

# Poboljšanje rada distributivne mreže u uslovima velikih opterećenja korišćenjem fotonaponskih i sistema za skladištenje energije

## Improving the Operation of the Distribution Network in High Load Conditions Using Photovoltaic and Energy Storage Systems

Nikola Krstić\*, Dragan Tasić\*, Dardan Klimenta\*\*

\* Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu

\*\* Univerzitet u Prištini sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici

**Rezime** - U ovom radu je razmatrano poboljšanje rada distributivne mreže korišćenjem fotonaponskih (PV) i sistema za skladištenje energije (ESS) u uslovima velikih opterećenja. Optimalne lokacije i snage PV sistema i ESS, u pogledu poboljšanja rada distributivne mreže, su određene metaheurističkom optimizacionom metodom genetskog algoritma (GA), pri čemu su gubici u distributivnoj mreži i njen naponski profil usvojeni kao indikatori kvaliteta rada distributivne mreže. Korišćena su dva pristupa prilikom određivanja optimalnih snaga PV sistema u toku dana, u zavisnosti od odnosa injektirane snage u mrežu od strane PV sistema i njegove maksimalne moguće snage u datom trenutku. Analizirani su slučajevi sa različitim vremenskim i prostornim raspodelama opterećenja u distributivnoj mreži, kao i slučajevi priključenja različitog broja PV sistema i ESS. Na osnovu dobijenih rezultata, pored određivanja nivoa poboljšanja rada distributivne mreže, dati su i zaključci koji se odnose na uticaj dijagrama opterećenja na broj, lokaciju i dimenzionisanje PV sistema i ESS.

**Ključne reči** - fotonaponski sistem, sistem za skladištenje energije, genetski algoritam, dijagram opterećenja, distributivna mreža

**Abstract** - This paper considers the improvement of distribution network operation in high load conditions using photovoltaic (PV) and energy storage systems (ESS). Optimal locations and powers of PV systems and ESS, considering the improvement of distribution network operation, are determined by metaheuristic optimization method of genetic algorithm (GA), where losses in distribution network and its voltage profile are used as quality indicators for distribution network operation. Two approaches are used to determine the optimal power of PV system during the day, depending on the ratio of injected power into the network by the PV system and its maximum available power at a given time. Cases with different load distributions in the distribution network are analyzed, as well as the cases with different number of connected PV systems and ESS. Based on the obtained results, in addition to determining the level of distribution network operation improvement, conclusions are given regarding the

impact of load diagram on the number, location and size of PV systems and ESS.

**Index Terms** - Photovoltaic system, Energy storage system, Genetic algorithm, Load diagram, Distribution network

### I UVOD

Distributivna mreža kao važan i neizostavni deo elektroenergetskog sistema, se mora suočiti i adekvatno odgovoriti na nove izazove i zahteve koji se pred nju postavljaju. Ovi zahtevi najčešće podrazumevaju poboljšanje rada distributivne mreže [1] i nesmetano napajanje sve većeg broja potrošača električnom energijom visokog kvaliteta, korišćenjem novih tehnoloških rešenja koja su ekološki prihvatljiva. U okviru ovih rešenja, kao jedna od najznačajnijih se ističu distribuirani obnovljivi izvori energije [2] i sistemi za skladištenje energije (ESS) [3]. Iako povoljni sa ekološkog aspekta, obnovljivi izvori energije u najvećem broju slučajeva imaju intermitentni karakter, zbog čega su zahtevni za upravljanje, mogu imati negativan uticaj na naponski profil mreže i često ne odgovaraju postojećem dijagramu opterećenja. Jedan od najefikasnijih načina za prevazilaženje ovih problema, posebno u uslovima velike distribuirane proizvodnje ili velikih opterećenja, jeste korišćenje ESS [3].

U ovom radu je korišćen fotonaponski (PV) sistem kao distribuirani obnovljivi izvor energije, koji u kombinaciji sa ESS utiče na poboljšanje rada distributivne mreže. Konkretno, razmatran je uticaj PV sistema i ESS na poboljšanje naponskog profila [4] i smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži [5] u uslovima velikih opterećenja, kao osnovnih indikatora kvaliteta rada distributivne mreže.

Ideja je iskoristiti injektirane snage PV sistema i ESS i njima umanjiti snagu koja se povlači iz mreže, čime bi se rasteretili određeni delovi distributivnih vodova u periodu visokih opterećenja. Osnovna uloga PV sistema za vreme nižih opterećenja bi bila dopuna ESS, što bi u zavisnosti od njihovih lokacija opet za posledicu moglo imati smanjenje tokova snaga na distributivnim vodovima. Na ovaj način bi se smanjila i vremenski ujednačila snaga koja se prenosi distributivnim

vodovima, što bi pozitivno uticalo na poboljšanje naponskog profila [4] distributivne mreže i smanjenje gubitaka u njoj [6]. Step en efikasnosti realizacije pomenute ideje zavisi od pravilnog izbora lokacija i adekvatnog upravljanja injektiranim snagama [7] PV sistema i ESS, koji mora biti usklađen sa zadatim dijagramom opterećenja. U ovu svrhu je iskorišćena metaheuristička optimizaciona metoda genetskog algoritma (GA) [8][9], pomoću koje su određene optimalne lokacije i snage PV sistema i ESS [10]. Prilikom određivanja optimalnih snaga PV sistema korišćena su dva pristupa u zavisnosti od odnosa injektirane i maksimalne moguće snage PV sistema u datom trenutku. U prvom pristupu injektirana snaga prati maksimalnu moguću snagu PV sistema određenu sunčevom iradijacijom za dati trenutak u toku dana, dok u drugom to nije slučaj. Na ovaj način, u prvom pristupu su celokupni resursi PV sistema iskorišćeni za poboljšanje rada distributivne mreže [11], ali je time smanjena i sloboda prilikom određivanja njegove snage, koja mora da prati oblik dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije. Drugi pristup pruža veću slobodu i u njemu PV sistem ne mora raditi sa maksimalnom mogućom snagom u datom trenutku, pa se mogu očekivati i nešto bolji rezultati, ali generalno zahteva PV sistem većih dimenzija.

ESS je u radu obuhvaćen kao idealni element sa jediničnim stepenom efikasnosti u režimu punjenja i pražnjenja, čiji nivo napunjenosti je isti na početku i na kraju posmatranog ciklusa rada, za svaki posmatrani slučaj. Tokovi snaga u distributivnoj mreži i naponi u njenim čvorovima su određeni iterativnom metodom za proračun tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama. Jasno je da rezultati, odnosno nivo poboljšanja rada distributivne mreže u velikoj meri zavisi od oblika dijagrama opterećenja, zbog čega se u radu razmatraju različite vremenske i prostorne raspodele opterećenja [1]. Takođe, rad sadrži i rezultate koji se odnose na priključenje različitog broja PV sistema i ESS. Svi rezultati su dobijeni Matlab simulacijama korišćenjem IEEE distributivne mreže sa 18 čvorova.

