

METODE ZA OPTIMALNO PLANIRANJE DISTRIBUIRANIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE

S. Stanić, Elektronski fakultet u Nišu, Republika Srbija

1. UVOD

U poslednjih 50-ak godina razvijeni su savremeni elektroenergetski sistemi koji se oslanjaju na tkz. centralizovanu proizvodnju električne energije, visokonaponskom prenosnom sistemu za transport energije na velike udaljenosti i sredjenaponskom i niskonaponskom distributivnom sistemu kojim se električna energija isporučuje krajnjim potrošačima. U poslednjih 20-ak godina u svetu je zapažen porast proizvodnje električne energije iz distribuiranih (decentralizovanih) izvora. Do toga je došlo zbog uticaja međunarodnih zajednica na smanjenje emisije štetnih gasova, povećanje efikasnosti i održivosti energetske sistema širom sveta, procesa deregulacije i restrukturiranja elektroprivreda Dizdarević, Majstorović i Žutobradić [1].

Ideja koja stoji iza distribuirane proizvodnje je ta da se generiše deo potrebne električne energije upotrebom malih generatorskih sistema koji se priključuju na distributivnu mrežu ili direktno na potrošače u mreži. Ovime se postižu određeni tehnički, ekonomski i ekološki benefiti koji se mogu maksimizovati korišćenjem određenih kriterijuma, ograničenja i matematičkih metoda za optimalno postavljanje distribuiranih izvora električne energije. Gledano sa strane upravljanja operatora mreže, distribuirane izvore možemo podeliti na upravljive (dispatchable) i neupravljive (nondispatchable). Kod upravljivih distribuiranih izvora mogu se regulisati veličine na izlazu kod neupravljivih ne. Tako su upravljivi izvori pogodniji za distributivne mreže i u nastavku rada će se uzimati u obzir optimalno planiranje upravljivih distribuiranih izvora Hung, Mithulanathan i Lee [2].

U radu su najpre definisane kriterijumske funkcije kojima se maksimizuje korist distribuirane proizvodnje. Zatim je dat pregled ograničenja koja se moraju poštovati pri optimalnom planiranju DG. Pri kraju su dati matematički metodi za rešavanje problema optimalnog planiranja distribuiranih izvora i zaključak u kome je dat i kratak osvrt na optimalno planiranje distributivnih izvora električne energije u Srbiji. Korišćena literatura specificirana je na samom kraju rada.

2. KRITERIJUMSKE FUNKCIJE ZA OPTIMALNO PLANIRANJE

Kriterijumske funkcije nam daju cilj koji želimo da postignemo ugradnjom distribuiranog generatora (DG). To se postiže minimizacijom ili maksimizacijom kriterijumske funkcije uz uvažavanje ograničenja tipa jednakosti ili nejednakosti o kojima će kasnije biti više reči. U nastavku su date najčešće kriterijumske funkcije koje su mahom predstavljene u Payasi i Singh [3].

2.1. Jednokriterijumske funkcije

Ove kriterijumske funkcije uzimaju u obzir samo jedan kriterijum (cilj) pri optimalnom planiranju DG. U literaturi [3] su dati primeri minimizacije gubitaka po vodovima, maksimizacije kapaciteta distribuiranih izvora i maksimizacije društvene koristi i profita.

- **Minimizacija gubitaka po vodovima.** Cilj je maksimizovati korist od ugradnje DG minimizovanjem aktivnih gubitaka snage po vodovima. U literaturi [3] se sreću nekoliko pristupa za modelovanje kriterijumske funkcije. Najjednostavniji pristup je sumiranje svih injektiranih snaga u čvorovima mreže i smatrati ih gubicima:

$$f = \sum_{i=1}^n P_i , \quad (1)$$

gde je P_i snaga injektirana u čvor i , a n ukupan broj čvorova mreže. Cilj je minimizovati datu kriterijumsku funkciju. Drugi pristup uvažava cenu gubitaka energije sumiranjem tih cena za sve potrošače:

$$f = K_e \sum_{i=0}^{nl} T^i P_{loss}^i , \quad (2)$$

gde je nl broj potrošača, K_e cena gubitaka a P_{loss}^i gubici snage i -tog potrošača tokom vremenskog perioda T_i .

