



OPTIMALNA LOKACIJA I KONFIGURACIJA SISTEMA SAČINJENOG OD FOTONAPONSKOG I SISTEMA ZA SKLADIŠTENJE ENERGIJE UZIMAJUĆI U OBZIR SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

OPTIMAL LOCATION AND CONFIGURATION OF THE SYSTEM CONSISTING OF PHOTOVOLTAIC AND ENERGY STORAGE SYSTEM CONSIDERING THE REDUCTION OF LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORK

Nikola KRSTIĆ, Elektronski fakultet Niš, Srbija
Dragan TASIĆ, Elektronski fakultet Niš, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu je predstavljena dvostepena procedura za određivanje optimalne lokacije i konfiguracije sistema sačinjenog od fotonaponskog (PV) i sistema za skladištenje energije (ESS) uzimajući u obzir smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži. U prvom koraku je uvažavajući dnevni dijagram opterećenja, a korišćenjem metaheurističke optimizacione metode roja čestica (PSO), određena optimalna lokacija i optimalna snaga u toku dana sistema sačinjenog od PV sistema i ESS kako bi se minimizovali gubici u distributivnoj mreži. U drugom koraku procedure, izvršena je konfiguracija PV sistema i ESS korišćenjem vrednosti zbirne snage ova dva sistema u toku dana dobijenih u prvom koraku i oblika dnevnog dijagrama proizvodnje PV sistema. Postupak konfiguracije je detaljno objašnjen, a u okviru njega je određena potrebna maksimalna snaga PV sistema, energetska kapacitet ESS, kao i njihove pojedinačne snage u toku dana. U radu su razmatrani slučajevi sa različitim dijagramima opterećenja i različitim nivoima efikasnosti ESS, a na osnovu dobijenih rezultata izvedeni su odgovarajući zaključci.

Ključne reči: fotonaponski (PV) sistem, sistem za skladištenje energije (ESS), optimizaciona metoda roja čestica (PSO), gubici u distributivnoj mreži.

ABSTRACT

In this paper two-step procedure for determining the optimal location and configuration of the system consisting of photovoltaic (PV) and energy storage system (ESS), considering the reduction of losses in distribution network, is presented. First step takes into account the daily load diagram and uses the metaheuristic particle swarm optimization method (PSO) to determine the optimal location and optimal power during the day of the system consisting of PV system and ESS to minimize the losses in distribution network. In the second step of the procedure, the configuration of PV system and ESS is performed using the values of combined power of these two systems during the day, obtained in the first step, and the shape of daily diagram of the PV system generation. The configuration procedure is explained in detail, determining the maximum power of PV system, energy capacity of ESS, as well as their individual powers during the day. The paper considers cases with different load diagrams and different levels of ESS efficiency, and based on the obtained results gives appropriate conclusions.

Key words: photovoltaic (PV) system, energy storage system (ESS), particle swarm optimization method (PSO), losses in distribution network.

1. UVOD

Povećanje ekološke svesti je dovelo do toga da poboljšanje efikasnosti i korišćenje zelenih tehnologija postanu jedni od osnovnih zahteva i prioriteta koji se postavljaju prilikom razmatranja rada elektroenergetskog sistema. U ostvarenju ovih zahteva značajnu ulogu igraju obnovljivi izvori energije, koji se na sve moguće načine pokušavaju implementirati u elektroenergetski sistem i poboljšati njegov rad. Jedan posebno važan vid njihove primene je priključenje na distributivnu mrežu (1) gde imaju ulogu distribuirane proizvodnje. Ovime obnovljivi izvori energije približavaju proizvodnju potrošnji, smanjujući gubitke u prenosu, ali zbog intermitentnog karaktera njihove proizvodnje često nisu u mogućnosti ostvariti potrebnu snagu koja bi donela željeno povećanje efikasnosti mreže. Jedno od rešenja ovog problema, posebno u slučajevima gde distribuirana proizvodnja i opterećenje u većoj meri nisu usaglašeni, jeste korišćenje ESS (2)-(3). Uzimajući u obzir gore navedeno, u ovom radu je razmatrano poboljšanje efikasnosti rada distributivne mreže, odnosno smanjenje gubitaka u njoj, korišćenjem sistema koji se sastoji od PV sistema i ESS (4). Sistemi od kojih je sastavljen omogućavaju mu da se prema distributivnoj mreži ponaša kao distribuirana proizvodnja sa mogućnošću upravljanja izlaznom snagom (5)-(6). Ovom snagom sistem ostvaruje rasterećenje određenih deonica distributivne mreže, posebno onih napojnih, smanjujući gubitke u njima. Za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži, u ovom slučaju, je potrebno ispravno locirati pomenuti sistem i u svakom trenutku obezbediti adekvatnu vrednost njegove izlazne snage (7). Tokovi snaga u distributivnoj mreži i struje u njenim vodovima su određene iterativnom metodom za proračun tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama (8). Optimalna lokacija i snaga koju sistem sačinjen od PV sistema i ESS je potrebno da injektira u distributivnu mrežu kako bi minimizovao gubitke u njoj (9)-(10) su određene korišćenjem PSO optimizacione metode (11). Na osnovu dobijene optimalne snage sistema u toku dana i dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema, vrši se optimalna konfiguracija pomenutog sistema, odnosno dimenzionisanje PV sistema i ESS u okviru njega (12). Ovde se određuje potrebna maksimalna snaga PV sistema i potreban energetska kapacitet ESS, kao i njihove pojedinačne snage u toku dana za različite dijagrame i tipove opterećenja, koristeći različite stepene efikasnosti ESS. Za generisanje svih rezultata, u radu je korišćena IEEE distributivna mreža sa 33 čvora.