## II DEFINISANJE OPTIMIZACIONOG PROBLEMA

Poboljšanje naponskog profila distributivne mreže i smanjenje gubitaka u njoj korišćenjem PV sistema i ESS, predstavlja nelinearni optimizacioni problem sa ograničenjima. Nelinearnost proizilazi iz nelinearne zavisnosti gubitaka i kvaliteta naponskog profila distributivne mreže od snaga PV sistema i ESS. Uzimajući u obzir složenost nalaženja optimalnih vrednosti za lokacije i snage PV sistema i ESS, posebno zbog postavljenih ograničenja, za dobijanje rešenja optimizacionog problema korišćena je metaheuristička optimizaciona metoda GA. Prednost GA i metaheurističkih optimizacionih metoda uopšte je njihova fleksibilnost i mogućnost primene na širokom opsegu različitih optimizacionih problema.

Upravljačke veličine u ovom optimizacionom problemu su lokacije i srednje jednočasovne snage PV sistema i ESS. Ograničenja upravljačkih veličina su data sledećim relacijama:

$$i_{PV} \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \quad (1)$$

$$i_{ESS} \in \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \quad (2)$$

$$P_{PVmin} < P_{PV}^k < P_{PVmax}^k \quad (3)$$

$$P_{ESSmin} < P_{ESS}^k < P_{ESSmax} \quad (4)$$

gde je  $i_{PV}$  indeks čvora u distributivnoj mreži u kome je priključen PV sistem, a  $i_{ESS}$  indeks čvora u kome je priključen ESS, dok je  $\{i_1, i_2, \dots, i_n\}$  skup indeksa čvorova u kojima je moguće priključiti PV sistem i ESS.  $P_{PV}^k$  predstavlja srednju jednočasovnu snagu koju PV sistem injektira u mrežu u  $k$ -tom satu, dok je  $P_{ESS}^k$  srednja jednočasovna snaga koju injektira ESS u  $k$ -tom satu. Snage  $P_{ESSmax}$  i  $P_{ESSmin}$  predstavljaju maksimalnu snagu pražnjenja i minimalnu snagu punjenja ESS i njihove vrednosti usvojene u radu su takve da ne predstavljaju ograničavajući faktor za dobijanje optimalnog rešenja. Za razliku od graničnih snaga ESS koje imaju istu vrednost u toku celog dana, gornja granična vrednost snage PV sistema  $P_{PVmax}^k$  zavisi od rednog broja sata u danu  $k$ , i prati oblik dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije. Donja granična vrednost za snagu PV sistema  $P_{PVmin}$  je jednaka nuli.

Zavisne veličine koje se pojavljuju u ovom optimizacionom problemu su nivo napunjenosti ESS, struja duž vodova distributivne mreže i napon u njenim čvorovima. Uzimajući u obzir da su u ovom radu korišćene srednje jednočasovne snage, nivo napunjenosti ESS na kraju  $k$ -tog sata, za vreme punjenja i pražnjenja se može odrediti iz relacija (5) i (6) respektivno:

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{\eta}{Q_{ESS}} P_{ESS}(k) \quad (5)$$

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{1}{\eta Q_{ESS}} P_{ESS}(k) \quad (6)$$

gde je:  $SOC_k$  – nivo napunjenosti ESS na kraju  $k$ -tog sata,  $SOC_{k-1}$  – nivo napunjenosti ESS na kraju  $k-1$ -og sata,  $P_{ESS}(k)$  – srednja jednočasovna snaga ESS u  $k$ -tom satu (ima vrednost manju od nule za vreme punjenja, a veću od nule za vreme pražnjenja ESS),  $Q_{ESS}$  – ukupni energetski kapacitet ESS,  $\eta$  – step en efikasnost procesa punjenja i pražnjenja ESS.

Ograničenja zavisnih veličina su određena maksimalnom radnom strujom i dozvoljenim opsegom napona distributivnih vodova, kao i dozvoljenim opsegom nivoa napunjenosti ESS, što je dato relacijama:

$$I < I_{max} \quad (7)$$

$$V_{min} < V < V_{max} \quad (8)$$

$$SOC_{max} < SOC < SOC_{max} \quad (9)$$

gde su  $I$  i  $V$  struja i napon u distributivnoj mreži.

Kako bi dobijena rešenja bila održiva u vremenu, usvojeno je dodatno ograničenje vezano za nivo napunjenosti ESS:

$$SOC_{početak} = SOC_{kraj} \quad (10)$$

Ograničenjem datim u relaciji (10) se postiže da nivo napunjenosti na početku i kraju posmatranog ciklusa rada bude isti.

Rešenje optimizacionog problema treba da omogući poboljšanje rada distributivne mreže time što će poboljšati naponski profil i smanjiti gubitke u njoj. Iz ovog razloga je korišćena dvoparameterska kriterijumska funkcija, sastavljena od srednje dnevne snage gubitaka u distributivnoj mreži i indikatora kvaliteta naponskog profila u njoj. Kriterijumska funkcija je data

izrazom (11):

$$C = \frac{a}{24} \cdot \sum_{k=1}^{24} \sum_{j=1}^m 3I_{k,j}^2 R_j + \frac{b}{24} \cdot \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n (V_{k,i} - V_{ref})^2 \quad (11)$$

Gde je:  $C$  – kriterijumska funkcija čiju minimizaciju je potrebno izvršiti,  $I_{k,j}$  – efektivna vrednost struje u  $k$ -tom satu na  $j$ -toj deonici distributivne mreže,  $R_j$  – aktivna otpornost  $j$ -te deonice distributivne mreže,  $V_{k,i}$  – srednja vrednost napona u  $k$ -tom satu  $i$ -tog čvora distributivne mreže,  $V_{ref}$  – referentna vrednost napona,  $m, n$  – ukupan broj deonica i čvorova u distributivnoj mreži, respektivno,  $a, b$  – težinski koeficijenti ukupnih gubitaka i kvaliteta naponskog profila distributivne mreže, respektivno.

### III UTICAJ PV SISTEMA I ESS NA GUBITKE I NAPONSKI PROFIL DISTRIBUTIVNE MREŽE

Gubici i naponski profil distributivne mreže direktno zavise od tokova snaga po njenim vodovima. Priključenjem PV sistema i ESS, pored snage i raspodele opterećenja, na tokove snaga po distributivnim vodovima utiče i injektirane snage ova dva sistema. Imajući ovo u vidu, pravilnim upravljanjem injektiranim snagama PV sistema i ESS moguće je smanjiti gubitke i poboljšati naponski profil distributivne mreže.

#### A. Uticaj PV sistema i ESS na gubitke u distributivnoj mreži

Kako bi odredili uticaj PV sistema i ESS na gubitke u distributivnoj mreži, krenuće se od izraza za izračunavanje njihove srednje dnevne vrednosti na nekoj deonici mreže.

$$P_{Lossj} = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} 3I_{k,j}^2 R_j \quad (12)$$

gde je:  $P_{Lossj}$  – srednja dnevna vrednost snage gubitaka na  $j$ -toj deonici distributivne mreže,  $I_{k,j}$  – efektivna vrednost struje u  $k$ -tom satu na  $j$ -toj deonici distributivne mreže,  $R_j$  – aktivna otpornost  $j$ -te deonice distributivne mreže.

