

Nikola N. Krstić¹, Dragan S. Tasić¹

Metoda za određivanje optimalne lokacije i konfiguracije sistema sačinjenog od fotonaponskog i sistema za skladištenje energije uzimajući u obzir smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži

¹ Elektronski fakultet u Nišu, Niš, Srbija*

Kategorija rada: originalni naučno-istraživački članak

Ključne poruke

- Ovaj rad razmatra smanjenja gubitaka u distributivnoj mreži priključenjem sistema sačinjenog od fotonaponskog (PV) i sistema za skladištenje energije (ESS).
- Određena je optimalna lokacija i optimalna snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS uvažavajući minimizaciju gubitaka.
- Izvršeno je dimenzionisanje PV sistema i ESS.
- Sagledan je uticaj nepoklapanja stvarnih i očekivanih vrednosti opterećenja i sunčeve iradijacije na povećanje gubitaka u mreži i promenu nivoa napunjenosti ESS.

Kratak sadržaj

U ovom radu je predstavljena dvostepena metoda za određivanje optimalne lokacije i konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS uzimajući u obzir smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži. U prvom koraku je uvažavajući očekivani dnevni dijagram opterećenja distributivne mreže, 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, određene su pojedinačne snage PV sistema i ESS i izvršena je njihova konfiguracija (dimenzionisanje). Ovo je urađeno iterativnim postupkom koristeći vrednosti optimalne zbirne snage ova dva sistema u toku dana dobijene u prvom koraku i oblika dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema u slučaju vedrog dana. Postupak konfiguracije je detaljno objašnjen, a u okviru njega je određena potrebna maksimalna snaga PV sistema, maksimalna snaga ESS kao i energetska kapacitet ESS. Takođe, sagledan je uticaj odstupanja stvarnog od očekivanog dijagrama opterećenja kao i smanjenje sunčeve iradijacije u toku dana na povećanje gubitaka u distributivnoj mreži i promenu nivoa napunjenosti ESS. U radu su razmatrani slučajevi sa različitim dijagramima opterećenja i različitim stepenima efikasnosti ESS. Svi rezultati su dobijeni korišćenjem IEEE radialne distributivne mreže sa 33 čvora.

Ključne reči

Fotonaponski (PV) sistem, sistem za skladištenje energije (ESS),
optimizaciona metoda roja čestica (PSO), gubici u distributivnoj mreži

Primljeno: 5. april 2023. Recenzirano: 25. april 2023.
Izmenjeno: 28. april 2023. Odobreno: 4. maj 2023.

*Korespondirajući autor: Nikola N. Krstić
E - mail: nikola.krstic@elfak.ni.ac.rs

Napomena:

Članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Optimalna lokacija i konfiguracija sistema sačinjenog od fotonaponskog i sistema za skladištenje energije uzimajući u obzir smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži“, nagrađenog u Stručnoj komisiji STK-4 Distribuirana proizvodnja i efikasno korišćenje električne energije, na 13. Savetovanju CIRED Srbija, Kopaonik, 12-16. septembra

1. UVOD

Povećanje ekološke svesti je uslovalo 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 [1]. Jedan posebno važan vid njihove primene je priključenje na distributivnu mrežu [2] gde imaju ulogu distribuirane proizvodnje. Ovime obnovljivi izvori energije približavaju proizvodnju potrošnji smanjujući gubitke u prenosu [3], 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 [4]-[5]. Uzimajući u obzir gore navedeno, u ovom radu je razmatrano poboljšanje efikasnosti rada distributivne mreže, odnosno smanjenje gubitaka u njoj [6], korišćenjem sistema koji se sastoji od PV sistema i ESS [7]. Sistemi od kojih je sastavljen omogućavaju mu da se prema distributivnoj mreži ponaša kao distribuirana proizvodnja sa mogućnošću upravljanja izlaznom snagom [8]-[9]. Ovom snagom sistem ostvaruje rasterećenje određenih deonica distributivne mreže, posebno onih napojnih, smanjujući gubitke u njima. Tokovi snaga u distributivnoj mreži i struje u njenim vodovima su određene iterativnom metodom za proračun tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama [10].