2. DEFINISANJE OPTIMIZACIONOG PROBLEMA I KRITERIJUMSKA FUNKCIJA

Smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži korišćenjem sistema sačinjenog od PV sistema i ESS predstavlja nelinearni optimizacioni problem sa ograničenjima. Nelinearnost proizilazi iz nelinearne zavisnosti gubitaka distributivne mreže i korišćenih ograničenja od snage injektiranja pomenutog sistema.

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

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

$$P_{min}^k < P^k < P_{max}^k \quad (2)$$

gde je i indeks čvora u distributivnoj mreži u kome je priključen sistem sačinjen od PV sistema i ESS, dok je P^k srednja jednočasovna snaga koju ovaj sistem injektira u distributivnu mrežu u k -tom satu. Skup indeksa čvorova u kojima je moguće priključiti sistem sačinjen od PV sistema i ESS je dat kao $\{i_1, i_2, \dots, i_n\}$, a P_{min}^k i P_{max}^k su njegova minimalna i maksimalna snaga u k -tom satu, koje su određene minimalnim i maksimalnim snagama PV sistema i ESS u k -tom satu ($P_{min}^k = P_{PVmin}^k + P_{ESSmin}^k$, $P_{max}^k = P_{PVmax}^k + P_{ESSmax}^k$).

Zavisne veličine koje se pojavljuju u ovom optimizacionom problemu su snage PV sistema i ESS, nivo napunjenosti ESS, struja duž vodova distributivne mreže i napon u njenim čvorovima.

Ograničenja zavisnih veličina su određena minimalnim i maksimalnim snagama PV sistema i ESS, maksimalnom radnom strujom i dozvoljenim opsegom napona distributivnih vodova, kao i dozvoljenim opsegom nivoa napunjenosti ESS, što je dato relacijama (3)-(7):

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

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

$$I < I_{max} \quad (5)$$

$$V_{min} < V < V_{max} \quad (6)$$

$$SOC_{max} < SOC < SOC_{max} \quad (7)$$

gde su I i V struja i napon u distributivnoj mreži, dok je SOC nivo napunjenosti ESS.

Snage P_{PV}^k i P_{ESS}^k predstavljaju srednje jednočasovne snage PV sistema i ESS u k -tom satu, koje kao i ostale veličine moraju biti između svojih minimalnih ($P_{PVmin}^k, P_{ESSmin}^k$) i maksimalnih vrednosti ($P_{PVmax}^k, P_{ESSmax}^k$). Granične vrednosti za snage ESS (maksimalna snaga punjenja i maksimalna snaga pražnjenja) su usvojene tako da ne predstavljaju ograničavajući faktor za dobijanje optimalnog rešenja i imaju istu vrednost u toku celog dana. Za razliku od toga, 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}^k je jednaka nuli za svaki sat u toku dana.

Kako bi dobijeni radni režimi ESS bili održivi u vremenu, kod svih razmatranih slučajeva nivoi napunjenosti ESS na početku ($SOC_{početak}$) i kraju (SOC_{kraj}) radnog ciklusa (dana) su jednaki. U ovu svrhu je usvojeno dodatno ograničenje vezano za nivo napunjenosti ESS, uvaženo realcijom (8):

$$SOC_{kraj} - SOC_{početak} = 0 \quad (8)$$

Rešenje optimizacionog problema je potrebno da omogući minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži. Iz ovog razloga je korišćena jednoparameterska kriterijumska funkcija jednaka srednjoj dnevnoj snazi gubitaka distributivne mreže, data relacijom (9):

$$C = \frac{1}{24} \cdot \sum_{k=1}^{24} \sum_{j=1}^m 3I_{k,j}^2 R_j \quad (9)$$

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, m – ukupan broj deonica distributivne mreže.

3. REŠAVANJE OPTIMIZACIONOG PROBLEMA I ODREĐIVANJE OPTIMALNE KONFIGURACIJE SISTEMA SAČINJENOG OD PV SISTEMA I ESS

U cilju dobijanja optimalne lokacije i konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS potrebno je prvo rešiti postavljeni optimizacioni problem. Rešavanje ovog optimizacionog problema se svodi na nalaženje optimalnih vrednosti za lokaciju i snagu sistema sačinjenog od PV sistema i ESS tako da se ostvari minimizacija gubitaka u distributivnoj mreži. Za dobijanje optimalne lokacije i optimalnih srednjih jednočasovnih snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS u toku dana, u ovom radu je korišćena metaheuristička optimizaciona metoda PSO. Prednost PSO i metaheurističkih optimizacionih metoda uopšte je njihova fleksibilnost i mogućnost primene na širokom opsegu različitih optimizacionih problema.