Uvažavajući korelaciju između struje i snage, može se napisati relacija koja vezuje gubitke i snagu koja se prenosi  $j$ -tom deonicom distributivnog voda.

$$P_{Lossj} = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} C_{k,j} \cdot P_{k,j}^2 \quad (13)$$

gde je  $P_{k,j}$  efektivna vrednost snage u  $k$ -tom satu na  $j$ -toj deonici distributivne mreže, dok je  $C_{k,j}$  koeficijent proporcionalnosti gubitaka i kvadrata snage u  $k$ -tom satu na  $j$ -toj deonici distributivne mreže. Vrednost ovog koeficijenta se na osnovu napona na početku  $j$ -te deonice distributivne mreže ( $U_{k,i}$ ), njenog faktora snage u  $k$ -tom satu ( $\cos\varphi_{k,j}$ ) i aktivne otpornosti ( $R_j$ ) može odrediti kao:

$$C_{k,j} = \frac{R_j}{U_{k,i}^2 \cos^2\varphi_{k,j}} \quad (14)$$

Zanemarivanjem promene napona i faktora snage u vremenu, koeficijent proporcionalnosti dobija konstantnu vrednost u toku dana određenu posmatranom deonicom ( $C_j$ ). Ukoliko se snaga  $P_{k,j}$  iz izraza (13) predstavi preko svoje srednje dnevne vrednosti i odstupanja, i izvrši njeno kvadriranje, izraz (13) postaje:

$$P_{Lossj} = C_j \cdot \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} (P_{srj}^2 + 2P_{srj}\Delta P_{k,j} + \Delta P_{k,j}^2) \quad (15)$$

gde je:  $P_{srj}$  – srednja dnevna vrednost efektivnih jednočasovnih

snaga na  $j$ -toj deonici distributivne mreže,  $\Delta P_{k,j}$  – odstupanje jednočasovne efektivne snage u  $k$ -tom satu od njene srednje dnevne vrednosti na  $j$ -toj deonici distributivne mreže.

Kako je suma drugog člana u zagradi izraza (15) jednaka nuli, srednja dnevna snaga gubitaka u distributivnoj mreži se može odrediti kao:

$$P_{Loss} = \sum_{j=1}^m C_j \cdot (P_{srj}^2 + \sigma_j^2) \quad (16)$$

gde je  $\sigma_j$  standardna devijacija efektivne jednočasovne snage na  $j$ -toj deonici distributivne mreže.

Usvajanjem da su snage opterećenja i injektirane snage PV sistema i ESS konstantne u jednočasovnom periodu, za efektivnu snagu iz izraza (13) se može pisati:

$$P_{k,j} = P_{Lk,j} - P_{DGk,j} \quad (17)$$

gde je:  $P_{Lk,j}$  – snaga koja se u  $k$ -tom satu prenosi  $j$ -tom deonicom distributivne mreže usled postojanja opterećenja,  $P_{DGk,j}$  – snaga koja se u  $k$ -tom satu prenosi  $j$ -tom deonicom distributivne mreže usled postojanja distribuirane proizvodnje.

Snaga distribuirane proizvodnje iz izraza (17) obuhvata snage injektiranja PV sistema i ESS, pri čemu na njenu vrednost utiče položaj posmatrane deonice distributivne mreže u odnosu na mesto priključenja ova dva sistema. Kako se radi o radijalnoj distributivnoj mreži injektirane snage PV sistema i ESS utiču samo na tokove snaga ispred mesta njihovog priključenja. U skladu sa time, snaga  $P_{DGk,j}$  može biti jednaka nuli, snazi injektiranja PV sistema, snazi injektiranja ESS ili zbiru snaga injektiranja PV sistema i ESS, u zavisnosti od toga da li je neki od ova dva sistema priključen iza posmatrane deonice. Sada, parametri u relaciji (16), se mogu odrediti kao:

$$P_{srj}^2 = (P_{LSrj} - P_{PVSrj} - P_{ESSsrj})^2 \quad (18)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{24} \cdot \sum_{k=1}^{24} (\Delta P_{Lk,j} - \Delta P_{PVk,j} - \Delta P_{ESSk,j})^2 \quad (19)$$

gde su  $P_{LSrj}$ ,  $P_{PVSrj}$ ,  $P_{ESSsrj}$  srednje dnevne snage koje se prenose  $j$ -tom deonicom distributivne mreže usled postojanja opterećenja, PV sistema i ESS, respektivno, dok su  $\Delta P_{Lk,j}$ ,  $\Delta P_{PVk,j}$ ,  $\Delta P_{ESSk,j}$  odstupanja snaga koje se prenose  $j$ -tom deonicom usled opterećenja, PV sistema i ESS u  $k$ -tom satu od njihovih srednjih dnevnih vrednosti.

Važno je istaknuti da snage  $P_{PVSrj}$ ,  $P_{ESSsrj}$  kao i snage  $\Delta P_{PVk,j}$ ,  $\Delta P_{ESSk,j}$  imaju vrednost jednaku nuli ukoliko se odgovarajući sistem (PV sistem ili ESS) ne nalazi iza  $j$ -te deonice (posmatrane deonice). Takođe, u ovom radu je ESS posmatran kao idealni element sa jediničnom efikasnošću i istim nivoom napunjenosti na početku i kraju dana. Ovo za posledicu ima da srednja dnevna snaga koja se prenosi bilo kojom deonicom distributivne mreže usled postojanja ESS, bude jednaka nuli ( $P_{ESSsr} = 0$ ).

Na osnovu relacije (16) može se zaključiti da gubici u distributivnoj mreži direktno zavise od srednje efektivne vrednosti i varijabilnosti snage koja se prenosi njenim vodovima. Koristeći izraze (18) i (19), kao i činjenicu da je srednja snaga ESS jednaka nuli, može se konstatovati da PV sistem utiče na smanjenje gubitaka menjajući (smanjujući) i srednju vrednost i

varijabilnost snage distributivnih vodova, dok ESS to čini samo sa varijabilnošću. Ovde se mora imati u vidu da PV sistemi često rade maksimalnom snagom koja zavisi od sunčeve iradijacije i ne mora biti usklađena sa dijagramom opterećenja. Ovo dovodi do toga da se uticaj PV sistema na smanjenje gubitaka dominantno ostvaruje preko smanjenja srednje efektivne vrednosti snage distributivnih vodova, dok na smanjenje varijabilnosti, u daleko većoj meri utiče fleksibilniji ESS.

#### B. Uticaj PV sistema i ESS na naponski profil distributivne mreže

Kako bi se odredio uticaj PV sistema i ESS na naponski profil distributivne mreže krenuće se od izraza za izračunavanje vrednosti indikatora kvaliteta naponskog profila distributivne mreže, korišćenog u ovom radu.

$$VQI = \frac{1}{24} \cdot \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n (V_{k,i} - V_{ref})^2 \quad (20)$$

gde je:  $VQI$  –indikator kvaliteta naponskog profila,  $V_{k,i}$  –srednja vrednost napona u  $k$ -tom satu  $i$ -tog čvora distributivne mreže,  $V_{ref}$  –referentna vrednost napona.