Optimalna lokacija DG u čvoru j je data sledećom kriterijumskom funkcijom:

$$f_j = \sum_{i=1}^{j-1} R_{1i}(j) |S_{Li}|^2 + \sum_{i=j+1}^N R_{1i}(j) |S_{Li}|^2 \quad j = 2,3, \dots, N, \quad (3)$$

gde je $R_{1i}(j)$ ekvivalentna otpornost između čvora 1 i čvora i pri čemu je DG smešten u čvor $j \neq 1$. S_{Li} je kompleksna snaga.

$$R_{1i}(j) = \begin{cases} \text{Real}(Z_{11} + Z_{ii} - 2Z_{1i}), & i < j \\ \text{Real}(Z_{11} + Z_{(i-1)(i-1)} - 2Z_{1(i-1)}), & i > j \end{cases} \quad (4)$$

gde su R_{11} , R_{ii} i R_{1i} odgovarajući elementi matrice impedansi. Ukoliko je DG lociran u čvoru $j=1$ tada je kriterijumska f-ja:

$$f_1 = \sum_{i=1}^N R_{1i}(j) |S_{Li}|^2 . \quad (5)$$

Glavni cilj je naći čvor m za koji kriterijumska funkcija f_j ima minimalne vrednosti:

$$f_m = \text{Min}(f_j), \quad j = 1,2, \dots, N . \quad (6)$$

Moguće je koristiti i izraz za ukupne stvarne gubitke P_L u sistemu kao [2] koji je dat sledećom jednačinom:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(P_i P_j - Q_i Q_j)] , \quad (7)$$

gde su koeficijenti α_{ij} i β_{ij} jednaki:

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), \quad \beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) . \quad (8)$$

Ostali elementi izraza P_L su: $r_{ij} + x_{ij} = z_{ij}$ elementi matrice $[Y_{bus}]$, V_i , V_j , P_i , P_j , Q_i i Q_j napon, injektirana aktivna i reaktivna snaga u čvorovima i i j , respektivno. N je broj čvorova, a δ_i i δ_j fazni stavovi napona u čvorovima i i j , respektivno.

Može se i primeniti ukupni gubici aktivne snage za određivanje mesta postavljanja DG [3]:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{nb} |B_i|^2 R_i = [R]^T [BIBC][I]^2 , \quad (9)$$

gde je R_i otpornost grane i , $[R]$ je vektor reda otpornosti grane, nb je broj grana, $BIBC$ je matrica injektiranja struja u čvorove a $[I]$ je vektor ekvivalentnih struja injektiranja za sve čvorove osim referentnog.

- **Maksimizacija kapaciteta distribuiranih izvora.** Za cilj se postavlja maksimizacija kapaciteta DG preko N čvorova pri čemu se ne smeju narušiti propisana tehnička ograničenja. Kriterijumska funkcija glasi [3]:

$$f = \sum_{i=1}^N P_{DG_i} , \quad (10)$$

gde je P_{DG_i} kapacitet DG i -tog čvora pri čemu postoji N mogućih lokacija.

Kriterijum može biti i maksimizacija broja DG priključenih na sistem [3]:

$$f = \sum_{i=1}^n (P_{Gi} + jQ_{Gi}) , \quad (11)$$

gde su P_{Gi} i Q_{Gi} aktivne i reaktivne snage injektirane u čvor i , a n je ukupan broj čvorova sa DG.

DG se može uzeti i sa negativnim opterećenjem [3]:

$$f(\psi) = \sum_{i=1}^n -C_i \times MW_i^0 (1 - \psi_i) , \quad (12)$$

gde je ψ faktor podešavanja kapaciteta DG, MW^0 je inicijelna aktivna snaga DG u relativnim jedinicama, $-C$ je vrednost kapaciteta u relativnim jedinicama MW-a kapaciteta DG, i je indeks čvor a n je broj čvorova u kojima se razmatra dodavanje kapaciteta.

