

ODABIR OPTIMALNE LOKACIJE I VELIČINE VETROGENERATORA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI UZ UVAŽAVANJE NEIZVESNOSTI POTROŠNJE

Dorđe LAZOVIĆ, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija
Andrej TASIĆ, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija
Predrag STEFANOV, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija
Darko ŠOŠIĆ, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Tema ovog rada odnosi se na optimizacioni postupak priključenja vetroelektrana na distributivnu mrežu. U tu svrhu, vršeni su proračuni tokova snaga u radialnim distributivnim mrežama, pri čemu je uvažena neizvesnost proizvodnje i potrošnje. Snaga injektiranja u distributivnoj mreži često nije poznata, već se na neki način procenjuje, te ju je potrebno tretirati sa određenom verovatnoćom. Neizvesnost je uvažena korišćenjem fuzzy predstave napona, aktivnih i reaktivnih snaga. Sa tim u vezi, proračuni tokova snaga i naponskih prilika su vršeni fuzzy iterativnim postupkom. Ovi proračuni su osnova za primenu optimizacionog postupka za izbor lokacija i instalisanih snaga vetroelektrana koje je potrebno priključiti na mrežu sa ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage u sistemu. U pitanju je optimizacioni problem velike dimenzionalnosti čija objektivna funkcija nije linearna, neprekidna, diferencijabilna uz prisustvo velikog broja ograničenja. Za ovakve probleme, pokazale su se kao vrlo efikasne metaheurističke optimizacione metode. U ovom radu, primenjena je metoda diferencijalne evolucije. U analizama su uvažena tehnička ograničenja u pogledu dozvoljenih vrednosti napona i struja. Kao rezultat proračuna dobijaju se optimalni uređeni parovi instalisanih snaga vetroelektrana i čvorova priključenja. Poznato je da obnovljivi izvori energije u opštem slučaju povoljno utiču na naponske prilike i gubitke u distributivnoj mreži i ti efekti su potvrđeni rezultatima ovog rada.

Ključne reči: Distributivne mreže, fuzzy tokovi snaga, integracija vetroelektrana, diferencijalna evolucija

SUMMARY

The subject of this paper is optimization process of integration of wind power plant into distribution network. For that purpose, load flow calculations in radial distribution network is used considering uncertainty of production and consumption. In distribution system injection power is generally unknown, so it is necessary to estimate it somehow and take factors of probability into account. Uncertainty is included using fuzzy representation of voltage, active and reactive power. Hence, load flow calculations were performed using fuzzy iterative procedure. These calculations are the basis of optimization procedure for finding locations and rated power of wind power plants that are necessary to integrate in system, in order to minimize losses of active power. This is optimization problem of huge dimensions, objective function is non-linear, non-continuous, non-differential with many constraints. For these problems, meta-heuristic searching optimization methods are widely recognized as efficient approach. In this paper, Differential Evolution method is used. Also, technical constraints of permissible voltages and currents are included in analysis. Arranged pairs of optimal rated power of wind power plants and nodes of connection are results of these calculations. It is known that renewable energy sources have favorable impact on voltages and power losses in distribution network, which is demonstrated as a result in this paper.

Keywords: Distribution network, fuzzy power flow, integration of wind power plant, Differential Evolution

UVOD

Distributivne mreže za razliku od prenosnih mreža odlikuje znatno manja redundantnost sa aspekta merenih radnih veličina. Injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga po čvorovima nisu poznate, te ih je potrebno prognozirati. Prema (1,2) metode za prognozu potrošnje se u zavisnosti od toga da li se uvažava neizvesnot prognoziranje veličine uvođenjem slučajnih promenljivih ili ne, dele na determinističke i probabalističke. U radu je korišćena probabalistička fuzzy predstava snaga injektiranja, gde se za svaki interval poverenja određuje skup prognoziranih vrednosti sa odgovarajućim verovatnoćama. Zbog probabalističke fuzzy predstave potrošnje primenjuje se fuzzy proračun tokova snaga i naponskih prilika distributivnim mrežama (1).

Moderni elektronergetski sistemi podrazumevaju sve obimniju integraciju obnovljivih izvora energije, naročito energije iz sunca i vetra. Neophodno je ispitati njihov uticaj na rad distributivnih mreža u pogledu gubitaka i naponskih prilika. U radu je analizirano priključenje distribuiranog generisanja vetroelektrana u IEEE distributivnojtest mreži sa 33 čvora. Izvršena je optimizacija lokacija priključenja i instalisanih kapaciteta generatorskih jedinica sa aspekta minimizacije gubitaka aktivne snage. Analizirani problem je nelinearnog, nediferencijabilnog i prekidnog karaktera sa brojnim ograničenjima tipa nejednakosti. Takav problem zahteva primenu neke od metaheurističkih optimizacionih metoda. U radu je primenjena metoda diferencijalne evolucije (3,4). U radu (5) analiziran je sličan optimizacioni problem, koji je poslužio za verifikaciju rezultata dobijenih primenjenim algoritmom diferencijalne evolucije.