Veza između napona u nekoj tački distributivne mreže i snage koja se prenosi njenim vodovima je data u izrazu za pad napona:

$$\Delta V = \frac{PR+QX}{V} + j \frac{PX-QR}{V} \quad (21)$$

gde je  $\Delta V$  promena fazora napona  $V$  na deonici distributivne mreže sa aktivnom otpornošću  $R$  i reaktansom  $X$ , kojom se prenosi aktivna snaga  $P$  i reaktivna snaga  $Q$ . Zanemarivanjem poprečne komponente (imaginarnog dela) u izrazu za pad napona, napon  $i$ -tog čvora distributivne mreže u  $k$ -tom satu se može odrediti kao:

$$V_{k,l} = V_0 - \sum_{j=1}^l \frac{(P_{k,j}R_j + Q_{k,j}X_j)}{V_{k,j}} \quad (22)$$

gde je  $V_0$  napon napojnog čvora distributivne mreže,  $V_{k,l}$  i  $V_{k,j}$  srednje vrednosti napona u  $k$ -tom satu na kraju  $l$ -te i  $j$ -te deonice distributivne mreže, dok su  $P_{k,j}$  i  $Q_{k,j}$  aktivna i reaktivna snaga u  $k$ -tom satu na  $j$ -toj deonici koja ima aktivnu otpornost  $R_j$  i reaktansu  $X_j$ .

U ovom radu je za napon napojnog čvora distributivne mreže usvojena konstantna vrednost jednaka referentnoj ( $V_0 = V_{ref}$ ). Sada, zamenom relacije (22) u (20) za vrednost indikatora kvaliteta naponskog profila u čvoru na kraju  $l$ -te deonice distributivne mreže se dobija:

$$VQI_l = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} \left[ \sum_{j=1}^l \frac{P_{k,j}R_j + Q_{k,j}X_j}{V_{k,j}} \right]^2 \quad (23)$$

Relacija (23) se može napisati i u obliku:

$$VQI_l = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} \left[ \sum_{j=1}^l P_{k,j} C_{k,j} \right]^2 \quad (24)$$

Pri čemu se koeficijent  $C_{k,j}$  može odrediti iz relacije:

$$C_{k,j} = \frac{R_j + \frac{Q_{k,j}X_j}{P_{k,j}}}{V_{k,j}} \quad (25)$$

Zanemarujući promenu faktora snage i napona u vremenu, može se smatrati da koeficijent iz relacije (25) ima konstantnu vrednost

u toku dana koja zavisi samo od posmatrane deonice distributivne mreže ( $C_j$ ). Uz navedenu aproksimaciju, kvadriranjem sume iz relacije (24) ovaj izraz postaje:

$$VQI_l = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} \left( \sum_{j=1}^l P_{k,j}^2 C_j^2 + \sum_{i,j=1, i \neq j}^l P_{k,i} P_{k,j} C_i C_j \right) \quad (26)$$

Obzirom na to da svaki član sume u relaciji (26) zavisi od kvadrata ili proizvoda snaga koje se prenose distributivnim vodovima ( $P_{k,j}^2$  i  $P_{k,i}P_{k,j}$ ) i odgovarajućeg koeficijenta proporcionalnosti ( $C_j^2$  ili  $C_iC_j$ ), može se napraviti analogija sa relacijom (13) kod razmatranja gubitaka u distributivnoj mreži. Ovo bi značilo da za izabrani oblik indikatora kvaliteta naponskog profila, i činjenice da je napon napojnog čvora distributivne mreže jednak referentnom, njegova vrednost za određeni čvor zavisi na isti način od snaga injektiranja PV sistema i ESS kao što zavisi i snaga gubitaka na određenoj deonici. Imajući ovo u vidu, dalji postupak i svi zaključci izvedeni kod analize uticaja PV sistema i ESS na gubitke u distributivnoj mreži se mogu primeniti i kod analize uticaja ovih sistema na naponski profil distributivne mreže.

#### IV REŠAVANJE OPTIMIZACIONOG PROBLEMA

Rešavanje optimizacionog problema poboljšanja naponskog profila i smanjenja gubitaka u distributivnoj mreži korišćenjem PV sistema i ESS se svodi na nalaženje optimalnih lokacija i snaga ovih sistema u toku dana. U ovu svrhu je u ovom radu iskorišćena metaheuristička optimizaciona metoda GA [8].

Kao što je opšte poznato, GA je optimizaciona metoda koja se zasniva na principima prirodne selekcije. Drugim rečima, ova optimizaciona metoda oponaša proces evolucije u kome najbolje prilagođene jedinke imaju najveću šansu da ostave potomstvo i prenesu svoje gene, poboljšavajući kvalitet narednih generacija. Tri osnovne celine, odnosno etape u sklopu GA su selekcija, ukrštanje i mutacija. U prvoj celini, selekciji, određuju se parovi koji će se ukrstiti i ostaviti potomstvo, pri čemu kvalitetnije jedinke imaju veće šanse da budu izabrane. Druga celina određuje ishod ukrštanja i u njoj je definisan način na koji će izabrani roditelji preneti svoje gene potomstvu. Mutacija, sa određenom verovatnoćom, vrši nasumično menjanje genoma jedinke, čime se obezbeđuje raznovrsniji genetski sastav i ostvaruje mogućnost stvaranja kvalitetnijih jedinki. Ovo je ujedno i najvažniji mehanizam GA za napuštanje lokalnih optimuma. GA spada u populacione optimizacione metode. Populacija je sastavljena od velikog broja jedinki koje predstavljaju vektore upravljačkih veličina.

Konkretno, za posmatrani optimizacioni problem upravljačke veličine su lokacije i srednje jednočasovne snage PV sistema i ESS u toku dana. Prilikom određivanja srednje jednočasovne snage PV sistema, u radu su korišćena dva pristupa. U prvom pristupu, postoji sloboda izbora samo maksimalne snage (snage za vreme maksimalne sunčeve iradijacije), dok su snage u ostala 23 časa određene oblikom dnevnog dijagrama iradijacije, prema relaciji:

$$P_{PV}(h) = \frac{I_C(h)}{I_{Cmax}} P_{PVmax} \quad (27)$$

gde je:  $P_{PV}(h)$  - snaga PV sistema u  $h$ -tom satu,  $P_{PVmax}$  - snaga PV sistema u satu sa maksimalnom iradijacijom,  $I_C(h)$  - srednja

jednočasovna sunčeva iradijacija panela PV sistema u  $h$ -tom satu,  $I_{Cmax}$ - maksimalna srednja jednočasovna iradijacija panela PV sistema u toku dana.

Drugi pristup pruža slobodu izbora srednjih jednočasovnih snaga PV sistema za svaki od 24 sata u toku dana. Naravno, kao i kod prvog pristupa i ovde izabrane snage moraju biti u dozvoljenom opsegu, određenim graničnim vrednostima jednočasovnih snaga koje prate dnevni dijagram iradijacije. Ovo znači da za razliku od ESS čiji broj koordinata u vektoru upravljačkih veličina iznosi 25 (1 koordinata za lokaciju i 24 za snage), broj koordinata koje određuju PV sistem može biti 2 ili 25 u zavisnosti od toga da li se koristi prvi ili drugi pristup. Ukupan broj koordinata (dimenzija) vektora upravljačkih veličina je određen sabiranjem broja koordinata svakog korišćenog PV sistema i ESS.

