu je rasterećivanje izraženije što je broj priključenih obnovljivih izvora veći. Sa slike 6 se vidi da priključivanje obnovljivih izvora energije ne mijenja tokove reaktivnih snaga, što je i za očekivati uzevši u obzir da priključeni generatori ne injeziraju reaktivnu snagu u čvorove (npr. solarni paneli).

Slika 6 - Tokovi reaktivnih snaga po granama u slučaju sa i bez obnovljivih izvora

U tabeli 1 prikazane su vrijednosti minimalnih gubitaka (P_{loss}) u distributivnoj mreži proračunati primjenom metaheurističkih i hibridnih metoda, kao i primjenom GAMS/CONOPT solvera. Posmatrajući rezultate prikazane u tabeli, može se zaključiti da se GAMS/CONOPT može efikasno primijeniti za proračun optimalnih tokova snaga u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima energije. U tabeli 1 oznaka P_i predstavlja snagu priključenih obnovljivih izvora.

U ovom radu simulacija je izvršena na računaru sa: procesorom *Intel Core i3* 2.30 GHz, 8 GB RAM i 64 – bitnim operativnim sistemom.

Prosječno vrijeme izvršavanja proračuna optimalnih tokova snaga primjenom GAMS/CONOPT solvera je 0.21 sec, što je neporedivo brže u odnosu na vrijeme izvršavanja proračuna primjenom metaheurističkih i hibridnih algoritama, a što je diskutovano u [17-18].

Tabela 1. Minimalni gubici u mreži sa obnovljivim izvorima energije proračunati primjenom metaheurističkih i hibridnih metoda, kao i solverom CONOPT

Broj izvora	Čvor	P_i (MW)	P_{loss} (MW)	CONOPT
			PPSO [4]	
1	6	2.5743	0.1039	0.10235
2	13	0.8461	0.0858	0.08413
	30	1.1582		
3	14	0.7538	0.0714	0.06868
	24	1.0989		
	30	1.0711		
6	7	0.9464	0.0639	0.06333
	15	0.5534		
	20	0.2984		
	24	0.5034		
	25	0.4602		
	31	0.7005		
Broj izvora	Čvor	P_i (MW)	P_{loss} (MW)	CONOPT
			PSOCFA [8]	
1	6	2.5752	0.1039	0.10235
2	14	0.7876	0.0862	0.08417
	29	1.2487		
3	10	1.0491	0.076	0.07389
	25	0.8786		
	33	0.8049		
6	5	0.862	0.0667	0.06599
	8	0.4617		
	15	0.5661		
	24	0.8018		
	28	0.1367		
	30	0.7194		
Broj izvora	Čvor	P_i (MW)	P_{loss} (MW)	CONOPT
			BSOA [5]	
1	8	2.5752	0.1181	0.1112
2	13	0.88	0.0893	0.08872
	31	0.924		

Broj izvora	Čvor	P_i (MW)	P_{loss} (MW)	CONOPT
			PIPSO-SQP [9]	
1	6	2.59	0.11101	0.10239
2	13	0.84	0.08717	0.08409
	30	1.14		
3	13	0.73	0.07278	0.06992
	24	1.07		
	30	1.09		
4	9	1.01	0.0765	0.07287
	19	0.19		
	24	1.25		
	31	0.8		
Broj izvora	Čvor	P_i (MW)	P_{loss} (MW)	CONOPT
			HSA-PABC [12]	
1	6	2.598	0.11103	0.10240
3	14	0.755	0.07281	0.06967
	24	1.073		
	30	1.068		

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prezentovana primjena solvera GAMS/CONOPT za rješavanje problema optimalnih tokova snaga u distributivnoj mreži sa obnovljivim izvorima energije. Za simulaciju je korišćena IEEE radijalna distributivna mreža sa 33 čvora, dok su mjesta priključivanja i snage obnovljivih izvora preuzete iz dostupne literature.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je GAMS/CONOPT veoma efikasan za rješavanje pomenutog problema u EES i da u poređenju sa metaheurističkim i hibridnim metodama daje bolje rezultate u pogledu minimizacije gubitaka aktivne snage.