FUZZY ITERATIVNI POTUPAK ZA PRORAČUN TOKOVA SNAGA

Uvod o fuzzy brojevima

Ako je $X = \{x\}$ skup elemenata, onda je \tilde{A} fuzzy skup od X definisan skupom uređenih parova:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)), x \in X\},$$

gde je $\mu_{\tilde{A}}(x)$ funkcija pripadnosti koja pokazuje stepen pripadnosti elementa x fuzzy skupu \tilde{A} . Funkcija pripadnosti $\mu_{\tilde{A}}(x)$ može da ima bilo koju vrednost između 0 i 1, i predstavlja meru verovatnoće pojavljivanja nekog elementa x iz fuzzy skupa \tilde{A} . Najveća vrednost funkcije pripadnosti elemenata koji pripadaju fuzzy skupu predstavlja visinu fuzzy skupa. Fuzzy skup je normalizovan ukoliko je funkcija pripadnosti bar jednog njegovog elementa jednaka 1.

Fuzzy skup se može interpretirati i kao skup kontinualno složenih intervala poverenja $A^{(\alpha)}$, gde α predstavlja nivo skupova od skupa α . Interval poverenja $A^{(\alpha)}$, odnosno α nivo skup od skupa \tilde{A} za svako $\alpha \in [0,1]$ definiše se na sledeći način:

$$A^{(\alpha)} = \{x \in X; \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}.$$

Fuzzy skup je konveksan ukoliko je zadovoljena sleća relacija:

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \mu_{\tilde{A}}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}}(x_2), \quad \forall x_1, x_2 \in X; \forall \lambda \in [0,1].$$

Pod fuzzy brojem podrazumeva se fuzzy skup koji je konveksan i normalizovan. Fuzzy brojevi su jednoznačno određeni funkcijom pripadnosti i intervalom poverenja.

Funkcija pripadnosti nekog fuzzy broja sama po sebi može da bude proizvoljna kriva čiji oblik je moguće definisati kao funkciju koja je najprikladnija sa stanovišta tačnosti, pogodnosti, brzine i efikasnosti za rešavanje određenog problema. Za rešavanje problema tokova snaga u elektroenergetskim sistemima sasvim je korektno koristiti fuzzy brojeve sa linearizovanim segmentima funkcija pripadnosti- fuzzy brojeve trougaonog i trapeznog tipa.

Defazifikacija je proces dodeljivanja determinitičke vrednosti fuzzy broju. Metode koje se najčešće koriste su metode: težišne tačke, jednakih površina, srednjeg maksimuma, najmanjeg maksimuma, najvećeg maksimuma i druge. Metoda koja je korišćena je metoda težišne tačke koja se zasniva na formuli:

$$\text{defuzzy}(\tilde{A}) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot dx}$$

Operacije nad fuzzy brojevima

Za dva trapezna fuzzy broja $\tilde{A} = [a_1, a_2, a_3, a_4]$ i $\tilde{B} = [b_1, b_2, b_3, b_4]$, gde realni brojevi (koordinate) a_1, a_2, a_3, a_4 i b_1, b_2, b_3, b_4 određuju njihove intervale poverenja, definišu se sledeće operacije:

sabiranje: $\tilde{A} + \tilde{B} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4]$.

oduzimanje: $\tilde{A} - \tilde{B} = [a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1]$.

množenje: $\tilde{A} * \tilde{B} = [\min(T_1), \min(T_2), \max(T_3), \max(T_4)]$, gde su

$$T_1 = [a_1 * b_1, a_1 * b_2, a_1 * b_3, a_1 * b_4],$$

$$T_2 = [a_2 * b_2, a_2 * b_3],$$

$$T_3 = [a_3 * b_2, a_3 * b_3],$$

$$T_4 = [a_4 * b_1, a_4 * b_2, a_4 * b_3, a_4 * b_4].$$

deljenje: $\tilde{A}/\tilde{B} = [\min(T_1), \min(T_2), \max(T_3), \max(T_4)]$, gde su:

$$T_1 = [a_1/b_1, a_1/b_2, a_1/b_3, a_1/b_4],$$

$$T_2 = [a_2/b_2, a_2/b_3],$$

$$T_3 = [a_3/b_2, a_3/b_3],$$

$$T_4 = [a_4/b_1, a_4/b_2, a_4/b_3, a_4/b_4].$$

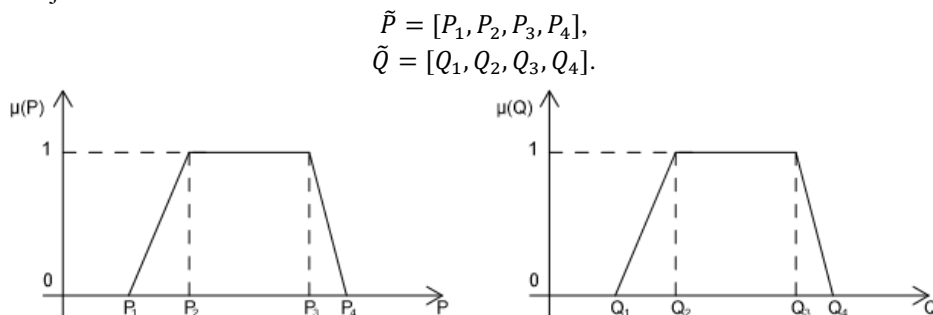
množenje skalarom: $k * \tilde{A} = [k * a_1, k * a_2, k * a_3, k * a_4]$, za $k > 0$,

$k * \tilde{A} = [k * a_4, k * a_3, k * a_2, k * a_1]$, za $k < 0$.