3.1 Rešavanje optimizacionog problema

Kao što je rečeno, PSO je korišćen za rešavanje postavljenog optimizacionog problema. PSO spada u populacione metaheurističke optimizacione metode i inspirisan je procesom traženja hrane jata ptica u prirodi. Populacija se sastoji od skupa jedinki, od kojih svaka predstavlja vektor upravljačkih veličina i potencijalno rešenje optimizacionog problema. Jedinke u populaciji komuniciraju međusobno i kreću se prema onoj koja je na mestu sa najvećom količinom hrane, odnosno koja ima najnižu vrednost kriterijumske funkcije. U cilju bolje pretrage prostora u kojem se može naći optimalno rešenje, na smer kretanja jedinke ne utiče samo lokacija sa najvećom količinom hrane do tada pronađena (g_{best}), već i lokacija sa najvećom količinom hrane koju je ta jedinka do tada pronašla (p_{best}). Na ovaj način u svakoj sledećoj iteraciji jedinke su bliže nalaženju mesta sa najvećom količinom hrane, a time i najmanjom vrednošću kriterijumske funkcije. Jedinka koja na kraju ima najmanju vrednost kriterijumske funkcije ujedno predstavlja i rešenje optimizacionog problema. Navedena optimizaciona metoda se analitički može opisati preko relacija (10) i (11):

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + C_1 \cdot r_1 \cdot (p_{best_i}(t) - x_i(t)) + C_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best}(t) - x_i(t)) \quad (10)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (11)$$

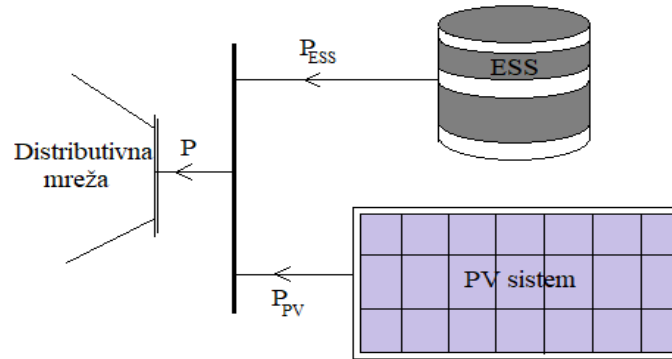
gde je: t – redni broj iteracije, x_i – lokacija i -te jedinke, v_i – pomeraj i -te jedinke, w – koeficijent inercije, C_1, C_2 – koeficijenti ubrzanja, r_1, r_2 – slučajni brojevi iz intervala $[0,1]$.

Kod rešavanja navedenog optimizacionog problema jedinku predstavlja vektor upravljačkih veličina sa 25 koordinata, od kojih je prva lokacija (indeks čvora u distributivnoj mreži u kojem se vrši priključenje sistema), a ostale 24 koordinate predstavljaju srednje jednočasovne snage posmatranog sistema u toku dana. Nakon svake

iteracije menjaju se koordinate jedinki u cilju smanjenja vrednosti njihovih kriterijumskih funkcija, što posle odgovarajućeg broja iteracija (kada je promena kriterijumske funkcije najboljeg rešenja zanemarljiva) daje rešenje optimizacionog problema. Kao deo rešenja optimizacionog problema, direktno je dobijena optimalna lokacija sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, dok su dobijene optimalne snage iskorišćene za određivanje optimalne konfiguracije sistema.

3.2 Određivanje optimalne konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS

U ovom radu je za optimalnu konfiguraciju sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, čija je principijelna šema prikazana na slici 1, usvojena, ona konfiguracija koja može da obezbedi minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži uz minimalno dimenzionisanje PV sistema i ESS.



Slika 1 - Principijelna šema sistema sačinjenog od PV sistema i ESS

Za određivanje optimalne konfiguracije iskorišćena je dobijena optimalna snaga, koju pomenuti sistem treba injektirati u distributivnu mrežu u toku dana kako bi minimizovao gubitke u njoj, kao i dnevni dijagram sunčeve iradijacije panela PV sistema. U korišćenom pristupu prvi korak u određivanju optimalne konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS je dimenzionisanje PV sistema, odnosno određivanje njegove maksimalne snage. Kako bi ovo bilo moguće, potrebno je izraziti snagu PV sistema za svaki sat u toku dana preko njegove maksimalne snage (P_{PVmax}) i sunčeve iradijacije u toku dana:

$$P_{PV}(h) = P_{PVmax} \frac{I_C(h)}{I_{Cmax}} \quad (12)$$

gde su $P_{PV}(h)$ i $I_C(h)$ snaga i sunčeva iradijacija PV sistema u h -tom satu, dok je I_{Cmax} maksimalna sunčeva iradijacija PV sistema u toku dana. Snaga PV sistema prati dnevni dijagram sunčeve iradijacije njegovih panela, zbog čega najčešće ovaj sistem nije u stanju da sam ispuni traženu optimalnu snagu. Za rešavanje ovog problema iskorišćen je ESS koji u skladu sa potrebama može imati ulogu potrošnje (period punjenja) ili proizvodnje (period pražnjenja) čime obezbeđuje da snaga koja se injektira u distributivnu mrežu bude jednaka optimalnoj (P_{opt}).

$$P_{ESS} = P_{opt} - P_{PV} \quad (13)$$

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 (14) i (15) respektivno:

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{\eta}{Q_{ESS}} P_{ESS}(k) \quad (14)$$

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{1}{\eta Q_{ESS}} P_{ESS}(k) \quad (15)$$

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, računski energetska kapacitet ESS, η – stepen efikasnosti procesa punjenja i pražnjenja ESS.