Za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži, u ovom slučaju, potrebno je ispravno locirati pomenuti sistem i u svakom trenutku obezbediti adekvatnu vrednost njegove izlazne snage [8]. Optimalna lokacija i snaga koju je potrebno da u distributivnu mrežu injektira sistem sačinjen od PV sistema i ESS, kako bi minimizovao gubitke u njoj, [3], [11], određene su korišćenjem PSO metaheurističke optimizacione metode, [12]-[15], uvažavajući očekivani dnevni dijagram opterećenja. Na osnovu dobijene optimalne snage sistema u toku dana i dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema u slučaju vedrog dana, određuju se pojedinačne snage PV sistema i ESS i vrši se njihova optimalna konfiguracija, odnosno dimenzionisanje [11], [16]. Ovde se određuje potrebna maksimalna snaga PV sistema, maksimalna snaga ESS i potreban energetska kapacitet ESS, za različite dijagrame i tipove opterećenja, koristeći različite stepene efikasnosti ESS.

Procedura za određivanje konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS je iterativnog tipa kod koje se na osnovu pretpostavljenih vrednosti za periode punjenja/pražnjenja ESS određuje maksimalna snaga PV sistema [17] na osnovu koje se tačnije određuju periodi punjenja/pražnjenja ESS u narednoj iteraciji. Početne vrednosti za periode punjenja/pražnjenja ESS se određuju

na osnovu oblika dnevnog dijagrama opterećenja distributivne mreže i dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema. Iterativni postupak se završava kada u dve susedne iteracije periodi punjenja/pražnjenja ESS imaju istu vrednost. Navedena procedura za određivanje optimalne lokacije i konfiguracije sistema sačinjenog od PV sistema i ESS zahteva poznavanje dnevnog dijagrama opterećenja distributivne mreže i dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema. Ovi dijagrami se zbog svoje stohastičke prirode ne mogu sa sigurnošću prognozirati [18], zbog čega se optimalna konfiguracija sistema vrši na osnovu njihovih najverovatnijih vrednosti u koje spadaju očekivani dijagram opterećenja i dijagram sunčeve iradijacije PV sistema u vedrom danu. Iz ovog razloga je takođe sagledan uticaj nepoklapanja stvarnih sa očekivanim (prognoziranim) vrednostima opterećenja kao i uticaj smanjenja sunčeve iradijacije PV sistema usled oblačnosti u toku dana, na povećanje gubitaka u mreži i promenu nivoa napunjenosti ESS [19].

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 ($P_{min}(k) = P_{PVmin}(k) + P_{ESSmin}(k)$, $P_{max}(k) = P_{PVmax}(k) + P_{ESSmax}(k)$).

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):

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

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

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

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

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

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) usvojene su 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 PV sistema. 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, prilikom određivanja optimalne konfiguracije sistema, usvojiće se da su nivoi napunjenosti ESS na početku (SOC_0) i kraju (SOC_T) radnog ciklusa (dana) jednaki. U ovu svrhu je usvojeno dodatno ograničenje vezano za nivo napunjenosti ESS, uvaženo realcijom (8):

$$SOC_T - SOC_0 = 0 \quad (8)$$

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

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 u toku dana sistema sačinjenog od PV sistema i ESS korišćena je 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_{besti}). 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):

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

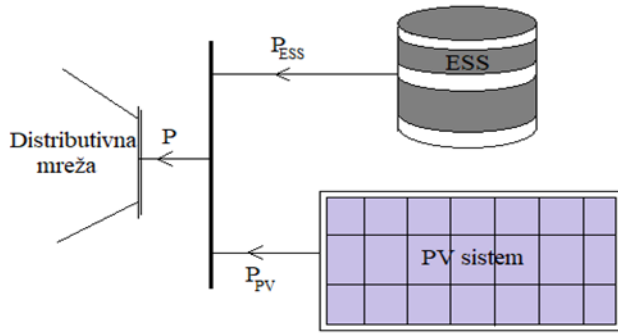
$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (11)$$