Treba istaći da se prilikom sabiranja i oduzimanja fuzzy brojeva predstavljenih trougaonim i trapeznim oblikom ne deformiše oblik funkcije pripadnosti zbira tj. razlike. Međutim, kod množenja i deljenja oblik funkcije pripadnosti proizvoda (količnika) odstupa od oblika funkcija pripadnosti fuzzy brojeva koji se množe (dele) i u slučaju kada dolazi do više uzastopnih množenja (deljenja) njen oblik je skoro nemoguće analitički odrediti. Iz navedenih razloga, korišćene su uprošćene formule za računanje proizvoda i količnika dva fuzzy broja na osnovu kojih se zadržava njihov oblik funkcija pripadnosti.

Matematički model

U distributivnim mrežama, snage injektiranja u mnogim čvorovima nisu poznate, već se na neki način procenjuju. Iz tih razloga pogodno ih je tretirati kao fuzzy brojeve. Aktivna i reaktivna snaga potrošnje najpogodnije se mogu predstaviti fuzzy brojevima trapeznog tipa, kao što je prikazano na Slici 1. Kako se podrazumeva da je fuzzy skup snage normalizovan, fuzzy potrošnja je određena sa četiri koordinate koje na jedinstven način definišu interval poverenja i funkciju pripadnosti. Ove četiri koordinate mogu se dosta dobro proceniti i odrediti za svaki čvor iz periodičnih merenja.



Slika 1. Fuzzy predstava aktivne i reaktivne snage potrošnje

Navedena predstava snaga fuzzy brojem može se opisati lingvističkim iskazom: Aktivna snaga čvora najverovatnije se nalazi u granicama od P_2 do P_3 , a sigurno je veća od P_1 i manja od P_4 . Reaktivna snaga čvora najverovatnije se nalazi u granicama od Q_2 do Q_3 , a sigurno je veća od Q_1 i manja od Q_4 .

Distribuiranu aktivnu proizvodnju iz vetra moguće je takođe predstaviti pomoću fuzzy broja čija funkcija pripadnosti ima oblik pravouglog trapeza, kao što je prikazano na Slici 2. Razlog za usvajanje ovakvog modela proizvodnje je činjenica da je najveća verovatnoća da će snaga proizvodnje biti jednaka nominalnoj snazi agregata.

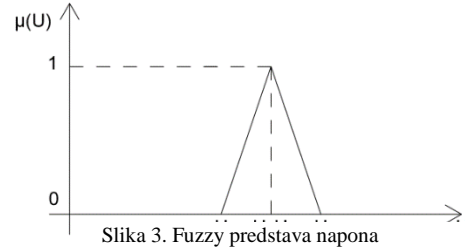
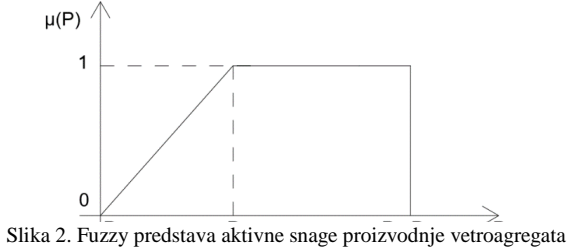
$$\tilde{P}_w = [0, P_{w2}, P_{wnom}, P_{wnom}].$$

Nagib linearnog dela funkcije pripadnosti na početnom delu intervala poverenja zavisi od profila vetra i tipa vetroagregata i to će biti razmatrano u nastavku rada.

Napon u čvorovima mreže se može tretirati kao fuzzy broj sa funkcijom pripadnosti trougaonog tipa, pri čemu je i ona definisana sa četiri koordinate zbog zakonitosti operacija nad fuzzy brojevima:

$$\tilde{U} = [U_1, U_n, U_n, U_4]$$

Fuzzy predstava napona je ilustrovana na Slici 3.



Iterativni postupak

Nakon odeđivanja fuzzy brojeva kojima se predstavljaju snage potrošnje i distribuirane proizvodnje i napona napojne tačke distributivne mreže, kao i parametara mreže koji se tretiraju kao determinističke vrednosti, moguće je započeti fuzzy iterativni postupak za proračun tokova snaga i napona u radijalnoj distributivnoj mreži. Postupak se sastoji od 6 koraka:

1. Polazi se od pretpostavke da su naponi u svim čvorovima mreže jednaki naponu napojne tačke:

$$\tilde{U}_{Ri}^0 = \tilde{U}_{nt},$$

$$\tilde{U}_{Ii}^0 = \tilde{0}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

gde n predstavlja broj čvorova u distributivnoj mreži. Indeksi R i I označavaju realnu i imaginarnu komponentu napona.