Može se razmatrati i maksimizacija količine preuzete energije po ceni investicije najboljim mogućim iskorišćenjem postojećih resursa [3]:

$$J = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \frac{P_{Avail_j} Plant_{ij}^k ELF_{ij}^{k-1}}{Conn Cost_{ij} V_i^{k-1}} , \quad (13)$$

gde je P_{Avail_j} izvor energije j , $Plant_{ij}^k$ je kontrolna varijabla koja predstavlja deo P_{Avail_j} alociran i -tom čvoru u k -toj iteraciji ($0 \leq Plant_{ij}^k \leq 1$). M i N su izvori energije. $Conn Cost_{ij}$ je cena priključenja j -tog resursa energije u i -tom čvoru. ELF_{ij}^{k-1} je faktor snage j -tog izvora enegije u i -tom čvoru u $(k-1)$ iteraciji, a V_i^{k-1} (kV/MW) je osetljivost napona i -tog čvora na injektiranje snaga u ostalim čvorovima u $(k-1)$ iteraciji.

- **Maksimizacija društvene koristi i profita.** Problem je definisan preko dve kriterijumske funkcije [3]: maksimizacija društvene koristi i maksimizacija profita. Kod prvog kriterijuma, društvena korist je zapravo razlika između koristi sa strane potrošača i ukupne cene proizvodnje. Tako nju čine kvadratne funkcije benefita kupaca $B_i(P_{Di})$, minus kvadratna funkcija ponude snabdevača $C_i(P_{Di})$, minus kvadratna funkcija cene koju postavlja vlasnik DG $C(P_{DG_i})$:

$$f = \sum_{i=1}^N (B_i(P_{Di}) - C_i(P_{Di}) - C(P_{DG_i})) . \quad (14)$$

Funkcija maksimizacije profita glasi:

$$Profit_i = \lambda_i \times P_{DG_i} - C(P_{DG_i}) , \quad (15)$$

gde je P_{DG_i} snaga DI u čvoru i , λ_i lokalna marginalna cena proizvodnje čvora i nakon ubacivanja DI a $C(P_{DG_i})$ kvadratna funkcija cene DG.

2.2. Sveobuhvatna kriterijumska funkcija

Za cilj se postavlja minimizacija raznih komponenti koje se javljaju pri porastu potrošnje koju distributivna kompanija treba da zadovolji Sheidaee i Kalanter [4], [3]. U te komponente spadaju minimizacija troškova investicija i pogonskih troškova lokalnog DI, troškova kupovine dodatne energije zbog povećanja potrošnje, troškova pokrivanja gubitaka u prenosu i troškova investicije za određene scenarije. Optimalno planiranje se vrši poređenjem rezultata istraživanja distributivne kompanije kada na raspolaganju ima sledeće alternative za zadovoljenje potrošnje:

- Scenario A: kupovina dodatne energije sa glavne mreže i njeno injektiranje u odgovarajuću distributivnu mrežu posredstvom konektivnih transformatorskih stanica. Ovde se mogu javiti dodatni troškovi kao što su

proširenja i nadogradnje postojećih transformatorskih stanica ili nadogradnja fidera ukoliko su narušena njihova termička ograničenja.

- Scenario B: kupovina dodatne energije od već postojeće mreže i njeno dostavljanje odgovarajućoj distributivnoj mreži. Ovde se mogu javiti dodatni troškovi u smislu nadogradnje fidera kako ne bi došlo do preopterećenja.
- Investiranje u lokalni DG: ovom alternativom za rešavanje problema planiranja distributivnog sistema preispituje se upotreba prethodna dva scenarija

Kriterumska funkcija izgleda ovako [3], [4]:

$$J = \sum_{i=1}^N C_{fi}(S_{DGi}^{Max} + BK)\sigma_{DGi} + 8760 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \beta^t C_{ri} S_{DGi} + 8760 \sum_{t=1}^T \beta^t \sum_{i=1}^{TN} M \sum_{j=1}^{TU} \frac{\Delta V_{ij}^2}{|Z_{ij}|} pf C_e + C_A + C_B, \quad (16)$$

gde je funkcija troškova scenarija A data sa:

$$C_A = \sum_{i=1}^{SS} \sum_{u=1}^{TU} C_{iu} \sigma_{iu} + \sum_{i=1}^{TN} \sum_{j=1}^M C_{ij} \sigma_{ij} + 8760 \sum_{t=1}^T \beta^t \sum_{i=1}^{TU} pf C_e S_{iu} \sigma_{iu}, \quad (17)$$

