

IZBOR OPTIMALNIH POZICIJA I TIPA DISTRIBUTIVNIH GENERATORA I KONDENZATORSKIH BATERIJA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI PRIMENOM MOPSO

OPTIMAL PLACEMENT AND SELECTION OF DISTRIBUTION GENERATORS AND CAPACITOR BANKS IN DISTRIBUTION NETWORK WITH MOPSO

Balaž Kereši, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – Elektroenergetika – elektroenergetski sistemi

Kratak sadržaj – U ovom radu prikazan je postupak za izbor optimalne pozicije i optimalnih karakteristika distributivnih generatora i kondenzatorskih baterija u radijalnoj distributivnoj mreži. Postupak se zasniva na *Multi-objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)* algoritmu. Verifikacija njegovih mogućnosti realizovana je na primeru mreži IEEE-33.

Ključne reči: *Distributivni generatori, Kondenzatorske baterije, Particle Swarm Optimization*

Abstract – *This master thesis describes the problem of optimal siting and sizing of Distribution Generators and Capacitor Banks on radial distribution network. This paper also discusses the usage of Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm to solve the proposed problem. Additionally, one simulation shows the problem solution on IEEE-33 standard system.*

Keywords: *Distribution Generators, Capacitor Banks, Particle Swarm Optimization*

1. UVOD

Održavanje i razvoj elektroenergetskih sistema (EES) postaje sve kompleksniji zadatak čija realizacija ima sve veće troškove.

Pojavom distributivnih generatora (DG) klasične pasivne distributivne mreže (DM) postaju aktivne, tako da osim potrošnje mogu i da proizvode električnu energiju [1].

Postavljanjem kondenzatorskih baterija (KB) ostvarene su dodatne mogućnosti u regulaciji reaktivnih snaga i napona u DM [2].

Izbor optimalnih pozicija i optimalnih tipova DG (OPSDG) odnosno KB (OPSKB) predstavlja složen problem optimizacije (PO) koji se rešava primenom mešovito-celobrojnog nelinearnog programiranja [3]. Pored analitičkih i numeričkih metoda, pri rešavanju ovih problema veoma su efikasni evolucionarni algoritmi i tehnike veštačkih inteligencija [1]. Zbog raznovrsnih i često kontradiktornih kriterijuma predstavljen PO može da se razmatra kao problem više kriterijumskih funkcija. U toj oblasti *Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)* predstavlja jedan od najčešće korišćenih algoritama [4] i kao takav koristi se i u ovom radu.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor dr Goran Švenda, red.prof.

Cilj ovog rada je da predstavi probleme OPSDG i OPSKB i da na osnovu MOPSO algoritma formira postupak za njihovo rešavanje. Verifikacija njegovih mogućnosti realizovana je na primeru mreže IEEE-33 [5].

Nakon Uvoda, u drugom delu rada izvršena je postavka problema OPSDG i OPSKB. U trećem delu prikazani su modeli elemenata DM i osnovni detalji MOPSO algoritma. U četvrtom delu su izvršeni eksperimenti sa različitim postavkama PO i dati rezultati pokazatelja efikasnosti ponuđenog rešenja. Nakon Zaključka koji je dat u petom delu u šestom delu je navedena korišćena literatura.

2. POSTAVKA PROBLEMA

OPSDG i OPSKB opisani su kao višekriterijumski problemi optimizacije (VPO). Nad skupom postignutih rešenja je kreiran Pareto front [5] koji sadrži sva nedominantna rešenja postignuta algoritmom.

2.1. Višekriterijumski problem optimizacije

Zadatak VPO jeste izbor vrednosti ulaznih promenljivih razmatranog matematičkog modela, sa ciljem poboljšanja vrednosti više kriterijumskih funkcija, uz uvažavanje aktivnih ograničenja jednakosti i/ili nejednakosti [6].

Matematički opis VPO glasi [6]:

$$\begin{aligned} \text{Minimizirati: } & f_l(\mathbf{u}) & l=1,2,\dots,M_{obj} \\ \text{uz ograničenja: } & g_i(\mathbf{u}) \leq 0 & i=1,2,\dots,m \\ & h_j(\mathbf{u}) = 0 & j=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (1)$$

gde je:

- \mathbf{u} – vektor promenljivih, $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_{N_{prom}}]$, $\mathbf{u} \in U$, U je prostor odluke, a N_{prom} broj promenljivih;
- f_l – l -ta kriterijumska funkcija, $l=1,2, \dots, M_{obj}$, M_{obj} je broj elemenat kriterijumskog prostora;
- g_i – i -ta ograničenja nejednakosti, $i=1,2, \dots, m$, m je broj ograničenja nejednakosti;
- h_j – j -ta ograničenja jednakosti, $j=1,2, \dots, n$, n je broj ograničenja jednakosti.