2. Vršiti se proračun struja potrošnje i distribuirane proizvodnje iz vetra u svakom čvoru mreže. Ove struje se definišu sa dva fuzzy broja, koja odgovaraju aktivnoj i reaktivnoj komponenti struje:

$$\tilde{I}_{Ri}^{(k)} = \frac{\tilde{P}_{di} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} + \tilde{Q}_{di} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)}}{\tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} + \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)}},$$

$$\tilde{I}_{Ii}^{(k)} = \frac{\tilde{P}_{di} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)} - \tilde{Q}_{di} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)}}{\tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} + \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)}},$$

$$\tilde{I}_{Ri}^{(k)} = \frac{\tilde{P}_{pi} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} + \tilde{Q}_{pi} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)}}{\tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} + \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)}},$$

$$\tilde{I}_{Ii}^{(k)} = \frac{\tilde{P}_{pi} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)} - \tilde{Q}_{pi} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)}}{\tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ri}^{(k-1)} + \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)} \cdot \tilde{U}_{Ii}^{(k-1)}},$$

za $i = 1, 2, \dots, n$. Prva dva člana definišu struju potrošnje, a druga dva člana struju proizvodnje. Indeks k označava korak iteracije.

3. (korak unazad) Bazira se na I Kirhofovom zakonu. Polazeći od završnih čvorova i krećući se unazad ka napojnom čvoru, izračunavaju se struje kroz svaku od grana mreže:

$$\tilde{J}_{Ri}^{(k)} = \tilde{I}_{Ri}^{(k)} - \tilde{I}_{Ri}^{(k)} + \sum R_e,$$

$$\tilde{\square}_{\square\square}^{(\square)} = \tilde{\square}_{\square\square}^{(\square)} - \tilde{\square}_{\square\square}^{(\square)} + \sum \square_{\square},$$

gde $\sum_{r \in \Omega_i}$ i $\sum_{s \in \Omega_i}$ označavaju realne i imaginarne komponente struja koje ističu iz prijemnog čvora grane i .

4. (korak unapred) Polazeći od napojnog čvora računa se napon svakog sledećeg čvora u mreži pomoću relacija:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{rs}^{(i)} &= \tilde{v}_{rs}^{(i)} - \tilde{v}_{rs}^{(i)} \cdot \Omega_{rs} + \tilde{v}_{rs}^{(i)} \cdot \Omega_{rs}, \\ \tilde{v}_{rs}^{(i)} &= \tilde{v}_{rs}^{(i)} - \tilde{v}_{rs}^{(i)} \cdot \Omega_{rs} - \tilde{v}_{rs}^{(i)} \cdot \Omega_{rs}. \end{aligned}$$

Indeksi r i s označavaju prijemni i predajni kraj grane i .

5. Napon u svim čvorovima se modifikuje u skladu sa sledećim relacijama:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{rs}^{(i)} &= \tilde{v}_{rs}^{(i)} - \Omega_{rs} \tilde{v}_{rs}^{(i)} + \Omega_{rs} \tilde{v}_{rs}^{(i)}, \\ \tilde{v}_{rs}^{(i)} &= \Omega_{rs} \tilde{v}_{rs}^{(i)}, \end{aligned}$$

za $i = 1, 2, \dots, n$.

Na ovaj način se postiže da oblik funkcije pripadnosti fuzzy broja koji reprezentuje realnu komponentu napona čvora i bude indentičan obliku fuzzy broja napona napojne tačke, dok imaginarna komponenta napona dobija determinističku vrednost.

6. Koraci od 2-5 se ponavljaju sve dok ne bude zadovoljen kriterijum konvergencije:

$$\max \left\{ \left| \Omega_{rs} \tilde{v}_{rs}^{(i)} - \Omega_{rs}^{(l)} \tilde{v}_{rs}^{(i-l)} \right| \right\} < \epsilon.$$

DIFERENCIJALNA EVOLUCIJA

Veliki broj proračuna u elektroenergetskom sistemu zahteva globalnu optimizaciju. Kod određenog broja praktičnih problema objektivne funkcije nisu diferencijabilne, neprekidne, linearne, već su višedimenzionalne su sa velikim brojem lokalnih ekstremuma i sa velikim brojem ograničenja. Takve probleme je nemoguće analitički rešiti, te se prelazi na pretraživačke metaheurističke metode koje daju približno optimalno rešenje, što je dovoljno za inženjerske potrebe. Jedna od takvih metoda je i diferencijalna evolucija.