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 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 ispunji 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:

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

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

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:

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

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:

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

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. Najveća jednočasovna snaga ESS po apsolutnoj vrednosti u toku perioda rada (T) predstavlja snagu prema kojoj je potrebno dimenzionisati ESS:

$$P_{ESSmax} = \max\{|P_{ESS}(k)|\}, \quad k = \{1, 2, \dots, T\} \quad (18)$$

Nakon toga, pomoću izraza (14) i (15), određuju se nivoi napunjenosti ESS na kraju svakog sata u posmatranom periodu rada. Na osnovu dobijenih vrednosti za nivo 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 (19):

$$\Delta Q_{ESS} = Q_{ESS} \cdot (SOC_{Max} - SOC_{Min}) \quad (19)$$

gde su SOC_{Max} i SOC_{Min} maksimalni i minimalni nivo napunjenosti ESS u posmatranom periodu rada.

Pored potrebnog energetskog kapaciteta ESS, za ostvarivanje željenog (optimalnog sa aspekta smanjenja gubitaka u mreži) režima rada, neophodno je odrediti i dozvoljeni opseg u kome se može naći početni nivo napunjenosti ESS, kako bi nivo napunjenosti u toku dana bio u okviru dozvoljenih vrednosti. Maksimalni i minimalni nivo napunjenosti ESS se mogu izraziti preko početnog nivoa napunjenosti (SOC_0) i snage punjenja/pražnjenja ESS (P'_{ESS}) kao:

$$SOC_{Max} = SOC_0 - \frac{1}{Q_{ESS}} \sum_{k=1}^{k_{max}} P'_{ESS}(k) \quad (20)$$

$$SOC_{Min} = SOC_0 - \frac{1}{Q_{ESS}} \sum_{k=1}^{k_{min}} P'_{ESS}(k) \quad (21)$$

gde su k_{min} i k_{max} redni broj sati u kojima se javlja minimalni odnosno maksimalni nivo napunjenosti ESS, pri čemu za vreme punjenja ESS važi da je $P'_{ESS} = \eta P_{ESS}$, a za vreme pražnjenja $P'_{ESS} = P_{ESS}/\eta$.

Minimalni i maksimalni nivo napunjenosti koji se pojavljuju u radu ESS moraju biti u dozvoljenim granicama ($SOC_{Max} \leq SOC_{max}$ i $SOC_{Min} \geq SOC_{min}$), tako da se za dozvoljeni opseg u kome se može naći početni nivo napunjenosti ESS dobija:

$$SOC_{min} + \frac{1}{Q_{ESS}} \sum_{k=1}^{k_{min}} P'_{ESS}(k) \leq SOC_0 \leq SOC_{max} + \frac{1}{Q_{ESS}} \sum_{k=1}^{k_{max}} P'_{ESS}(k) \quad (22)$$

4. UTICAJ NEPOKLAPANJA STVARNIH I OČEKIVANIH VREDNOSTI OPTEREĆENJA I SUNČEVE IRADIJACIJE

Kao što se može videti u poglavlju 3, izložena metoda koristi očekivani dijagram opterećenja distributivne mreže kako bi odredila optimalnu snagu koju sistem sačinjen od PV sistema i ESS treba da injektira u mrežu. Takođe, kod određivanja optimalne konfiguracije sistema metoda zahteva poznavanje oblika dnevnog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema za slučaj vedrog dana. Uvažavajući navedeno, jasno je da optimalnost konfiguracije sistema, pa time i smanjenje nivoa gubitaka u distributivnoj mreži, u velikoj meri zavisi od tačnosti prognoze dijagrama opterećenja i dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema. Kao što se može pretpostaviti moguća su tri različita slučaja:

1. nepoklapanje stvarnog i prognoziranog dijagrama opterećenja,
2. nepoklapanje stvarnog i prognoziranog dijagrama sunčeve iradijacije PV sistema,

3. nepoklapanje stvarnih i prognoziranih vrednosti oba razmatrana dijagrama.