2.2. Ulazni parametri modela optimizacije

Razmatrani PO ima sledeće ulazne promenljive:

- indeks čvora svih postavljenih uređaja;
- injektirane aktivne i reaktivne snage upravljivih DG;
- nominalne snage ne-dispečabilnih DG i KB;
- pozicija regulacione sklopke napojnog regulacionog transformatora (RTR).

3. MATEMATIČKI MODELI

Radikalna DM je modelovana pomoću čvor-grana modela. U skladu sa radikalnom strukturom DM za proračune tokova snaga koristi se Shirmohammadi-jev algoritam [7].

3.1. Modeli DG-a i KB-a

U ovom delu prikazani su model simuliranih DG i KB.

3.1.1. Modelovanje dispečabilnih generatora

U cilju kontrole, granice injektiranja aktivne i reaktivne snage DG su u opsegu tehničkih granica elektrane.

3.1.2. Modelovanje kondenzatorskih baterija

KB su modelovane kao dodatni otočni element u čvoru u kojem su postavljene [5]:

$$B = \frac{Q_n}{V_n^2}, \quad (2)$$

gde je:

B – supseptansa KB;

Q_n – nominalna reaktivna snaga KB, za $V = V_n$;

V_n – nominalni napon KB;

3.1.3. Modelovanje vetrogeneratora

Proizvodnja vetrogeneratora uglavnom zavisi od brzine vetra na lokaciji gde je vetroturbina postavljena [5]:

$$P_{DG,wind,p} = \begin{cases} 0, & v_p < v_{ci} \\ \alpha \cdot v_p^3 + \beta \cdot P_n, & v_{ci} \leq v_p < v_n \\ P_n, & v_n \leq v_p < v_{co} \\ 0, & v_{co} < v_p \end{cases}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{P_n}{v_n^3 - v_{ci}^3}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{v_{ci}^3}{v_n^3 - v_{ci}^3}, \quad (5)$$

gde je:

$P_{DG,wind,p}$ – proizvodnja vetroturbine pri brzini vetra v_p ;

v_p – brzina vetra u stanju p ;

P_n – nominalna snaga vetrogeneratora;

v_{ci} – brzina uključivanja vetroturbine (cut-in speed);

v_n – nominalna brzina vetroturbine;

v_{co} – brzina isključenja vetroturbine;

Za prognozu brzine vetra korišćena je Weibull-ova raspodela [5].

3.1.4. Modelovanje solarnih generatora

Proizvodnja solarnog panela u stanju p [5]:

$$P_{DG,solar,p} = N \cdot FF \cdot I_p \cdot V_p, \quad (6)$$

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{SC}}, \quad (7)$$

$$I_p = s_{avg,p} (I_{SC} + K_i (T_{C,p} - 25)), \quad (8)$$

$$V_p = V_{OC} - K_V \cdot T_{C,p}, \quad (9)$$

$$T_{C,p} = T_A + s_{avg,p} \left(\frac{N_{OT} - 20}{0.8} \right) \quad (10)$$

gde je:

$P_{DG,solar,p}$ – proizvodnja solarnog panela u stanju p ;

$T_{C,p}$ – nominalna temperatura ćelije u stanju p [°C];

T_A – nominalna temperatura ambijenta [°C];

$s_{avg,p}$ – srednja solarna radijacija u stanju p ;

N_{OT} – nominalna operaciona temperatura solarnih ćelija;

I_p – struja solarnih panela u stanju p ;

V_p – napon solarnih panela u stanju p ;

I_{SC} – struja kratkog spoja solarnih panela;

V_{OC} – napon praznog hoda solarnih panela;

K_i – temperaturni koeficijent struje [A/°C];

K_V – temperaturni koeficijent napona [V/°C];

N – broj solarnih panela;

FF – fill faktor solarnih panela.

U modelu vrednosti solarne iradijacije su prognoziranje pomoću Beta raspodele [5].

3.2. Kriterijumske funkcije

Ovom paragrafu su kvantifikovane kriterijumske funkcije na osnovu pojedinih pokazatelja mreže.