Algoritam diferencijalne evolucije počinje formiranjem početne populacije. Početnu populaciju je potrebno što ravnomernije rasporediti po prostoru pretrage. Neophodno je uniformnom raspodelom formirati N_p vektora x_k (svaki sa po n upravljačkih promenljivih), gde N_p predstavlja broj članova jedne populacije u jednoj generaciji, a $k \in [1, \dots, N_p]$ predstavlja tekući indeks.

Kada se formira početna populacija prelazi se na formiranje naredne generacije. Svaki vektor x_k trenutne populacije će tačno jednom biti izabran za ciljni vektor i učestvovaće u procesu stvaranja vektora x_{knovo} u novoj generaciji. Za svaki ciljni indeks k jedne generacije formira se mutirani vektor v_k i to prema sledećem pravilu:

$$v_k = \Omega_{i1} - F \cdot (\Omega_{i2} - \Omega_{i3}),$$

gde su Ω_{i1} bazni, a Ω_{i2} i Ω_{i3} diferencijalni proizvoljno izabrani vektori iz trenutne populacije. $F \in [0, 2]$ i naziva se faktor skaliranja. Dalje se pomoću ciljnog vektora x_k i mutiranog vektora v_k kreira probni vektor u_k . Prvo je potrebno odabrati jednu upravljačku promenljivu koja će se direktno iz mutiranog vektora v_k sa proizvoljne pozicije Ω prebaciti u probni vektor u_k na poziciju Ω . Na ostale elemente se primenjuje uniformno ukrštanje prema sledećem pravilu:

$$u_k(l) = \begin{cases} \Omega_{\Omega}(l), & \text{ako je } \Omega_{\Omega}(l) < \Omega_{\Omega} \text{ ili } \Omega \neq \Omega \\ \Omega_{\Omega}(l), & \text{ako je } \Omega_{\Omega}(l) > \Omega_{\Omega} \text{ ili } \Omega = \Omega \end{cases}$$

Konačno, prelazi se na eliminacionu selekciju gde se vrši izbor između ciljnog vektora x_k i probnog vektora u_k , tj. u narednu generaciju prolazi samo onaj vektor koji ima bolju vrednost objektivne funkcije. U slučaju traženja minimuma objektivne funkcije važi sledeće pravilo:

$$x_{knovo} = \begin{cases} \Omega_{\Omega}, & \text{ako je } \Omega(\Omega_{\Omega}) < \Omega(\Omega_{\Omega}) \\ \Omega_{\Omega}, & \text{ako je } \Omega(\Omega_{\Omega}) > \Omega(\Omega_{\Omega}) \end{cases}$$

Navedeni postupak se ponavlja za svaki član jedne populacije k . Formiraju se nove generacije sve dok ne bude zadovoljen kriterijum konvergencije.

Pri rešavanju realnog optimizacionog problema metodom diferencijalne evolucije javljaju se: ograničenjatipa jednakosti, ograničenja tipa nejednakosti i ograničenja upravljačkih promenljivih. Prvi tip ograničenja u

analiziranom problemu se ne pojavljuje, dok je za drugi tip ograničenja korišćena metoda penalizacije, gde se u slučaju narušavanja ograničenja na izračunate vrednosti objektivne funkcije $\square(\square_{\square})$ i $\square(\square_{\square})$ dodaje penal.

Pri formiranju probnog vektora u_k može se desiti da neka upravljačka promenljiva ispadne iz definisanog opsega. U tom slučaju primenjuje se metoda povratka sa granice kod koje se vrednost upravljačke promenljive zamenjuje validnom vrednošću, koja se bira proizvoljno između ograničenja koje je narušeno i vrednosti upravljačke promenljive baznog vektora. Algoritam diferencijalne evolucije prikazan je na Slici 4.

Pri definisanju vektora nepoznatih x_k , upravljačke promenljive su snage proizvodnje vetroelektrane i čvorovi u kojima se one priključuju. Snaga proizvodnje u tom slučaju je deterministička vrednost, a za računanje objektivne funkcije $\square(\square_{\square})$ primenom fuzzy tokova snaga potrebna je njena fuzzy predstava čija će defazifikovana vrednost biti jednaka determinističkoj vrednosti snage proizvodnje.