U radu se pored indikatora koji određuju poboljšanje rada distributivne mreže (srednja snaga gubitaka i indikator kvaliteta naponskog profila) određuju i osnovni parametri potrebni za dimenzionisanje PV sistema i ESS. U ove parametre spadaju potrebna maksimalna snaga PV sistema i potreban energetska kapacitet ESS. Za slučaj korišćenja prvog pristupa maksimalna snaga PV sistema se direktno određuje na osnovu njenog izbora, dok se kod drugog pristupa ona određuje kao maksimalna vrednost maksimalne snage izračunate na osnovu izraza (27) za svaku jednočasovnu snagu u toku dana:

$$P_{PVmax} = \max\left\{\frac{I_{Cmax}}{I_C(h)} P_{PV}(h)\right\} \quad (28)$$

Potreban energetska kapacitet ESS ( $\Delta Q_{ESS}$ ) se na osnovu računskog energetska kapaciteta ( $Q_{ESS}$ ), kao i minimalne ( $SOC_{min}$ ) i maksimalne vrednosti nivoa napunjenosti ESS ( $SOC_{max}$ ) u toku rada, može odrediti kao:

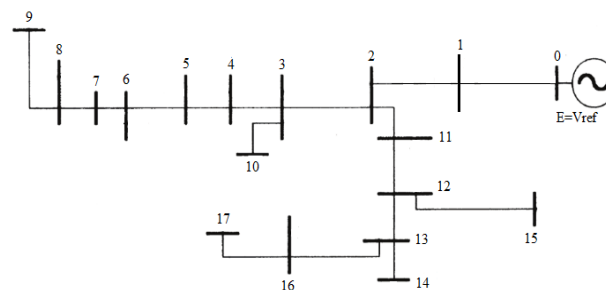
$$\Delta Q_{ESS} = Q_{ESS}(SOC_{max} - SOC_{min}) \quad (29)$$

Prilikom nalaženja optimalnog rešenja navedenog optimizacionog problema korišćena je populacija od 200 jedinki, pri čemu je za optimalno rešenje usvojeno ono najbolje, dobijeno nakon 100 iteracija (generacija).

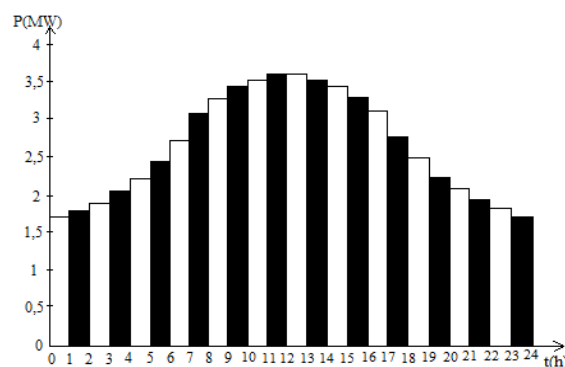
#### V PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Svi rezultati dobijeni u ovom radu se odnose na IEEE radijalnu distributivnu mrežu sa 18 čvorova, prikazanu na slici 1. Usvojeno je isto rastojanje između svaka dva susedna čvora i ono iznosi 400 m. Ovo je urađeno radi jednostavnosti izvođenja opštih zaključaka. Inače, izloženi postupak omogućava uvažavanje različitih rastojanja između čvorova, čime se omogućava analiza u svakom konkretnom slučaju. Naponski nivo distributivne mreže je 10 kV, dok vrednosti podužne aktivne otpornosti i reaktanse iznose  $r = 0,648 \Omega/\text{km}$  i  $x = 0,372 \Omega/\text{km}$ .

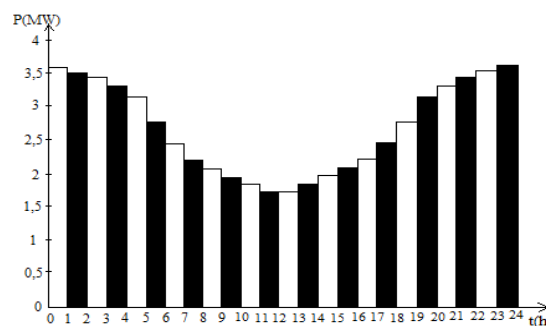
Razmatrane su dve različite vremenske i dve različite prostorne raspodele opterećenja u distributivnoj mreži. Ovime se postižu četiri različita slučaja opterećenja distributivne mreže. Prva dva slučaja se odnose na uniformnu i linearno rastuću prostornu raspodelu opterećenja po čvorovima mreže (gledano od početka ka kraju distributivnih vodova), za vremensku raspodelu opterećenja (dijagram opterećenja), prikazanu na slici 2.



Slika 1. IEEE18 distributivna mreža



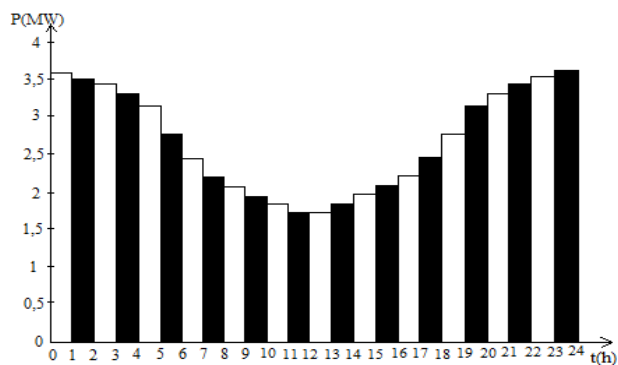
Slika 2. Prvi dijagram opterećenja distributivne mreže



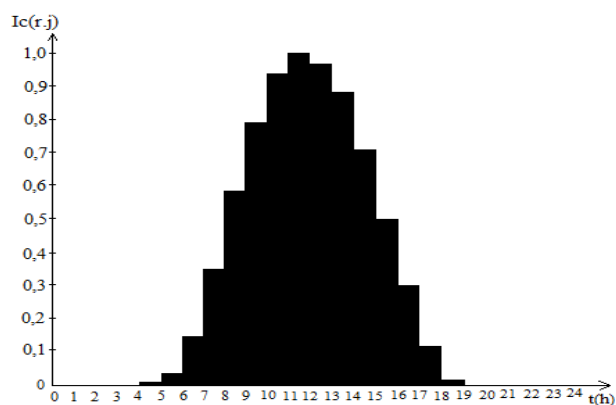
Slika 3. Drugi dijagram opterećenja distributivne mreže

Druga dva slučaja opterećenja mreže imaju prostorne raspodele kao i prva dva slučaja, pri čemu je korišćena druga vremenska raspodela opterećenja (drugi dijagram opterećenja), data na slici 3. Kao što se može videti sa slika 2 i 3, prvi i drugi dijagram opterećenja distributivne mreže imaju istu maksimalnu ( $P_{max} = 3,57MW$ ) i srednju snagu ( $P_{sr} = 2,628MW$ ). Važno je napomenuti da je u svakom razmatranom slučaju vremenska raspodela opterećenja svakog čvora ista i prati korišćeni dijagram opterećenja distributivne mreže. Takođe, faktor snage opterećenja je isti u toku celog dana i jedinstven na celoj distributivnoj mreži,  $\cos\varphi = 0,957$ . Dnevni dijagram sunčeve iradijacije panela PV sistema, korišćen pri određivanju snage PV sistema, izražen u relativnim jedinicama, dat je na slici 4.

Svo opterećenje u distributivnoj mreži je tipa konstantne snage i može se smatrati kao veliko, jer u periodima njegovih najvećih vrednosti dolazi do određenog preopterećenja napojnih deonica distributivne mreže (usvojena maksimalna trajno dozvoljena struja distributivnih vodova je 170A).