a funkcija troškova scenarija B data sa:

$$C_A = \sum_{i=1}^{TN} \sum_{j=1}^M C_{ij} \sigma_{ij} + 8760 \sum_{t=1}^T \beta^t \sum_{i=1}^{TU} pf C_{int}(S_{int}) S_{int} \sigma_{int}(S_{int}), \quad (18)$$

i gde je koeficijent β factor svodenja na sadašnju vrednost i dat je sa:

$$\beta^t = \frac{1}{(1+d)^t}. \quad (19)$$

Ostali koeficijenti kriterijumske funkcije J su: BK rezervni kapacitet DG [MVA], d kamatna stopa, C_f cena investicija [\$/MVA], C_r cena pogona sistema [\$/MVA], C_e tržišna cena električne energije [\$/MWh], C_{ij} cena fidera od čvora i do čvora j [\$], C_{iu} cena novog transformatora u postojećoj TS [\$], C_{int} cena električne energije postojeće mreže [\$/MWh], S_{DG} snaga generisana od strane DG [MVA], S_{int} snaga injektirana od strane postojeće mreže [MVA], C_{iu} snaga transformatora u u TS i [MWh], M broj potrošačkih čvorova, SS broj TS, TU ukupan broj transformatora u TS-ma, T vreme planiranja (godina), TN ukupan broj čvorova, Z_{ij} impedansa fidera između čvorova i i j [Ω], pf faktor snage sistema, sa σ su dati koeficijenti odgovarajućih komponenti, S_{DG}^{max} limit snage DG [MVA].

U drugom slučaju, stavlja se akcenat na minimizaciju troškova gubitaka snage i troškova potrebne reaktivne snage [3]. Kriterijumska funkcija ima sledeći oblik:

$$f(x) = k_p P_0(z_0) + k_e \sum_{i=0}^n k_i P_i(z_i) + k_q \sum_{l \in I_q} |q_l|, \quad (20)$$

$$z = [z_0^t, z_1^t, \dots, z_n^t]^t, \quad (21)$$

gde su k_p , k_e i k_q koeficijenti gubitaka snage, cene goriva i cene reaktivnih izvora respektivno. T_i predstavlja vreme tokom koga je potrošnja na nivou i , a P_i je snaga gubitaka na nivou potrošnje i . q_i su snage reaktivnih izvora koji mogu biti pozitivni ili negativni. N je broj nivoea potrošnje.

Sreće se i formulacija u kojoj se uzima u obzir korist DG na smanjenje gubitaka u sistemu. Razlikuju se kriterijumske funkcije za DG koji je u vlasništvu distributivne kompanije i koji je u privatnom vlasništvu [3]. Tako u slučaju DG u vlasništvu distributivne kompanije imamo sledeću kriterijumsku funkciju:

$$J_1 = \sum_{i=1}^s \rho^P P_{Gi} + \sum_{i=1}^s \rho^Q Q_{Gi} + \sum_{i=1}^g (A_i P_{DG_i}^2 + B_i P_{DG_i} + C_i) + \sum_{i=1}^g Q_{DG_i} GCST_i^Q - \sum_{i=1}^g \alpha_i^{loss} \Delta P_i - \sum_{i=1}^g \beta_i^{loss} \Delta Q_i, \quad (22)$$

gde prvi član predstavlja cenu kupljene aktivne snage sa mreže, drugi član označava cenu kupljene reaktivne snage sa mreže. Treći član se odnosi na troškove pogona DG za snabdevanje aktivnom snagom (kvadratna funkcija po odatoj snazi DG), a četvrti član daje troškove pogona za snabdevanje reaktivnom snagom. Poslednja dva člana se odnose na ostvarenu korist (uštedu) distributivne kompanije zbog povećanja proizvodnje aktivne i reaktivne snage DG:

$$\Delta P_{DG_i} = P_{DG_i} - P_{DG_i}^* \quad i \in g, \quad (23)$$

$$\Delta Q_{DG_i} = Q_{DG_i} - Q_{DG_i}^* \quad i \in g. \quad (24)$$

U ostale elemente prikazanih jednačina spadaju: g broj čvorova sa DG, s je broj čvorova distributivne mreže, P_{DG}^* i Q_{DG}^* su optimalna aktivna i reaktivna snaga DG.