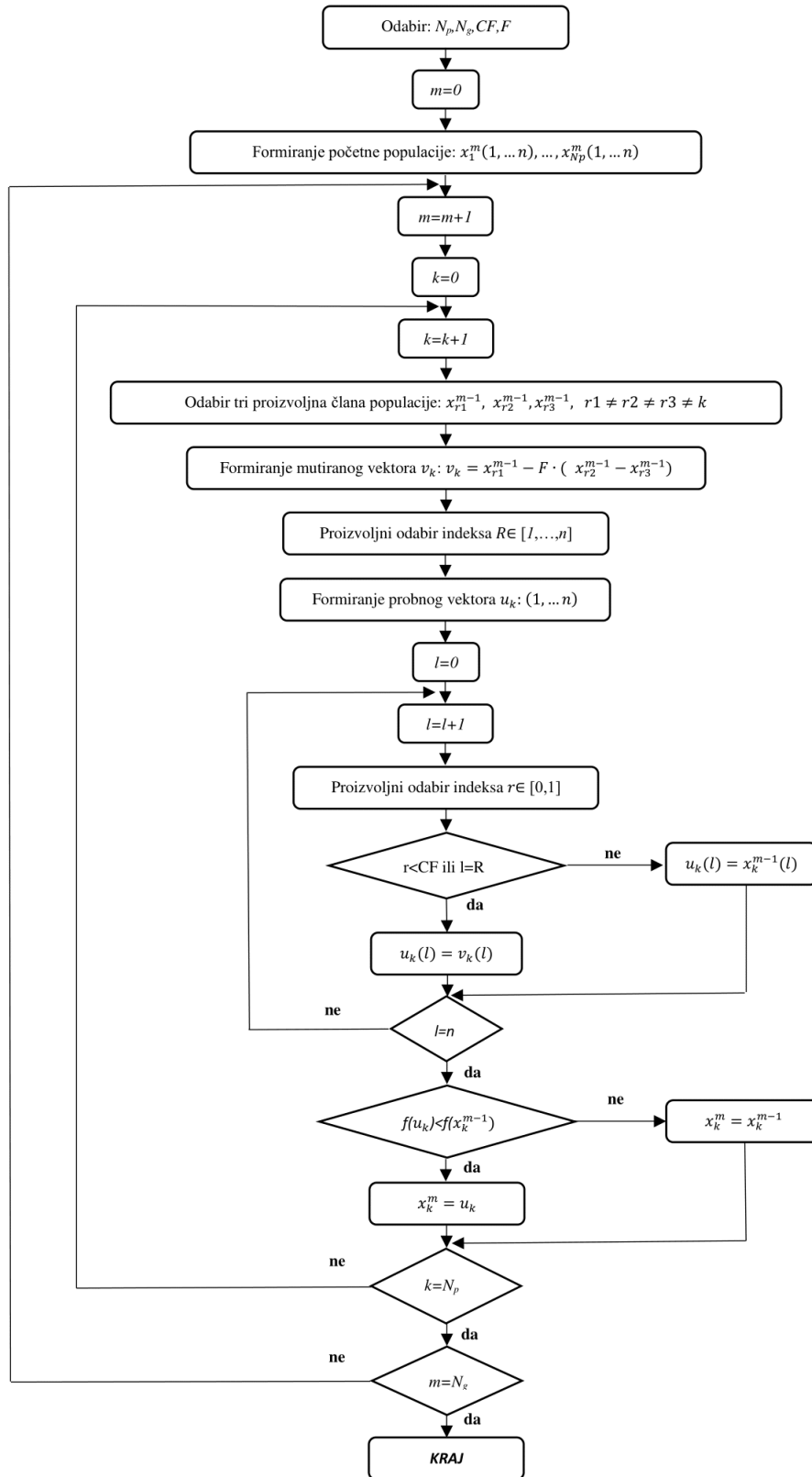
Već je napomenuto da se proizvodnja iz vetra može aproksimativno predstaviti fuzzy brojem čija funkcija pripadnosti ima oblik pravouglog trapeza. Oblik pravouglog trapeza zavisi od profila vetra i tipa vetroagregata. Ukoliko su dati parametri poznati na nekoj lokaciji, moguće je odrediti histogram proizvodnje jednog vetroagregata, a na osnovu njega trapez kojim se najpogodnije može predstaviti proizvodnja. Povećanjem broja vetroagregata u okviru jedne vetroelektrane interval poverenja fuzzy snage proizvodnje se širi (trapez se razvlači po x osi), pri čemu relativni odnos između njenih koordinata ostaje isti. Polazeći od relacije:

$$\text{defuzzy}(\tilde{P}_w) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \mu_{\tilde{P}_w}(x) \cdot dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{P}_w}(x) \cdot dx},$$

izvodi se formula za fuzzy proizvodnju vetroelektrane:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_w &= [0, b, k \cdot b, k \cdot b], \\ b &= \frac{\text{defuzzy}(\tilde{P}_w) \cdot (6k - 3)}{3k^2 - 1}. \end{aligned}$$

k predstavlja koeficijent koji definiše oblik trapeza i može se odrediti ukoliko je poznat profil vetra i tip vetroagregata.



Slika 4. Algoritam diferencijalne evolucije

SIMULACIJE I REZULTATI

Razmatra se radijalna distributivna test mreža sa 33 čvora od kojih je jedan napojni i 32 potrošačka čvora (IEEE-33-bus). Na Slici 7. je prikazana konfiguracija mreže kao i notacija pojedinih čvorova i grana. Podaci o mreži i ograničenja struja po granama su dati u Tabeli 1, dok su fuzzy aktivne i reaktivne snage potrošnje, zadate sa četiri koordinate, date u Tabeli 2.