Zamenom izraza (12) u (13), a zatim izraza (13) u (14) i (15), razlika između nivoa napunjenosti ESS na kraju i početku posmatranog perioda (ΔSOC) se može odrediti kao:

$$\Delta SOC = \sum_j^m \left(P_{PVmax} \frac{I_C(j)}{I_{Cmax}} - P_{opt}(j) \right) \frac{\eta}{Q_{ESS}} - \sum_i^n \left(P_{opt}(i) - P_{PVmax} \frac{I_C(i)}{I_{Cmax}} \right) \frac{1}{\eta Q_{ESS}} \quad (16)$$

gde je i redni broj sati, a n ukupan broj sati kada dolazi do pražnjenja ESS, dok je j redni broj sati, a m ukupan broj sati kada dolazi do punjenja ESS u posmatranom radnom ciklusu.

Periodi punjenja ESS nastaju kada je tražena optimalna snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS manja, a periodi pražnjenja kada je ona veća od snage PV sistema. Kako unapred nije poznata maksimalna snaga PV sistema, ovi periodi se moraju pretpostaviti sagledavanjem oblika dijagrama optimalne snage i dijagrama sunčeve iradijacije. Koristeći pretpostavljene vrednosti za periode punjenja i pražnjenja, za zadati stepen efikasnosti i nultu razliku između nivoa napunjenosti ESS na kraju i početku, maksimalna snaga PV sistema na osnovu izraza (16) je:

$$P_{PVmax} = \frac{\sum_j^m P_{opt}(j) \eta + \sum_i^n P_{opt}(i) \frac{1}{\eta}}{\sum_j^m \frac{I_C(j)}{I_{Cmax}} \eta + \sum_i^n \frac{I_C(i)}{I_{Cmax}} \frac{1}{\eta}} \quad (17)$$

Nakon određivanja maksimalne snage PV sistema na osnovu izraza (17), potrebno je proveriti tačnost načinjene pretpostavke o periodima punjenja i pražnjenja ESS. Ovo se vrši upoređivanjem optimalne snage sistema sačinjenog od PV sistema i ESS sa snagom PV sistema određenom na osnovu njegove maksimalne snage koristeći izraz (12). Ukoliko se ispostavi da pretpostavka nije tačna potrebno je ponoviti navedeni postupak koristeći nove, bolje procenjene periode punjenja i pražnjenja. Potrebno je istaći da ukoliko je stepen efikasnosti ESS jednak jedinici, situacija je znatno jednostavnija jer nije potrebno pretpostavljati periode punjenja i pražnjenja, pa se maksimalna snaga PV sistema dobija direktno.

Kada je poznata maksimalna snaga PV sistema, koristeći izraze (12) i (13) moguće je odrediti snagu ESS za svaki sat posmatranog perioda. Nakon toga, pomoću izraza (14) i (15), određuju se nivoi napunjenosti ESS na kraju svakog sata u posmatranom periodu rada. Na osnovu dobijenih vrednosti nivoa napunjenosti ESS vrši se njegovo dimenzionisanje, odnosno određivanje potrebnog energetskog kapaciteta. Minimalni potrebni energetski kapacitet (ΔQ_{ESS}) koji bi omogućio navedeni režim rada ESS se određuje pomoću izraza (18):

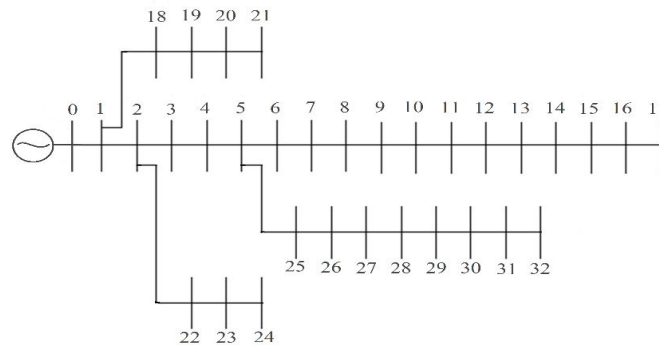
$$\Delta Q_{ESS} = Q_{ESS} \cdot (SOC_{max} - SOC_{min}) \quad (18)$$

gde je SOC_{max} i SOC_{min} maksimalni i minimalni nivo napunjenosti ESS u posmatranom periodu rada.

4. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Svi rezultati dobijeni u ovom radu se odnose na IEEE radijalnu distributivnu mrežu sa 33 čvora, prikazanu na slici 2. Usvojeno je isto rastojanje između svaka dva susedna čvora i ono iznosi 250 m. Ovo je urađeno radi jednostavnosti izvođenja opštih zaključaka. Naponski nivo distributivne mreže je 10 kV, dok vrednosti dužne aktivne otpornosti i reaktanse iznose $r = 0,414 \Omega/km$ i $x = 0,365 \Omega/km$.