Ukoliko je DG u privatnom vlasništvu postavlja se slična kriterijumska funkcija kao kod J_1 ali da se treći član (troškovi pogona DG za snabdevanje aktivnom snagom) zameni troškovima distributivne kompanije za kupovinu energije od privatnog vlasnika DG:

$$J_2 = \sum_{i=1}^s \rho^P P_{Gi} + \sum_{i=1}^s \rho^Q Q_{Gi} + \sum_{i=1}^g \tau_i P_{DGi} + \sum_{i=1}^g Q_{DGi} GCST_i^Q - \sum_{i=1}^g \alpha_i^{loss} \Delta P_i - \sum_{i=1}^g \beta_i^{loss} \Delta Q_i . \quad (25)$$

2.3. Multikriterijumske funkcije

Ovaj koncept se koristi za bolje planiranje sistema distribuirane proizvodnje jer objedinjuje više kriterijuma u cilju dobijanja kompromisnog rešenja. Ovime se planeru ostavlja zadatak da na osnovu iskustva odabere najbolje moguće rešenje iz grupe rešenja. U nastavku su dati neki primeri kriterijumskih funkcija koji se sreću u [3]. Minimizacija kriterijumske funkcije može se izvršiti minimizacijom više funkcija:

$$\text{Min } C(X(U)) = \text{Min}[C_u, C_L, C_{ENS}, C_E] , \quad (26)$$

gde su funkcije C_u cena nadogradnje mreže, C_L cena gubitaka energije, C_{ENS} cena energije koja nije dostavljena, C_E cena kupljene energije. Mogu se koristiti razne funkcije, kao na primer gubici energije F_1 , naponski profil F_2 i kvalitet energije F_3 :

$$\text{Min } C(X(U)) = \text{Min}[F_1, F_2, F_3] . \quad (27)$$

U literaturi se ugradnja DG vrednuje određenim indeksima tehničkih problema sistema, tj. uticajem DG na otklanjanje tih tehničkih problema. Tu spadaju indeks gubitaka aktivne snage (ILP), indeks gubitaka reaktivne snage (ILQ), indeks pada napona (IVD), indeks regulacije napona (IVR), indeks kapaciteta struje u vodovima (IC), indeks struje 3-f kratkog spoja (ISC_3) i indeks struje jednofaznog zemljospoja (ISC_1).

$$IMO = w_1 ILP + w_2 ILQ + w_3 IVD + w_4 IVR + w_5 IC + w_6 ISC_3 + w_7 ISC_1 , \quad (28)$$

gde je w_i težinski faktor pojedinih indeksa (ukupno ima NI indeksa) za koji važi:

$$\sum_{i=1}^{NI} w_i = 1 , \quad w_i \in [0,1] . \quad (29)$$

Može se razmatrati i maksimalni benefit od ugradnje DG ($MBDG$) preko poboljšanja naponskog profila (VPI), povećanja rotacione rezerve (SRI), redukcije tokova snaga po granama (PFR) i smanjenja gubitaka po granama (LLR). Svaka od pomenutih komponenta ima svoju težinu pa je kriterijumska funkcija data sa:

$$MBDG = w_1 VPI\% + w_2 SRI\% + w_3 PFR\% + w_4 LLR\% . \quad (30)$$

Cilj može biti i minimizacija penalizacije narušavanja nekih od ograničenja sistema. Penalizacija se ostvaruje postavljanjem penala ili težinskih faktora uz svako moguće prekoračenje:

$$\text{Min } f = W_{load} S_c + W_{IV} I_V + W_{VV} V_V + W_{TV} S_{TV} , \quad (31)$$

gde je S_c potrošnja koja je ostala bez napajanja zbog potencijalnog prekoračenje ograničenja sistema, V_V prekoračenje napona čvora, I_V prekoračenje struje grane, S_{TV} prekoračenje limita opterećenja transformatora.