TABELA 1- PODACI O MREŽI

Broj grane	Indeks prvog čvora	Indeks drugog čvora	R[Ω]	X[Ω]	J _{max} [A]
1	0	1	0.0922	0.0477	394.95
2	1	2	0.493	0.2411	315.96
3	2	3	0.366	0.1864	157.98
4	3	4	0.3811	0.1941	157.98
5	4	5	0.819	0.707	157.98
6	5	6	0.1872	0.6188	157.98
7	6	7	1.7114	1.2351	157.98
8	7	8	1.03	0.74	157.98
9	8	9	1.04	0.74	157.98
10	9	10	0.1966	0.065	157.98
11	10	11	0.3744	0.1238	157.98
12	11	12	1.468	1.155	157.98
13	12	13	0.5416	0.7129	157.98
14	13	14	0.591	0.526	157.98
15	14	15	0.7463	0.545	157.98
16	15	16	1.289	1.721	157.98
17	16	17	0.732	0.574	157.98
18	5	25	0.203	0.1034	157.98
19	25	26	0.2842	0.1447	157.98
20	26	27	1.059	0.337	157.98
21	27	28	0.8042	0.7006	157.98
22	28	29	0.5275	0.2585	157.98
23	29	30	0.9744	0.963	157.98
24	30	31	0.3105	0.3619	157.98
25	31	32	0.341	0.5302	157.98
26	2	22	0.4512	0.3083	236.97
27	22	23	0.898	0.7091	236.97
28	23	24	0.896	0.7011	236.97
29	1	18	0.146	0.1565	157.98
30	18	19	1.5042	1.3554	157.98
31	19	20	0.4095	0.4784	157.98
32	20	21	0.7089	0.9373	157.98

TABELA 2 – FUZZY AKTIVNE I REAKTIVNE SNAGE POTROŠNJE

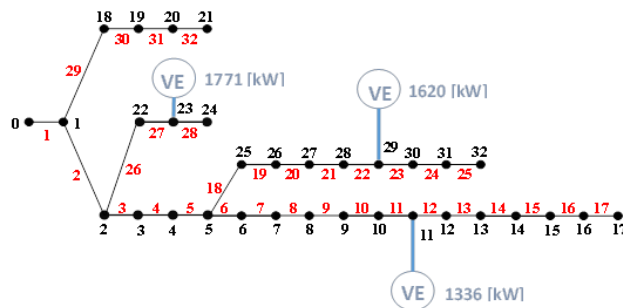
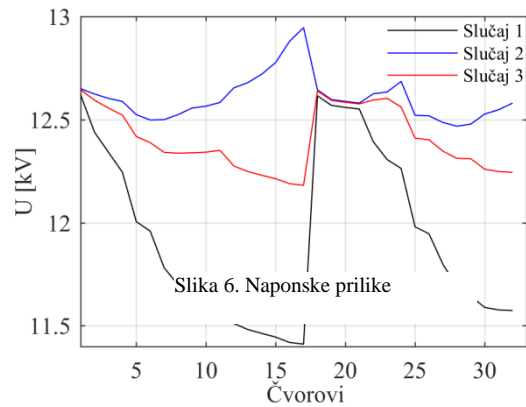
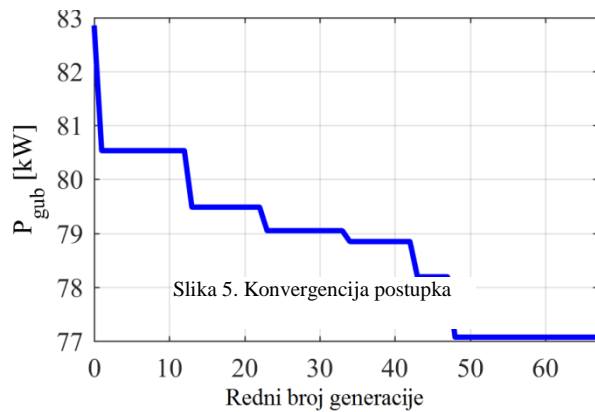
Broj čvora	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	P ₃ [kW]	P ₄ [kW]	Q ₁ [kvar]	Q ₂ [kvar]	Q ₃ [kvar]	Q ₄ [kvar]
1	85	90	110	115	51	54	66	69
2	76.5	81	99	103.5	34	36	44	46
3	102	108	132	138	68	72	88	92
4	51	54	66	69	25.5	27	33	34.5
5	51	54	66	69	17	18	22	23
6	170	180	220	230	85	90	110	115
7	170	180	220	230	85	90	110	115
8	51	54	66	69	17	18	22	23
9	51	54	66	69	17	18	22	23
10	38.25	40.5	49.5	51.75	25.5	27	33	34.5
11	51	54	66	69	29.75	31.5	38.5	40.25
12	51	54	66	69	29.75	31.5	38.5	40.25
13	102	108	132	138	68	72	88	92
14	51	54	66	69	8.5	9	11	11.5
15	51	54	66	69	17	18	22	23
16	51	54	66	69	17	18	22	23
17	76.5	81	99	103.5	34	36	44	46
18	76.5	81	99	103.5	34	36	44	46
19	76.5	81	99	103.5	34	36	44	46
20	76.5	81	99	103.5	34	36	44	46
21	76.5	81	99	103.5	34	36	44	46
22	76.5	81	99	103.5	42.5	45	55	57.5
23	357	378	462	483	170	180	220	230
24	357	378	462	483	170	180	220	230
25	51	54	66	69	21.25	22.5	27.5	28.75
26	51	54	66	69	21.25	22.5	27.5	28.75
27	51	54	66	69	17	18	22	23
28	102	108	132	138	59.5	63	77	80.5
29	170	180	220	230	510	540	660	690
30	127.5	135	165	172.5	59.5	63	77	80.5
31	178.5	189	231	241.5	85	90	110	115
32	51	54	66	69	34	36	44	46