Slika 3. Drugi dijagram opterećenja distributivne mreže



Slika 4. Dnevni dijagram iradijacije panela PV sistema

Vrednosti težinskih koeficijenta u kriterijumskoj funkciji su određene tako da se smanjenje gubitaka i poboljšanje naponskog profila distributivne mreže uzima sa podjednakim značajem, i u razmatranim primerima iznose:  $a = 3 \frac{1}{W}$  i  $b = 1 \frac{1}{V^2}$ .

Tabela 1. Srednja snaga gubitaka i indikator kvaliteta naponskog profila pre priključenja PV sistema i ESS

Slučaj opterećenja	$P_{gsr}[kW]$	$VQI[(kV)^2]$
I	61,531	0,33572
II	74,574	0,40825
III	61,531	0,33572
IV	74,574	0,40825

U tabeli 1 su date vrednosti srednje snage gubitaka distributivne mreže ( $P_{gsr}$ ) i vrednosti indikatora kvaliteta naponskog profila ( $VQI$ ) za sva četiri navedena slučaja opterećenja distributivne mreže, pre priključenja PV sistema i ESS. Korišćenjem metaheurističke optimizacione metode GA, određene su optimalne lokacije (indeksi čvorova u distributivnoj mreži) i snage PV sistema i ESS u toku dana, kako bi se ostvarilo što veće poboljšanje rada distributivne mreže. Razmatrana su dva slučaja, u prvom je priključen jedan PV sistem i jedan ESS, dok su u drugom priključena dva PV sistema i dva ESS.

Kako dijagrami opterećenja imaju različito vremenski raspoređena ali ista satna opterećenja, dnevne vrednosti gubitaka i kvaliteta naponskog profila, prikazane u tabeli 1 za I i III, kao i II i IV slučaj su iste. Razlika u vrednostima između I i II kao i III i IV slučaja iz table 1 je posledica različite prostorne raspodele opterećenja u distributivnoj mreži, pri čemu se manji gubici i

bolji naponski profil ostvaruje u slučaju ravnomerne raspodele opterećenja po čvorovima mreže.

Tabela 2. pored rezultata koji se odnose na rad distributivne mreže (srednja snaga gubitaka i kvalitet naponskog profila) nakon priključenja jednog PV sistema i jednog ESS, sadrži i rezultate vezane za optimalnu lokaciju i dimenzionisanje ova dva sistema. U ove rezultate se ubrajaju indeksi čvorova u distributivnoj mreži u kojima su priključeni PV sistem i ESS ( $i_{PV}$ ,  $i_{ESS}$ ), potrebna maksimalna snaga PV sistema ( $P_{PVmax}$ ) i potreban energetska kapacitet ESS ( $\Delta Q_{ESS}$ ).

Tabela 2. Vrednosti karakterističnih pokazatelja i parametara u slučaju priključenja jednog PV sistema i jednog ESS

	I	II	III	IV
$P_{gsr}[kW]$	30,036 (25,142)	38,695 (28,283)	31,982 (25,743)	36,334 (29,358)
$VQI[(kV)^2]$	0,0359 (0,0425)	0,05678 (0,0539)	0,0608 (0,0510)	0,07014 (0,0627)
$i_{PV}$	3 (4)	4 (6)	3 (5)	5 (6)
$P_{PVmax}[MW]$	9,412 (20,457)	8,560 (13,798)	8,451 (17,103)	7,682 (18,593)
$i_{ESS}$	3 (4)	4 (6)	3 (5)	5 (6)
$\Delta Q_{ESS}[MWh]$	32,012 (20,305)	28,961 (18,304)	41,203 (29,683)	39,302 (29,126)

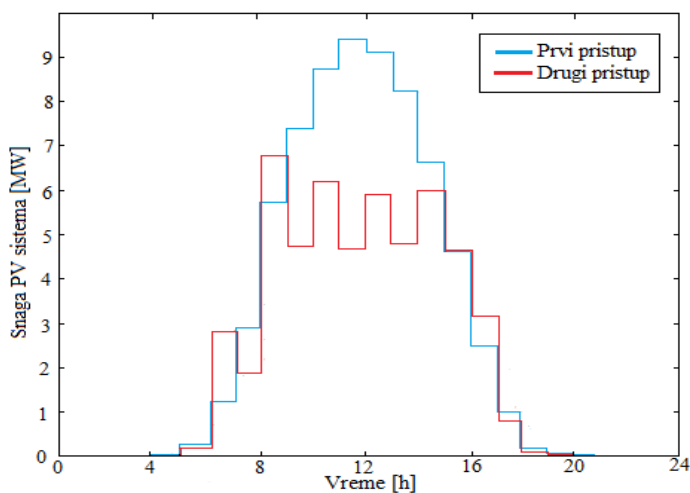
Tabela 3. Vrednosti karakterističnih pokazatelja i parametara u slučaju priključenja dva PV sistema i dva ESS

	I	II	III	IV
$P_{gsr}[kW]$	15,542 (15,381)	20,697 (18,097)	16,830 (14,226)	17,226 (15,959)
$VQI[(kV)^2]$	0,0204 (0,0170)	0,0254 (0,0265)	0,0375 (0,0196)	0,0318 (0,0404)
$i_{PV1}$	5 (12)	6 (16)	6 (7)	7 (8)
$P_{PVmax1}[MW]$	4,329 (7,655)	5,206 (5,280)	3,869 (7,935)	4,586 (10,747)
$i_{PV2}$	12 (6)	12 (7)	13 (13)	16 (13)
$P_{PVmax2}[MW]$	4,656 (9,497)	3,181 (7,647)	3,844 (7,757)	3,407 (13,357)
$i_{ESS1}$	5 (6)	6 (7)	13 (13)	16 (8)
$\Delta Q_{ESS1}[MWh]$	14,916 (14,147)	16,712 (14,181)	19,367 (17,391)	16,717 (16,539)
$i_{ESS2}$	12 (2)	2 (2)	6 (7)	7 (13)
$\Delta Q_{ESS2}[MWh]$	15,534 (9,027)	11,865 (7,444)	19,100 (16,812)	22,426 (17,883)

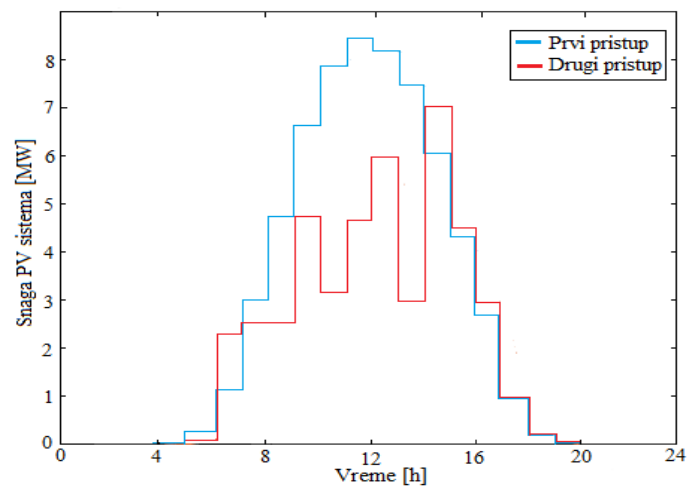
U tabeli 2 kao i u tabeli 3, za dobijanje vrednosti koje se ne nalaze u zagradama je korišćen prvi pristup u određivanju snaga PV sistema, dok su vrednosti koje se nalaze u zagradama određene korišćenjem drugog pristupa. Poređenjem rezultata iz tabela 1 i 2 može se zaključiti da se priključenjem PV sistema i ESS mogu znatno smanjiti gubici i poboljšati naponski profil distributivne mreže. Iz table 2 se može videti da se nešto veće poboljšanje rada distributivne mreže, kako sa aspekta gubitaka tako i naponskog profila, ostvaruje kod drugog pristupa u