3. OGRANIČENJA KRITERIJUMSKIH FUNKCIJA

Kriterijumske funkcije koje su opisane u poglavlju 2. treba minimizovati ili maksimizovati kako bi se operaciono stanje držalo u propisanim granicama. U tu svrhu se definišu ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti. U nastavku će biti opisane ove dve grupe ograničenja [3].

3.1. Ograničenja tipa jednakosti

Ograničenja tipa jednakosti se najčešće odnose na uspostavljanje i održanje energetskog balansa aktivnih i reaktivnih snaga u sistemu. Tako ih možemo razvrstati na ograničenja bilansa aktivnih i reaktivnih snaga u sistemu.

- **Ograničenja bilansa aktivnih snaga.** Ovde ukupna aktivna snaga odata iz tradicionalnih izvora (P_{GT}) i ukupna aktivna snaga odata iz DG (P_{DG}) treba da pokrije ukupnu potrošnju (P_{DT}) i gubitke aktivne snage (P_{LT}):

$$P_{GT} + P_{DGT} - P_{DT} - P_{LT} = 0. \quad (32)$$

- **Ograničenja bilansa reaktivnih snaga.** Ukupna odata reaktivna snaga tradicionalnih (Q_{GT}) i distribuiranih izvora (Q_{DG}) treba da pokrije ukupnu potražnju (Q_{DT}) i ukupne gubitke reaktivne snage (Q_{LT}):

$$Q_{GT} + Q_{DGT} - Q_{DT} - Q_{LT} = 0. \quad (33)$$

3.2. Ograničenja tipa nejednakosti

Ograničenja tipa nejednakosti se drugačije nazivaju i pogonska ograničenja jer se odnose na trenutna operaciona stanja DG. Karakteristične veličine kojima se upravlja DG (napon, aktivne, reaktivne snage i td.) opisane su u nastavku.

- **Ograničenje napona.** Napon čvora i treba se držati u opsegu dozvoljene minimalne i maksimalne vrednosti za sve čvorove:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad i \text{ je broj čvorova.} \quad (34)$$

- **Ograničenje termičkog napreznja vodova.** Ovim ograničenjem se određuje maksimalni dozvoljeni protok snage po vodu. Ovde se razmatraju termički i stabilnosni uticaj na vodove. Kapacitet voda k (S_k) treba da bude manji od maksimalnog termičkog kapaciteta tog voda (S_k^{max}):

$$S_k \leq S_k^{max}, \quad k \text{ je broj vodova.} \quad (35)$$

- **Ograničenje faznog ugla.** Fazni stav između napona i struje voda i se treba držati u opsegu dozvoljene maksimalne i minimalne vrednosti za sve čvorove:

$$\delta_i^{min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{max}, \quad i \text{ je broj čvorova.} \quad (36)$$

- **Ograničenje aktivne snage iz tradicionalnih izvora.** Odata aktivna snaga tradicionalnih generatorskih jedinica treba da bude ograničena maksimalnom i minimalnom vrednošću. U nekim situacijama stavlja se ograničenje samo za maksimalnu snagu.

$$P_t^{min} \leq P_t \leq P_t^{max}. \quad (37)$$

- **Ograničenje reaktivne snage iz tradicionalnih izvora.** Odata reaktivna snaga tradicionalnih generatorskih jedinica treba da bude ograničena maksimalnom i minimalnom vrednošću. I ovde se u nekim situacijama stavlja se ograničenje samo za maksimalnu snagu.

$$Q_t^{min} \leq Q_t \leq Q_t^{max}. \quad (38)$$

- **Ograničenje kapaciteta transformatora u trafostanicama.** Ukupna snaga koju transformator neke trafostanice može da isporuči treba da bude manja od maksimalne dozvoljene snage:

$$S_{load}^{total} \leq S_{sst}^{max}. \quad (39)$$

- **Ograničenje aktivne snage DG.** Odata aktivna snaga DG je ograničena dozvoljenim minimalnim i maksimalnim aktivnim snagama. Sreću se i primeri gde je postavljena samo gornja granica.

$$P_{DG}^{min} \leq P_{DG} \leq P_{DG}^{max}. \quad (40)$$

- **Ograničenje reaktivne snage DG.** Odata reaktivna snaga DG je ograničena dozvoljenom minimalnom i maksimalnom reaktivnom snagom. I ovde se sreću primeri gde je postavljena samo gornja granica.