Naznačeni napon mreže je 12.66 kV, a bazna snaga 10 MVA. Minimalni i maksimalni dozvoljeni napon iznose 11.394 kV i 13.926 kV, respektivno. Napon u napojnoj tački je zadat kao trougaoni fuzzy broj sa koordinatama (12.027,12.66,12.66,13.293)kV. Razmatra se priključenje tri vetroelektrane, i pritom se uzima da je ograničenje defazifikovane snage jedne vetroelektrane 1200kW. Potrebno je pronaći čvorove u kojima je potrebno izvršiti integraciju vetroelektrana, kao i instalisanu snagu svake od njih, kako bi gubici u distributivnoj mreži bili minimalni. Usvajena su tri različita profila vetra u zavisnosti od toga u kom čvoru se razmatra priključenje. Čvorovi od 1 do 17 pripadaju jednoj grupi (k=2), od 18 do 28 drugoj grupi (k=1) i čvorovi od 29 do 32 trećoj grupi čvorova (k=3).

Usvajeni su sledeći parametri diferencijalne evolucije: CF=0.5 i F=0.8. Populacija se sastoji od 60 članova. Svaki član populacije se sastoji od 6 koordinata (3 snage i 3 čvora). Vrš se proračun za 100 generacija (iteracija) uz uslov prekidanja postupka ukoliko se najbolje rešenje iz generacije u generaciju ponovi 20 puta. Ograničenje upravljačkih promenljivih pored defazifikovane snage vetroelektrane (0-1200 kW) predstavlja i opseg čvorova (1-32). U slučaju narušavanja ograničenja upravljačkih promenljivih primenjuje se metoda povratka sa granice, a u slučaju narušavanja ograničenja po naponu ili struji primenjuje se penalizacija.

Postupak optimizacije je obustavljen nakon 67 generacija usled ispunjenja uslova za prekidanje postupka. Na Slici 5. je prikazan dijagram konvergencije optimalnog rešenja. Optimalna raspodela defazifikovanih/instaliranih snaga vetroelektrana je: 817 kW/1336 kW u čvoru 11, 1181 kW/1771 kW u čvoru 23 i 936 kW/1620 kW u čvoru 29 i to je ilustrovano na Slici 7. Gubici aktivne snage u mreži iznose 77.1 kW, što je za oko 66% manje nego pri baznom

stanju kada su gubici 221.8 kW. Radi pokazivanja optimalnosti dobijenog rešenja, razmatraće se još i proizvoljno izabrana kombinacija, gde se u čvorovima 17, 24 i 32 ima defazifikovana snaga vetroelektrana od po 1200 kW. U tom slučaju se imaju gubici 131.6 kW. Na Slici 6. su date naponske prilike u sva tri analizirana slučaja (bazno stanje, proizvoljna raspodela i optimalna raspodela, respektivno).



Slika 7. Optimalna raspodela lokacija i instalisanih snaga vetroagregata

ZAKLJUČAK

Izvršena je optimizacija mesta i veličina priključenih vetroelektrana korišćenjem diferencijalne evolucije, gde je za računanje objektivne funkcije korišćen fuzzy proračun tokova snaga i naponskih prilika. Rezultatima je pokazano da distribuirano generisanje može povoljno uticati na smanjenje gubitaka aktivne snage i na poboljšanje naponskih prilika. Analizirani su različiti slučajevi sa i bez distribuiranog generisanja. Na osnovu rezultata se vidi da je od velikog značaja za distributivno preduzeće u kojim tačkama će se izvršiti integracija obnovljivih izvora, jer se gubici aktivne snage direktno oslikavaju na troškove.

LITERATURA

1. Rajaković N, Tasić D, 2008, "Distributivne i industrijske mreže", "Akademska misao", pp. 135-141
2. Salam A, Malik O, 2011, "Electric Distribution System", "A John Wiley & Sons, inc., Publication", pp. 33-63
3. Storm R, Price K, 1996, "Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by Differential Evolution", proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Nagoya, Japan
4. Price K, Storm R, Lampinen J, 2005, "Differential Evolution – A practical approach to global optimization", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, 1st edn.

5. Hamida I, Salah S, Mshali F, Faouzi M, 2016, "Optimal Integration of Solar Distributed Generations in Distribution Network using SPEA2", "17th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering", pp. 368-373