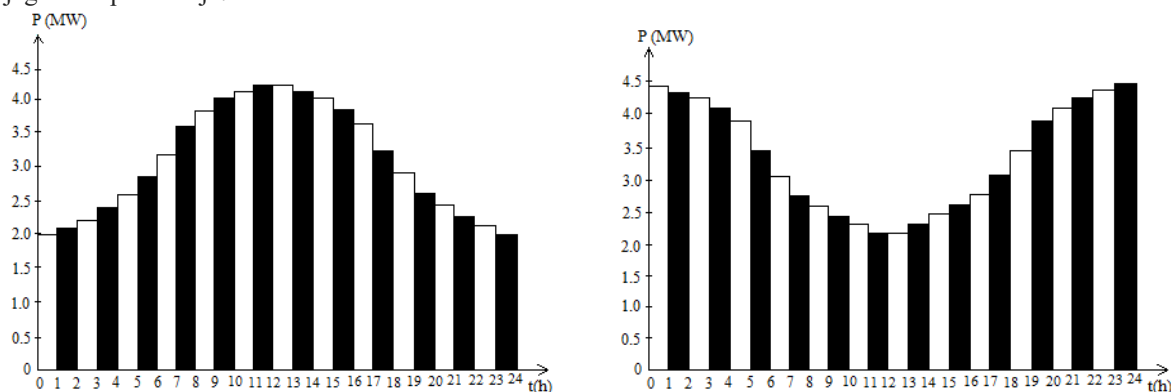
PSO optimizaciona metoda je realizovana tako da je optimalno rešenje dobijeno posle 100 iteracija korišćenjem populacije od 200 jedinki. Na osnovu većeg broja izvršenih simulacija usvojene su vrednosti koeficijenta inercije i koeficijenta ubrzanja koje daju najbolje rezultate, a one su: $w = 0.85$, $C_1 = 0.5$ i $C_2 = 0.6$.



Slika 2 - IEEE 33 distributivna mreža

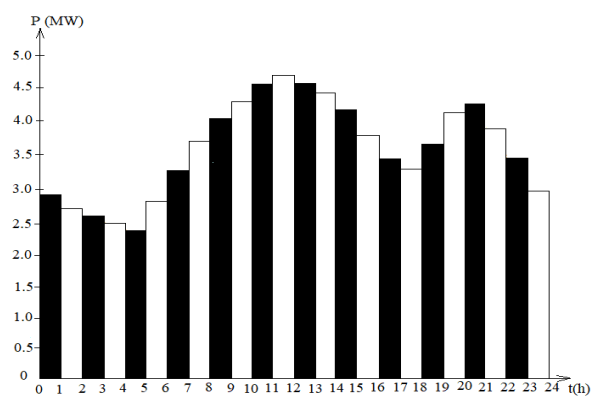
Razmatrana su tri različita dijagrama opterećenja distributivne mreže, prikazana na slikama 3 i 4. Oblici prva dva dijagrama opterećenja imaju više teorijski karakter i odabrani su kao primeri opterećenja koje se u većoj ili manjoj meri poklapa sa dijagramom snage PV sistema, odnosno dijagramom sunčeve iradijacije. Kao što se

može videti sa slike 3, prvi i drugi dijagram opterećenja distributivne mreže imaju različite raspodele snage opterećenja u vremenu, ali istu maksimalnu ($P_{max1,2} = 4,462MW$) i srednju snagu ($P_{sr1,2} = 3,285MW$). Za razliku od njih, oblik trećeg dijagrama opterećenja, prikazanog na slici 4, nešto bolje opisuje opterećenje koje se može naći u praksi i ima nešto veću maskimalnu ($P_{max3} = 4,75MW$) i srednju snagu ($P_{sr3} = 3,635MW$). U svim razmatranim slučajevima je korišćena uniformna raspodela opterećenja po čvorovima distributivne mreže. Takođe, za svaki dijagram opterećenja sagledana su dva slučaja, u prvom je opterećenje tipa konstantne snage (industrijsko opterećenje), a u drugom je ono tipa konstantne impedanse (rezistivno opterećenje), pri čemu su za naznačeni napon distributivne mreže (10 kV) aktivne snage kod oba tipa opterećenja iste i jednake onima sa dijagrama opterećenja.



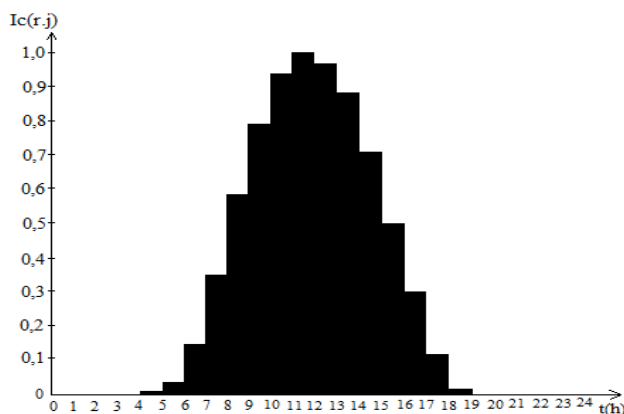
Slika 3 - Prvi (levo) i drugi (desno) dijagram opterećenja distributivne mreže

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, pri čemu mu vrednost iznosi $\cos\varphi = 1$ i $\cos\varphi = 0.89$ za rezistivni i industrijski tip opterećenja, respektivno.