3.2.1. Aktivni gubici mreže

Gubici DM:

$$P_{Loss} = P_0 - \sum_{i=1}^{N_b} P_i \quad (11)$$

gde je:

P_{Loss} – aktivni gubici mreže;

P_0 – protok aktivne snage kroz koren mreže;

P_i – injektirana aktivna snaga potrošnje u čvoru i ;

N_b – broj čvorova.

3.2.2. Kriterijum indeksa naponske stabilnosti

Indeks naponske stabilnosti (VSI) predstavlja pokazatelj stabilnosti sistema na osnovu napona mreže i opterećenja. VSI je izračunat na osnovu sledeće formule [5]:

$$VSI_j = |V_i|^4 - 4.0 \cdot (P_j \cdot X_j - Q_j \cdot R_j)^2 - 4.0 \cdot (P_j \cdot R_j + Q_j \cdot X_j)^2 |V_i|^2 \quad (12)$$

gde je:

VSI_j – indeks naponske stabilnosti j -te grane;

X_j – reaktansa j -te grane;

R_j – aktivna otpornost j -te grane;

P_j – injektirana aktivna potrošnja u j -tom čvoru;

Q_j – injektirana reaktivna potrošnja u j -tom čvoru;

V_i – napon početnog čvora j -te grane.

Na nivoa mreže ova kriterijumska funkcija se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$f_2 = \frac{1}{\sum_{i=2}^{N_b} VSI_i'} \quad (13)$$

3.2.3. Kriterijum naponskog odstupanja

Kriterijumska funkcija odstupanja napona definisana je izrazom [5]:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_b} |1 - \text{real}(V_i^t)|. \quad (14)$$

3.3. Ograničenja

PO ima sledeća ograničenja:

1. bilansa snage;
2. pozicija za postavljanje DG i/ili KB;
3. vrednosti modula napona svih čvora mreže;
4. injektirane aktivne i reaktivne snage postavljenih jedinica.

3.4. Mult-objective Particle Swarm Optimization

Osnovni entiteti MOPSO algoritma su čestice [5]. Jednu česticu karakterišu njeni atributi. U slučaju postavljenog problema atributi su pozicije DG i KB, odnosno njihove injektirane aktivne i reaktivne snage.

U prvoj iteraciji svaka čestica dobija slučajne atribute i izračunati su postignute vrednosti kriterijumskih funkcija. Njihovi globalno najbolji, Pareto dominantni rezultati su sačuvani u skladištu nedominantnih rešenja (REP). Algoritam dodatno pamti lično najbolje rezultate svih čestica.

U narednim iteracijama svaka čestica može da menja svoje atribute u smeru koji je određen na osnovu poznatih lično i globalno najboljih rešenja.

Zbog velike brzine konvergencije proračuna mutacioni operator takođe može da bude korišćen u kasnijim iteracijama. Prilikom mutacije atributi čestica ponovo dobiju slučajne vrednosti i zanemareni su lično i globalno najbolji rezultati.

3.5. Skladište nedominantnih rešenja (REP)

Globalno najbolji postignuti rezultati su sačuvani u REP. Prilikom procenjivanja novog rešenja posebna procedura proverice dominantnost novog rešenja nad ovim skupom. Ako ne postoji nijedno rešenje koje bi dominiralo nad novim, ono je dodato u REP-u. Ukoliko novo rešenje dominira nad drugima, oni nad kojim dominira će biti odbačeni.

REP ima ograničen broj elemenata. Ako prilikom dodavanja novog rešenja u skupu ova ograničenja budu preoračena, potrebno je odbaciti neki element od REP. Za izbor odbačenog elementa tehnika adaptivnih rešetaka je korišćena za podržavanje ravnomerne raspodele Pareto fronta.

Prilikom korišćenja adaptivnih rešetaka posebna procedura kategoriše postignute globalno najbolje rezultate na osnovu regiona kriterijumskog prostora u kojoj pripadaju. Prilikom odbacivanja elementa od REP-a rezultati najgušćih regiona imaju najveću šansu da budu odbačeni. Adaptivne rešetke takođe mogu da budu korišćene prilikom izbora elementa za pomeraj pozicije čestice.