određivanju snaga PV sistema, što je i očekivano s obzirom na veći stepen slobode. Takođe, potrebna maksimalna snaga PV sistema u drugom pristupu je znatno veća, ali je zato potreban energetska kapacitet ESS manji, usled veće fleksibilnosti snage PV sistema u ovom pristupu. Tabela 2 pokazuje da za sva četiri slučaja opterećenja, optimalna lokacija za priključenje PV sistema se poklapa sa optimalnom lokacijom za priključenje ESS, odnosno to je isti čvor koji je u zavisnosti od slučaja lociran negde na prvoj polovini dužeg ogranka distributivne mreže. Nešto bolji rezultati u tabeli 2 se dobijaju za prvi dijagram opterećenja (slučajevi I i II) i u slučaju ravnomerne prostorne raspodele opterećenja (slučajevi I i III). Ovo je posledica boljeg poklapanja proizvodnje PV sistema sa prvim dijagramom opterećenja, kao i činjenice da pomeranje težišta opterećenja ka krajevima distributivne mreže nepovoljno utiče na gubitke i naponski profil u njoj.

U slučaju priključenja dva PV sistema i dva ESS, vrednosti karakterističnih pokazatelja i parametara su date u tabeli 3.



Slika 5. Snaga PV sistema za prvi slučaj opterećenja



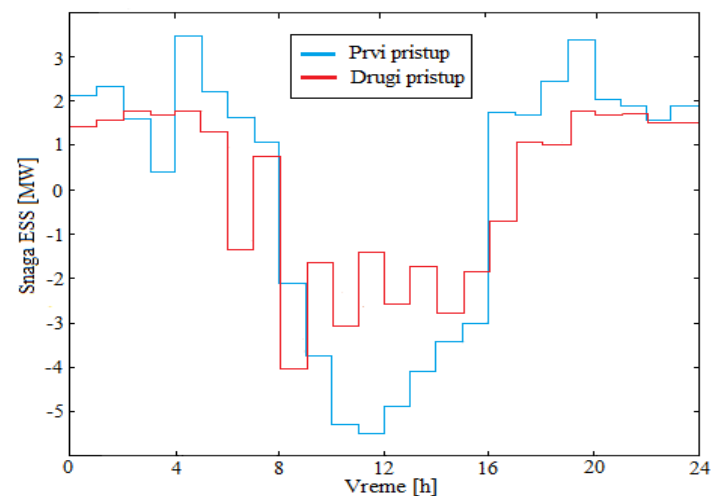
Slika 6. Snaga PV sistema za treći slučaj opterećenja

Na osnovu rezultata iz table 3 se može zaključiti da se priključenjem dva PV sistema i dva ESS ostvaruje veće smanjenje gubitaka i bolje poboljšanje naponskog profila

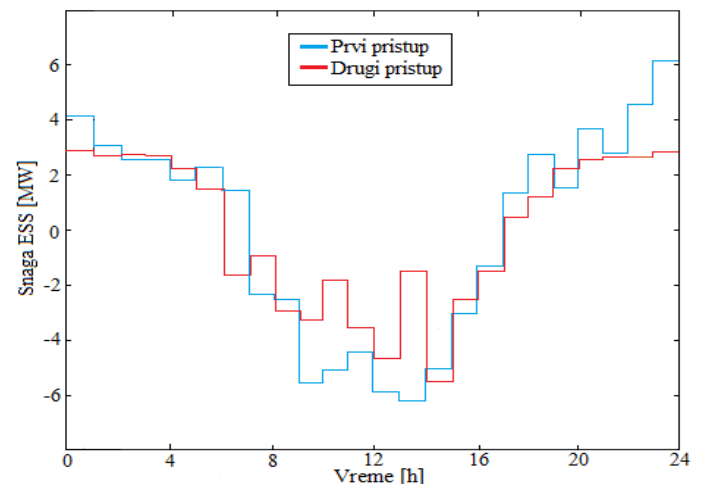
distributivne mreže nego u slučaju priključenja jednog para ovih sistema, iako je ukupna maksimalna snaga oba PV sistema i ukupni potrebni energetska kapacitet oba ESS približno isti onima iz table 2. Kao i u tabeli 2 i ovde su potrebne maksimalne snage PV sistema približno iste nezavisno od posmatranog slučaja opterećenja, dok su potrebni energetska kapaciteti ESS veći u slučaju drugog dijagrama opterećenja (slučajevi III i IV), gde je i veće nepoklapanje proizvodnje PV sistema sa potrošnjom. Zaključci izvedeni na osnovu table 2 se mogu primeniti i ovde, s obzirom da se rezultati table 2 i 3 u velikoj meri poklapaju.

Na slikama 5 i 6 su prikazane srednje jednočasovne snage PV sistema u toku dana dobijene korišćenjem oba pristupa pri njihovom određivanju, u slučaju priključenja jednog PV sistema i jednog ESS, za prvi i treći slučaj opterećenja distributivne mreže, respektivno.

Na slikama 5 i 6 se primećuje da snaga PV sistema kod prvog pristupa u potpunosti prati oblik dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema sa slike 4 (u svakom satu radi sa maksimalnom mogućom snagom za dati sat), dok u drugom pristupu to nije slučaj, već je snaga PV sistema tada znatno ravnija i bolje prilagođena dijagramu opterećenja.