U daljem istraživačkom radu pažnja će biti posvećena na primjeni softvera GAMS u rješavanju problema optimalne alokacije i snage obnovljivih izvora u distributivnoj mreži, sa ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage i poboljšanja naponskih prilika.

LITERATURA

- [1] J. C. Das, Load Flow Optimization and Optimal Power Flow, 1st ed. CRC Press, 2017.
- [2] I. Yahyaoui, Advances in Renewable Energies and Power Technologies: Volume 1: Solar and Wind Energies, 1 ed., Elsevier Science, 2018.
- [3] H. HassanzadehFard, A. Jalilian, Optimal sizing and location of renewable based DG units in distribution systems considering load growth, *Electrical and Electronic Engineering*, godine, pp. 356-370, 2019.
- [4] Z. Ullah, S. Wang, J. Radosavljević, A Novel Method Based on PPSO for Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2019..
- [5] A. El-Fergany, Optimal allocation of multi- type distributed generators using backtracking search optimization algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, godine, pp. 1197-1205, 2015..
- [6] A.A. Hassan, F.H. Fahmy, Abd El-Shafy A. Nafeh, M.A. Abuelmagd, Genetic single objective optimization for sizing and allocation of renewable DG systems, *International Journal of Sustainable Energy*, godine, pp. 545-562, 2015.
- [7] E.S. Ali, S.M. Abd Elazim, A.Y. Abdelaziz, Ant Lion optimization algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generators, *Renewable Energy*, 2017. godine, pp. 1311-1324.
- [8] K.D. Mistry, R. Roy, Enhancement of loading capacity of distribution systems through distributed generator placemen considering techno-economic benefits with load growth, *Electrical Power and Energy Systems*, godine, pp. 505-515, 2014.
- [9] S. Angalaeswari, P. Sanjeevikumar, K. Jamuna, Zbigniew Leonowicz, *Hybrid PIPSO-SQP algorithm for real power loss minimization in radial distribution systems with optimal placement of distributed generators*, Sustainability, 2020..
- [10] M.H. Moradi, M. Abedini, A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for

- optimal DG location and sizing in distribution system, *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 66-74, 2012..
- [11] A.S. Hassan, Y. Sun, Z. Wang, Multi-objective for placement and sizing DG units in reducing loss of power and enhancing voltage profile using BPSO-SLFA, *Energy Reports*, pp. 1581-1589, 2020.
- [12] K. Muthukumar, S. Jayalalitha, Optimal placement and sizing of distributed generators and shunt capacitors for power loss minimization in radial distribution networks using hybrid heuristic search optimization technique, *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 299-319, 2016.
- [13] C. Yammani, S. Maheswarapu, S. K. Matam, Optimal placement and sizing of distributed generations using shuffled bat algorithm with future load enhancement, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, pp. 274-292, 2016.
- [14] A. Soroudi, *Power Systems Optimization Modeling in GAMS*, Springer, 2017.
- [15] A. Neculai, *Continuous Nonlinear Optimization for Engineering Applications in GAMS Technology*, Springer, 2017.
- [16] V. Vita, Development of Decision-Making Algorithm for the Optimal Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Network, *Energies*, 2017.
- [17] M. Čalasan, T. Konjić, K. Kecojević, L. Nikitović, Optimal Allocation of Static Var Compensators in Electric Power Systems, *Energies*, 2020, Vol. 13, pp. 3219; doi:10.3390/en13123219
- [18] M. Čalasan, L. Nikitović, S. Mujović, CONOPT solver embedded in GAMS for optimal power flow, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 11, pp. 1-16, 2019.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE VOLTAGE PROFILE AND POWER LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORK WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES USING CONOPT SOLVER

In this paper, CONOPT solver, embedded in program GAMS, is proposed for optimal power flow analysis in distribution network with renewable energy sources. CONOPT solver possibilities have been tested on IEEE 33 test system solving a problem of minimizing active power losses in the network. Locations and sizes of renewable energy sources were taken from available literature. The results obtained using CONOPT solver have been compared with results obtained by using metaheuristic and hybrid algorithms. It is shown that the CONOPT solver gives better results in terms of minimum values of active power losses.

Key words: active power losses, CONOPT, distribution network, renewable energy sources, voltage profile