Slika 4 - Treći dijagram opterećenja distributivne mreže

Dnevni dijagram sunčeve iradijacije panela PV sistema, korišćen pri određivanju snage PV sistema, izražen u relativnim jedinicama, je dat na slici 5.



Slika 5 - Dnevni dijagram sunčeve iradijacije panela PV sistema

U tabeli 1 su prikazane vrednosti srednje dnevne snage gubitaka u distributivnoj mreži pre priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, za sva tri dijagrama opterećenja, pri čemu se vrednosti u zagradama odnose na slučaj opterećenja konstantne impedanse, a vrednosti koje u njima nisu na slučaj opterećenja konstantne snage.

Tabela 1 - Srednja dnevna snaga gubitaka pre priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS

Dijagram opterećenja	I	II	III
P_{QSR} [kW]	15,762 (11,502)	15,762 (11,502)	18,986 (13,770)

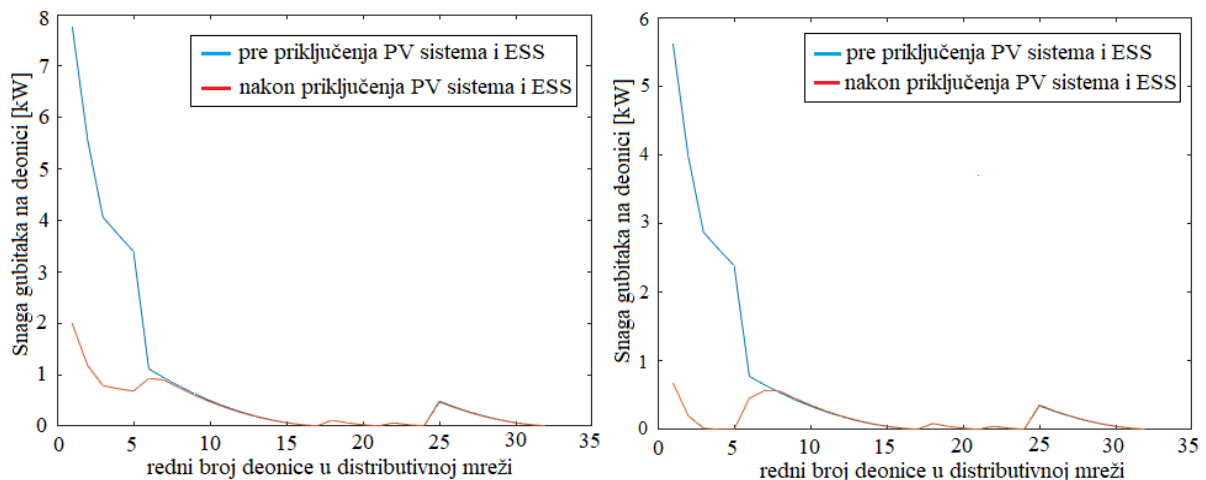
Rezultati iz tabele 1 su očekivani, sobzirom da su snage prvog i drugog dijagrama opterećenja, iako vremenski različito raspoređene, iste po vrednostima i nešto manje nego u slučaju trećeg dijagrama opterećenja. Takođe, činjenica da su naponi čvorova mreže nešto manji od naznačenog, kao i postojanje tokova reaktivnih snaga u mreži u slučaju opterećenja konstantne snage, za posledicu ima pojavu većih gubitaka za taj tip opterećenja. Uzimajući u obzir dobijene optimalne lokacije i snage sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, tabela 2 sadrži rezultate dobijene nakon njegovog priključenja na distributivnu mrežu. Ovi rezultati pored srednje dnevne snage gubitaka (P_{QSR}), sadrže optimalnu lokaciju (indeks čvora distributivne mreže) u kojoj je sistem sačinjen od PV sistema i ESS priključen (i), kao i potrebnu maksimalnu snagu PV sistema (P_{PVmax}) i potreban energetska kapacitet ESS (ΔQ_{ESS}) za različite stepene efikasnosti ESS ($\eta=1, \eta=0.95, \eta=0.9, \eta=0.85$ i $\eta=0.8$). Važno je istaći da u izloženom postupku stepen efikasnosti ESS ne utiče na lokaciju i snagu sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, već samo na njegovu konfiguraciju (maksimalnu snagu PV sistema i energetska kapacitet ESS).