Slika 7. Snaga ESS za prvi slučaj opterećenja

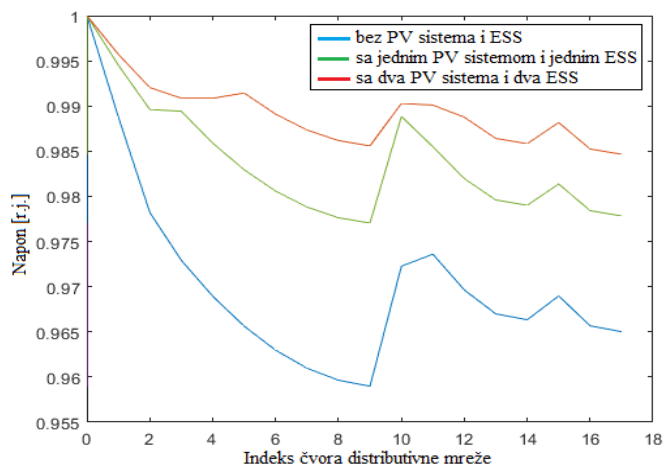


Slika 8. Snaga ESS za treći slučaj opterećenja

Iako je kod drugog pristupa maksimalna moguća snaga PV sistema veća (što se primećuje na osnovu veće snage u određenim satima), slike 5 i 6 pokazuju da PV sistem tada predaje mreži manje električne energije u toku dana. Ovo se objašnjava adekvatnijim jednočasovnim snagama PV sistema u drugom pristupu, usled veće slobode izbora koji nije u potpunosti ograničen dnevnim dijagramom sunčeve iradijacije. Kako su optimalne lokacije za priključenje PV sistema i ESS isti čvorovi (tabela 2), fluktuacije u njihovim snagama injektiranja se u velikoj meri međusobno poništavaju (uporediti slike 5 i 7, kao i slike 6 i 8) i ne utiču na tokove snaga u mreži pa time i na vrednost kriterijumske funkcije, zato ne treba čuditi razlika između dijagrama opterećenja i snage PV sistema. Ipak, potrebno je istaći da je potpuno uklanjanje fluktuacija, posebno u snazi ESS gde je postavljen dodatni uslov o istom nivou napunjenosti na početku i kraju dana, veoma teško ispuniti korišćenim pristupom u kome se pojedinačne jednočasovne snage PV sistema i ESS posmatraju kao upravljačke veličine u GA. Uvažavajući navedeno kao i rezultate iz tabela 2 i 3 može se zaključiti da se drugim pristupom vrši nepotrebno predimenzionisanje PV sistema, ukoliko ne postoji dodatna lokalna potrošnja koju napaja.

Na slikama 7 i 8 su prikazane srednje jednočasovne snage ESS u toku dana, za oba pristupa pri određivanju snage PV sistema, u slučaju priključenja jednog PV sistema i jednog ESS, za prvi i treći slučaj opterećenja distributivne mreže, respektivno.

Uzimajući u obzir da je snaga ESS veća od nule kada se taj sistem prazni, a manja od nule kada se on puni, na osnovu slika 7 i 8 može se zaključiti da ESS predaje snagu mreži (prazni se) u periodima kada PV sistem ne proizvodi električnu energiju, i obrnuto. Drugim rečima, ESS se puni u periodima malog i prazni u periodima velikog ekvivalentnog opterećenja (opterećenje umanjeno za snagu proizvodnje PV sistema).



**Slika 9.** Naponski profil distributivne mreže, bez, sa jednim parom i sa dva para PV sistema i ESS

Takođe, slike 7 i 8 pokazuju da iako po obliku veoma slične, veće snage punjenja i pražnjenja ESS se dostižu u slučaju drugog dijagrama opterećenja (treći slučaj) i pri prvom pristupu u određivanju snage PV sistema. Ovo je posledica boljeg poklapanja proizvodnje PV sistema sa prvim dijagramom

opterećenja, kao i veće fleksibilnosti snage PV sistema u drugom pristupu.

Slika 9 prikazuje najlošiji satni naponski profil distributivne mreže u toku dana, pre, nakon priključenja jednog i nakon priključenja dva PV sistema i dva ESS, za prvi slučaj opterećenja distributivne mreže.

Na slici 9 je prikazano poboljšanje naponskog profila distributivne mreže koje se ostvaruje priključenjem jednog, odnosno dva para PV sistema i ESS. Odakle se vidi i još jednom potvrđuje da poboljšanje naponskog profila ostvareno priključenjem drugog para PV sistema i ESS nije zanemarljivo. Iako to nije direktno prikazano, priključenje PV sistema i ESS je rasteretilo napojne deonice distributivne mreže, tako da ni u jednom razmatranom slučaju struja distributivnih vodova ne prelazi svoju maksimalnu dozvoljenu vrednost.

## VI ZAKLJUČAK

U ovom radu je sagledan uticaj PV sistema i ESS na rad distributivne mreže, sa aspekta smanjenja gubitaka i poboljšanja naponskog profila. U ovu svrhu su, korišćenjem metaheurističke optimizacione metode GA, određene optimalne lokacije i snage PV sistema i ESS za različite vremenske i prostorne raspodele opterećenja u distributivnoj mreži. Dobijeni rezultati su pokazali da se priključenjem PV sistema i ESS mogu značajno smanjiti gubici i poboljšati naponski profil distributivne mreže, nezavisno od oblika dijagrama opterećenja i njegovog rasporeda u mreži. Ovo poboljšanje rada distributivne mreže je veće u slučaju priključenja većeg broja PV sistema i ESS. Takođe, rezultati pokazuju da je potreban manji energetska kapacitet ESS ukoliko je poklapanje između proizvodnje PV sistema i potrošnje veće ili ukoliko se koristi PV sistem većih snaga sa mogućnošću upravljanja snagom injektiranja u mrežu.

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Rajaković, N., Tasić, D. *Distributivne i industrijske mreže*, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [2] Mijailović, V. *Distribuirani izvori energije*, Akademska misao, Beograd, 2011.
- [3] Ortiz, J., Kasmaei, M., Lehtonen, M., Mantovani, J. Optimal location-allocation of storage devices and renewable-based DG in distributed systems, *Electric Power System Research*, Vol. 172, pp. 11-21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.02.013>
- [4] Radosavljević, J. Voltage regulation in LV distribution networks with PV generation and battery storage, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 72, No. 6, pp. 356-365, 2021. <https://doi.org/10.2478/jee-2021-0051>
- [5] Wong, L., Shareef, H., Mohamed, A., Ibrahim, A. Optimal placement and sizing of energy storage system in distributed network with photovoltaic based distributed generation using improved firefly algorithms, *International Journal of Energy and Power Engineering* Vol. 11, No. 9, pp. 895-903, 2017. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1131635>
- [6] Sabarinath, G., Gowri Manohar, T., Sudhakara Reddy, A. Voltage control and power loss reduction in distributed networks using distributed generation, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* Vol. 8, No. 12, 2019. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3047.1081219>
- [7] Adetunji, K., Hofsajer, I., Abu-Mahfouz, A., Cheng, L. A review of metaheuristic techniques for optimal integration of electrical units in distribution network, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 5046-5048, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048438>
- [8] Jannat, M., Savić, A., Proračun optimalnih tokova snaga primenom genetičkog algoritma, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. XVII, No. 3-4, pp. 107-111, 2015.



- [9] Radosavljević, J. *Metaheuristic optimization in power engineering*, Institution of Engineering and Technology, London, 2018.
- [10] Stevanović, M., Janjić, A., Stojanović, S., Tasić, D. Optimal battery storage location and control in distribution network, *Facta-universitatis – series: Electronics and Energetics*, Vol. 35, No. 1, pp. 121-136, 2022. <https://doi.org/10.2298/FUEE2201121S>
- [11] Seyednouri, S., Ebrahimian, H., Jalili, A. Power loss reduction and voltage profile improvement by photovoltaic generation, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 192-196, 2015. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V20P236>

AUTORI/AUTHORS

**msr Nikola Krstić** - asistent, Elektronski Fakultet Univerziteta u Nišu, nikola.krstic@elfak.ni.ac.rs, ORCID [0000-0003-2872-3190](https://orcid.org/0000-0003-2872-3190)  
**dr Dragan Tasić** - redovni profesor, Elektronski Fakultet Univerziteta u Nišu, dragan.tasic@elfak.ni.ac.rs, ORCID [0000-0001-5957-9617](https://orcid.org/0000-0001-5957-9617)  
**dr Dardan Klimenta** - redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, dardan.klimenta@pr.ac.rs, ORCID [0000-0003-0019-8371](https://orcid.org/0000-0003-0019-8371)