$$Q_{DG}^{min} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG}^{max}. \quad (41)$$

- **Ograničenje broja DG.** Ukupan broj DG mora biti jednak ili manji od propisanog maksimalnog broja DG:

$$N_{DG} \leq N_{DG}^{max}. \quad (42)$$

- **Ograničenje struje kratkog spoja.** Ovim ograničenjem se obezbeđuje provera da struja kratkog spoja sa ugrađenim DG neće biti veća od naznačene struje kratkog spoja prema kojoj su izabrani elementi tog dela postrojenja ili mreže:

$$SCL_{WDG} \leq SCL_{rated}. \quad (43)$$

- **Ograničenje faktor snage DG.** Distribuirani generatori rade u režimu sa kontrolom faktora snage i time se javlja potreba za postavljanje ograničenja na faktor snage DG:

$$\cos(\phi_{DG}) = P_{DG} / \sqrt{P_{DG}^2 + Q_{DG}^2} = const. \quad (44)$$

- **Ograničenje izvoda transformatora.** Ovde je razmotrena pozicija izvoda transformatora (n_t) za regulaciju napona (VR) i ona mora biti u opsegu propisanog gornjeg i donjeg limita:

$$n_t^{min} \leq n_t \leq n_t^{max}. \quad (45)$$

- **Ograničenje ukupnih gubitaka u grani.** U ovom slučaju kapacitet DG se povećava na račun smanjenja gubitaka u grani. Cilj je da gubici u grani sa DG budu manji od gubitaka u istoj grani bez DG:

$$P_{DGTL} \leq P_{TLL}. \quad (46)$$

- **Ograničenje odnosa snage kratkog spoja.** Odnos snage kratkog spoja (Short Circuit Ratio - SCR) je odnos snage DG u svakom čvoru i snage kratkog spoja (Short Circuit Level - SCL) u svakom čvoru.

$$\frac{P_{DG_i}}{SCL_i \cos(\phi)} \times 100 \leq 10\%, \quad \forall i \in N. \quad (47)$$

- **Ograničenje skoka napona.** Skokovi napona u mreži mogu se dogoditi prilikom iznenadnog ispada DG. Ovaj neplanirani događaj utiče na sigurnost sistema i izražava se preko:

$$V_b - V_s^+ \leq V_{n',b} \leq V_b + V_s^+, \quad \forall n' \in N, \quad (48)$$

gde je $V_{n',b}$ napon čvora b pri ispadu generatora n' , V_b napon čvora b pre ispada DG i V_s^+ dozvoljeni skok napona.

4. MATEMATIČKI ALGORITMI

U ovom delu rada biće pomenuti matematičke metode za rešavanje algoritama problema optimalnog planiranja distribuiranih izvora električne energije. Možemo ih podeliti na četiri grupe metoda Naik, Khatod i Sharma [5]:

- analitički pristup - Analytical Approach (AA),
- konvencionalne metode - linearno programiranje (LP), nelinearno programiranje (NLP), mixed-integer nelinearno programiranje (MINLP),
- inteligentne metode - simulirano kaljenje (Simulated Annealing - SA), genetički algoritmi (GA), tabu pretraživanje (Tabu Search Algorithm - TSA), mravlja kolonija (Ant Colony System Algorithm - ACSA), fuzzy set teorija.

Analitički pristup se lako implementira i brzo izvršava jer nema iterativnih procedura. Međutim, ne može se primeniti na multi kriterijumske složene optimizacione probleme [5], Georgilakis i Hatziargyriou [6].

Konvencionalnim metodama se može naći globalni optimum, ali ove metode nisu primenljive na složene sisteme [6]. Vreme proračuna je veoma dugo a najrasprostranjeniji metodi su metodi nelinearnog programiranja i MINLP.