3.6. Donošenje odluka pomoću kružne metrike

Za rangiranje rešenja korišćena je sledeća kružna metrika:

$$R_k = \sum_{i=1}^{M_{obj}} \left(\frac{f_i^{\min} - f_i^k}{f_i^0} \right)^2 \quad (16)$$

gde je:

- f_1^{\min} – minimalna vrednost i -te kriterijumske funkcije;
- f_1^k – vrednost i -te kriterijumske funkcije u tački k ;
- f_i^0 – bazični vrednost kriterijumske i -te funkcije
- R_k – poluprečnik kruga tačke k ;
- k – indeks tačka Pareto fronta.

Izabrana čestica je ona koja ima najmanji poluprečnik kruga.

4. SIMULACIJE NA RAČUNARU

Verifikacija prikazanog MOPSO algoritma izvršena je na primeru 12.66 kV IEEE-33 mreže. Mreža ima 33 čvora, njeno maksimalno aktivno i reaktivno opterećenje je 3715 kW i 2300 kVAr, respektivno.

4.1. OPSDG za maksimalno opterećenje mreže

Traži se optimalno rešenje: gde postaviti i kakav upravljiv DG. Na raspolaganju su sledeći tipovi DG:

- Tip 1 – DG injektira samo aktivnu snagu u mreži;
- Tip 2 – DG injektira samo reaktivnu snagu u mreži;
- Tip 3 – DG injektira i aktivnu i reaktivnu snagu u mreži.

Injektiranja aktivne i reaktivne snage mogu da budu u opsegu 0÷2 MW i 0÷2 MVar, respektivno. Dozvoljene vrednosti napona svih čvora se nalaze u opsegu 0.95÷1.05 [r.j.]. DG mogu da se postave u svaki čvor DM, osim u koren DM. Za proračune tokova snaga potrošnja je modelovana konstantnim modulom struje i konstantnim faktorom snage. DM se napaja preko RTR prenosnog odnosa 1±12·1.25% [r.j.]. Optimalna rešenja su prikazana u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Optimalna rešenja: maksimalno opterećenje

Tip DG	Broj DG	Pozicija teretnog menjača	Pozicija DG	Injektirana aktivna i reaktivna snaga [MW][MVar]
Tip 1	1	3	10	1.873
	3	3	15, 24, 30	1.122, 1.227, 1.398
Tip 2	1	4	8	1.884
	3	4	7, 15, 30	0.878, 0.764, 1.819
Tip 3	1	3	8	P: 1.969 Q: 1.332
	3	3	11, 25, 30	P: 1.330, 0.508, 1.163 Q: 0.183, 0.834, 1.091

Tabela 2. Vrednosti kriterijumskih funkcija

Tip DG	Broj DG	Aktivni gubici mreže [kW]	VSI
Bez DG	–	182.49	25.96
Tip 1	1	124.54	29.59
	3	88.39	31.16
Tip 2	1	171.36	27.94
	3	177.27	29.26
Tip 3	1	80.98	30.62
	3	25.69	32.20

Napomena: ako pozicija regulacione sklopke nije obuhvaćena procesom optimizacije, ne može da se nađe optimalno rešenje za postavku jednog DG tipa 1 i tipa 2, a da se pritom ne naruše postavljena ograničenja.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se postavljanjem više DG mogu značajno popraviti vrednosti kriterijumskih funkcija.

Tabela 3 su uporedno prikazane vrednosti rezultata

primene MOPSO i NSGA-II [8] algoritma. Rezultati su dobijeni prilikom postavljanja generatora tipa 3.

Tabela 3. Vrednosti kriterijumskih funkcija dva algoritma

Broj DG	1	2
Aktivni gubici [kW](MOPSO)	80.98	32.58
Aktivni gubici [kW] (NSGA-II)	71.75	33.93
VSI (MOPSO)	30.62	31.80
VSI (NSGA-II)	30.16	32.48

Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da ni jedan od dva algoritma ne dominira. Na osnovu dodatne analize može se zaključiti da Pareto front NSGA-II algoritma ima bolju distribuciju u odnosu MOPSO, dok MOPSO algoritam karakteriše manje vreme proračuna u zavisnosti od broja kriterijumskih funkcija.