Tabela 2 - Srednja dnevna snaga gubitaka nakon priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, mesto priključenja i parametri sistema za različite stepene efikasnosti ESS

Dijagram opterećenja	I	II	III
P_{QSR} [kW]	5,999 (2,809)	5,999 (2,809)	7,219 (3,369)
i	6 (7)	6 (7)	6 (7)
P_{PVmax1} [MW]	7,782 (7,068)	7,782 (7,068)	8,621 (7,817)
ΔQ_{ESS1} [MWh]	24,743 (22,575)	37,208 (33,700)	29,717 (27,026)
$P_{PVmax0,95}$ [MW]	8,144 (7,399)	8,329 (7,564)	9,058 (8,214)
$\Delta Q_{ESS0,95}$ [MWh]	25,775 (23,521)	38,989 (35,312)	31,113 (28,290)
$P_{PVmax0,9}$ [MW]	8,560 (7,778)	8,964 (8,139)	9,564 (8,675)
$\Delta Q_{ESS0,9}$ [MWh]	26,930 (24,575)	40,937 (37,076)	32,667 (29,703)
$P_{PVmax0,85}$ [MW]	9,040 (8,217)	9,706 (8,811)	10,156 (9,213)
$\Delta Q_{ESS0,85}$ [MWh]	28,174 (25,711)	43,075 (39,012)	34,372 (31,254)
$P_{PVmax0,8}$ [MW]	9,601 (8,728)	10,579 (9,601)	10,853 (9,846)
$\Delta Q_{ESS0,8}$ [MWh]	29,542 (26,967)	45,428 (41,144)	36,251 (32,962)

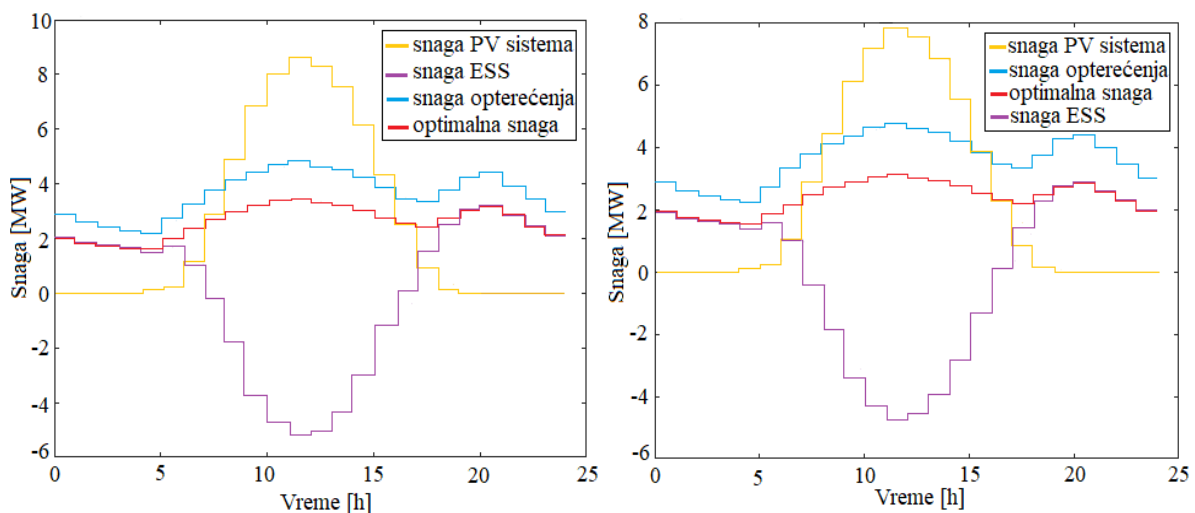
Na osnovu rezultata iz tabele 2 može se zaključiti da se priključenjem sistema sačinjenog od PV sistema i ESS mogu znatno smanjiti gubici u distributivnoj mreži. Kako je srednja snaga gubitaka nakon priključenja ista za prvi i drugi dijagram opterećenja, a nešto veća kod trećeg, konstatuje se da na visinu gubitaka nakon priključenja utiče vrednost snage opterećenja, a ne njen raspored u vremenu. Takođe, iz tabele 2 da se primetiti da optimalna lokacija sistema sačinjenog od PV sistema i ESS ne zavisi od dijagrama opterećenja, i da je za sva tri dijagrama opterećenja to čvor 6 u slučaju opterećenja konstantne snage, i čvor 7 u slučaju opterećenja konstantne impedanse. Blagim pomeranjem mesta priključenja napojnom čvoru mreže kod opterećenja konstantne snage,

postiže se dodatno smanjenje gubitaka u napojnim deonicama mreže, koji su uvećani postojanjem tokova reaktivnih snaga. Pored toga, tabela 2 pokazuje da vrednost maksimalne snage PV sistema raste sa povećanjem srednje dnevne snage opterećenja, dok je uticaj oblika dijagrama opterećenja veći ukoliko je efikasnost ESS manja (za jediničnu efikasnost ne postoji). Za energetski kapacitet ESS od najvećeg značaja je poklapanje dijagrama opterećenja sa dijagramom proizvodnje PV sistema, što se pokazuje daleko većim energetskim kapacitetom ESS u slučaju drugog nego u slučaju prvog dijagrama opterećenja. Kao i maksimalna snaga PV sistema i potreban energetski kapacitet se povećava sa smanjenjem efikasnosti ESS. Ovo proizilazi iz činjenice da je za istu injektiranu snagu potrebna veća snaga pražnjenja ESS, kao i da je za istu snagu punjenja ESS potrebna veća snaga koja dolazi iz PV sistema, ukoliko dođe do smanjenja efikasnosti ESS. Navedena zapažanja važe za oba tipa opterećenja, pri čemu su nešto veće vrednosti maksimalnih snaga PV sistema i energetskih kapaciteta ESS kod opterećenja konstantne snage posledica nešto bližeg priključenja sistema napojnom čvoru. Na slici 6 su prikazane maksimalne jednočasovne snage gubitaka na deonicama distributivne mreže pre i nakon priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, za oba razmatrana tipa opterećenja koja prate treći dijagram opterećenja. Indeksi (redni brojevi) deonica su jednaki indeksima čvorova na njihovim krajevima.