Inteligentne metode se zasnivaju na heuristici i koriste se pri rešavanju složenih problema planiranja distribuiranih izvora. Njima se eliminišu pretraživanja za koja se približno može zaključiti da ne sadrže optimum. Na taj način se postupak bitno skraćuje pa je vreme za proračun umanjeno. Međutim, dobijena rešenja su blizu optimalnih rešenja i ne može dokazati da su ujedno i apsolutno najbolja rešenja, već samo da su tako dobijena rešenja vrlo verovatno znatno bolja od rešenja koja bismo dobili bez primene tih metoda [6], Alinjak [7]. Fuzzy set teorija uvodi vrednosti za nesigurnost efekata prametara kriterijumskih funkcija i ograničenja kojima se dobijaju bolja kompromisna rešenja od kojih projektant može da odabere ono koje mu najviše odgovara [3].

5. ZAKLJUČAK

U radu su opisane različite kriterijumske funkcije i odgovarajuća ograničenja koje treba uzeti u obzir prilikom optimalnog planiranja distribuiranih izvora električne energije. Razmotrene su jednokriterijumske, sveobuhvatne i multikriterijumske funkcije, od ograničenja objašnjena su ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti. Na kraju su pomenute matematičke metode za rešavanje algoritama problema optimalnog planiranja. Prethodno opisane kriterijumske funkcije daju inženjerima mogućnost da sagledaju širok uticaj ugradnje distribuiranih izvora električne energije na mrežu. Na njima je da odluče koje karakteristike mreže žele da poboljšaju (naponski profil, gubici, opterećenje po vodovima i td...) i da na osnovu toga primene najadekvatniju kriterijumsku funkciju. Kako multikriterijumske funkcije obuhvataju širok dijapazon mrežnih karakteristika možemo zaključiti da je ona najpogodnija za jednu ozbiljnu i detaljnu analizu optimalnog planiranja distribuiranih izvora električne energije.

U Srbiji se ne pridaje previše pažnje optimalnom planiranju pri ugradnji distribuiranog izvora električne energije. Većina njih je neupravljljiva zbog niskog nivoa distributivne automatizacije (Distribution Automatisation - DA) mreže, zbog privatnog vlasništva nad distribuiranim sredstvima za proizvodnju električne energije i zbog nerazvijenosti tržišta električne energije. Distributivne kompanije daju prespecificirane vrednosti faktora snage, ograničenja odate aktivne i reaktivne snage i naponskih ograničenja bilo da se radi o privatnom ili državnom DG. Povećanjem nivoa DA, deregulacijom elektroprivrednih kompanija i uvođenjem tržišta električne energije može se upravljati DG tako da zadovolji stvarne potrebe potrošača na mreži. Kako bi investiranje u izgradnju distribuiranog izvora električne energije bilo potpuno isplativo i tehnički opravdano, veoma je bitno savladati ove tehnike za optimalno planiranje i koristiti ih kao sastavne delove studija izvodljivosti i glavnih projekata.

6. LITERATURA

1. Nijaz Dizdarević, Mislav Majstorović, Srđan Žutobradić, 2003, "Distribuirana proizvodnja električne energije", 6. savjetovanje HK CIGRE.
2. Duong Quoc Hung, N. Mithulananthan, Kwang Y. Lee, February 2014, "Optimal placement of dispatchable and nondispatchable renewable DG units in distribution networks for minimizing energy loss", "Electrical Power and Energy Systems", Volume 55, Pages 179–186;
3. Rajendra Prasad Payasi, Asheesh K. Singh, Devender Singh, 2011, "Review of distributed generation planning: objectives, constraints, and algorithms", "International Journal of Engineering, Science and Technology", Vol. 3, No. 3, pp. 133-153;
4. Mahmood Sheidaee, Mohsen Kalanter, "April 2011, A Comprehensive Distributed Generation Planning Optimization with Load Models", International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 4, ISSN 2229-5518
5. Gopiya Naik, D. K. Khatod, M. P. Sharma, September 2012, "Planning and Operation of Distributed Generation in Distribution Networks", "International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering", Volume 2, Issue 9, ISSN 2250-2459;
6. Pavlos S. Georgilakis, Nikos D. Hatziargyriou, August 2013, "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3;
7. Tomislav Alinjak, "Optimizacija pogona distribucijske mreže sa znacajnim udjelom distribuiranih izvora", HEP ODS d.o.o. – Elektra Slavonski Brod/Odjel za planiranje i investicije, Slavonski Brod, Hrvatska;