4.2. OPSDG i OPSKB za karakteristične dane i sezone

Traži se optimalno rešenje za postavljanje jedne vetroelektrane sa 1-4 generatora (nominalne snage 250 kW po generatoru), jedne solarne elektrane sa 1-4 generatora (nominalne snage 250 kW po generatoru) i jedne kondenzatorske baterije sa 1-8 kondenzatora (nominalne snage 125 kVAr po kondenzatoru). Napomena: primer odgovara postavljanju jednog upravljivog DG, tipa 1, čija injektirana snaga može da varira u opsegu 0-2 MW. U tabeli 4su prikazana optimalna rešenja:

Tabela 4. Optimalna rešenja: karakteristični dani i sezone

Element	Čvor	P [kW]	Q [kVAr]
Kondenzator	27	-	875
Solarna elektrana	33	1000	0
Vetroelektrana	18	1000	0
Upravljivi generator	6	1843	0

Vrednosti kriterijumskih funkcija su prikazane u tabeli 5:

Tabela 5. Vrednosti kriterijumskih funkcija

		Leto	Jesen	Zima	Proleće
Gubici energije za 24h [MWh]	Pre	2.481	0.294	0.637	0.385
	Posle	0.710	0.269	0.294	0.254
Prosečni VSI	Pre	0.775	0.916	0.879	0.904
	Posle	0.932	0.993	0.974	0.989
Prosečni naponski profil	Pre	0.937	0.978	0.968	0.975
	Posle	0.981	0.988	0.990	0.990

Rezultati jednoznačno ukazuju na smanjenje gubitaka u mreži, poboljšanje kriterijuma VSI-a i smanjenje odstupanja napona.

5. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrane mogućnosti rešavanja OPSDG i OPSKB u radijalnim DM primenom MOPSO algoritma, za različite kriterijumske funkcije.

U prvom primeru, prikazano je postavljanje jednog ili višeg distributivnih generatora:

- MOPSO daje dobra rešenja problema OPSDG sa različitim tipovima DG;
- MOPSO algoritam vraća rezultate slične NSGA-II algoritma ako, međutim, povećanjem broja ulaznih promenljivih distribucija NSGA-II rezultata su bolji,

ali vremenski troškovi MOPSO-a su manji.

- Značajno bolji rezultati se dobijaju ako se optimizacijom obuhvate i RTR (često se bez njih ne može doći do rešenja koje je unutar propisanih granica).

U drugom primeru, razmatran je problem postavljanja vetro i solarnih generatora, odnosno KB-a na osnovu prognoziranih vrednosti proizvodnje. Na osnovu rezultata može se zaključiti:

- Rezultati MOPSO algoritma prikazuju dugoročne benefite postavljanja obnovljivih generatora u stanovištu kriterijumskih funkcija gubitaka aktivne snage, VSI i naponskih profila;
- MOPSO algoritam efektivno rešava PO prilikom povećanja broja kriterijumskih funkcija.

6. LITERATURA

- [1] S.A.A.Kazmi, H.K.Shahzad, D.R.Shin: Multi-Objective Planning Techniques in Distribution Networks: A Composite Review; *Energies*, Vol.10, Issue 2, Feb. 2017, pp. 208-251
- [2] V.Strezorski: *Analiza elektroenergetskih sistema*, Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2006.
- [3] Y.M.Atwa, E.F.El-Saadany, M.M.A.Salama, R.Seethapathy: Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 25, No. 1, Feb 2010, pp. 360-371.
- [4] R.Sirjani, A.Mohamed, H.Sharef:Heuristic Optimization Techniques to Determine Optimal Capacitor Placement and Sizing in Radial Distribution Networks:A Comprehensive Review, *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol.88, Issue 7a, Jan. 2012, pp. 1-7.
- [5] M.Kumar, P.Nallagownden, I.Elamvazuthi: Optimal Placement and Sizing of Renewable Distributed Generations and Capacitor Banks into Radial Distribution Systems, *Energies*, Vol. 25, Issue 1, Feb. 2010, pp. 811-835.
- [6] C.A.Coello, G.T.Pulido, M.S.Lechuga: Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization, *IEEE Trans.on Evolutionary Computation*, Vol. 8. Issue 3, June 2004, pp. 256-279.
- [7] D.Shirmohammadi, H.W.Hong, A.Semlyen, G.X.Luo: A Compensation-Based Power Flow Method for Weekly Meshed Distribution and Transmission Networks, *IEEE Trans.on PS*, Vol. 3, Issue 2, May 1988, pp. 753-762.
- [8] K.Deb, A.Pratap, S.Agarwal, T.Meyarivan: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans.on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, April 2002, pp. 182-197.

Kratka biografija:



Balaž Kereši rođen je u Senti 1993. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetika – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2019.god.

kontakt: kobalu@gmail.com