Slika 6 - Maksimalna jednočasovna snaga gubitaka na deonicama distributivne mreže pre i nakon priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS za opterećenje konstantne snage (levo) i konstantne impedanse (desno).

Na osnovu slike 6 može se zaključiti da se priključenjem jednog sistema sačinjenog od PV sistema i ESS najveće smanjenje gubitaka ostvaruje na napojnim deonicama distributivne mreže odakle se granaju više njenih ogranaka i gde su gubici snage najveći. Takođe, može se uočiti da su gubici u napojnim deonicama veći u slučaju opterećenja konstantne snage, zbog postojanja tokova reaktivnih snaga na koje se značajnije nije moglo uticati. Slika 7 prikazuje aktivnu snagu opterećenja (treći dijagram opterećenja), optimalnu (radnu) snagu sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, kao i snage PV sistema i ESS pojedinačno za jedinični stepen efikasnosti ESS.



Slika 7 - Snaga opterećenja, optimalna snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, snaga PV sistema i snaga ESS, za slučaj opterećenja konstantne snage (levo) i konstantne impedanse (desno)

Na slici 7 se može videti da optimalna (radna) snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS prati oblik snage opterećenja, i u periodima velike sunčeve iradijacije je obezbeđena iz PV sistema, dok noću i u periodima sa malom sunčevom iradijacijom nju generiše ESS. Kao što je i očekivano, u periodima velike sunčeve iradijacije vrši se dopuna ESS, dok se u periodima sa malom sunčevom iradijacijom odvija njegovo pražnjenje.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena metoda za određivanje optimalne lokacije i konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS u cilju smanjenja gubitaka u distributivnoj mreži. Dobijeni rezultati su pokazali da se priključenjem ovakvog sistema mogu značajno smanjiti gubici u distributivnoj mreži, nezavisno od oblika dijagrama opterećenja i njegovog tipa. Takođe, na osnovu rezultata se može zaključiti da najveći uticaj na dimenzionisanje PV sistema, odnosno na njegovu maksimalnu snagu ima srednja dnevna snaga opterećenja, dok energetska kapacitet ESS u najvećoj meri zavisi od poklapanja dijagrama opterećenja sa dijagramom proizvodnje PV sistema. Upoređivanjem rezultata za različite stepene efikasnosti ESS može se ustanoviti, da smanjenje efikasnosti ESS dovodi do povećanja maksimalne snage PV sistema i povećanja energetskog kapaciteta ESS za isti nivo smanjenja gubitaka u mreži.

LITERATURA

- [1] Rajaković N and Tasić D, 2008, "Distributivne i industrijske mreže", "Akademska misao", Beograd.
- [2] Tang X, Deng K, Wu Q and Feng Y, 2020, "Optimal location and capacity of the distributed energy storage system in a distribution network", "IEEE Access", "Vol. 8", pp. 15576-15585.
- [3] Stevanović M, Janjić A, Stojanović S and Tasić D, 2022, "Optimal battery storage location and control in distribution network", "Facta universitatis – series: Electronics and Energetics", "Vol. 35, No. 1", pp. 121-136.
- [4] Ortiz J, Kasmaei M, Lehtonen M, and Mantovani J, 2019, "Optimal location-allocation of storage devices and renewable-based DG in distributed systems", "Electric Power System Research", "Vol. 172", pp. 11-21.
- [5] Alam A, Gupta A, Bindal P, Siddiqui A and Zaid M, 2018, "Power loss minimization in a radial distribution system with distributed generation", "International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems", Chennai, India, pp. 21-25.
- [6] Das S, Fosso O and Marafioti G, 2021, "Efficient distribution network loss minimization with optimal DG placement and operation", "IEEE 12th Energy Conversion Congress and Exposition – Asia", Singapore.
- [7] Adetunji K, Hofsjajer I, Abu-Mahfouz A and Cheng L, 2020, "A review of metaheuristic techniques for optimal integration of electrical units in distribution network", "IEEE Access", "Vol. 9", pp. 5046-5068.
- [8] Michline J and Ganesh S, 2014, "Power flow analysis for radial distribution system using backward/forward sweep method", "International Journal of Electrical and Computer Engineering", "Vol. 8, No. 10", pp. 1628-1632.
- [9] Wong L, Shareef H, Mohamed A and Ibrahim A, 2017, "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.
- [10] Mahesh K, AL Nallagownden P and AL Elamvazuthi I, 2015, "Optimal placement and sizing od DG in distribution system using accelerated PSO for power loss minimization", "IEEE Conference on Energy Conversion", Johor Bahru, Malaysia.
- [11] Radosavljević, J, 2018, "Metaheuristic optimization in power engineering", "Institution of Engineering and Technology", London.
- [12] Xie Y, Gao B, Li J, Zhou Y and Zheng T, 2021, "Optimal configuration and economic operation of energy storage system considering photovoltaic consumption rate", "E3S Web Conf. 5th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering", "Vol. 257".