Kako bi se kvantifikovao uticaj nepoklapanja stvarnih sa očekivanim vrednostima opterećenja i sunčeve iradijacije na povećanje gubitaka u mreži, u okviru svakog od navedena tri slučaja razmotriće se primeri u kojima dolazi do promene satnih karakteristika u odnosu na one koje se prognoziraju očekivanim dijagramom opterećenja i dijagramom sunčeve iradijacije PV sistema za slučaj vedrog dana.

U zavisnosti od načina rešavanja pomenutog problema razmotrena su dva pristupa. Kod oba pristupa, u cilju što većeg iskorišćenja sunčeve energije, usvojeno je da PV sistem radi sa maksimalnom mogućom snagom u datom trenutku, koja je direktno proporcionalna intenzitetu sunčeve iradijacije na njegove panele. Sa druge strane, način određivanja snage ESS zavisi od korišćenog pristupa. Naime, u prvom pristupu jednakost nivoa napunjenosti ESS na početku i kraju radnog ciklusa mora biti očuvana, dok u drugom pristupu to nije slučaj, već se kao jedini prioritet postavlja minimizacija gubitaka u mreži. Zbog toga je snaga ESS u prvom pristupu (P'_{ESS}) jednaka snazi ESS koja je dobijena u procesu konfiguracije sistema (P_{ESS}), gde je bio zadovoljen uslov jednakosti nivoa napunjenosti ESS na početku i kraju radnog ciklusa.

$$P'_{ESS} = P_{ESS} \quad (23)$$

Imajući u vidu da snaga PV sistema zavisi od sunčeve iradijacije na koju se ne može uticati, a da je snaga ESS unapred određena, injektirana snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS u prvom pristupu može u velikoj meri odstupati od optimalne vrednosti, što bi za posledicu moglo imati znatno uvećanje gubitaka u mreži. Ovo može biti posebno izraženo u periodima sa većom oblačnošću i opterećenjem iznad očekivanog, kada snaga PV sistema bude tek tolika da obezbedi adekvatnu dopunu ESS.

Za razliku od prvog, u drugom pristupu se vrši merenje opterećenja i na osnovu te informacije korišćenjem PSO određuje optimalna snaga koju sistem u datom trenutku treba injektirati u mrežu kako bi minimizovao gubitke. Snaga ESS u drugom pristupu (P''_{ESS}) se podešava tako da se u svakom trenutku, nezavisno od trenutne snage PV sistema (P_{PV}), u mrežu injektira optimalna vrednost snage sa aspekta minimizacije gubitaka (P_{opt}).

$$P''_{ESS} = P_{opt} - P_{PV} \quad (24)$$

Jasno je da se na ovaj način vrši uspešno minimizacija gubitaka u mreži, ali se takođe može javiti i velika razlika između nivoa napunjenosti ESS na kraju i onog na početku, zbog čega je upotreba ovog pristupa ograničena na specijalne situacije. Mora se napomenuti da nezavisno od korišćenog pristupa ograničenja u vidu potrebne maksimalne snage (P_{ESSmax}) i potrebnog energetskog kapaciteta ESS (ΔQ_{ESS}), dobijenih u procesu konfiguracije sistema, moraju biti zadovoljena. Ova ograničenja za k -ti sat su data izrazima (25) i (26), respektivno:

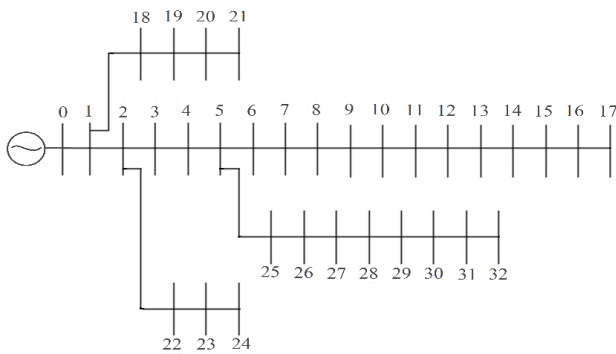
$$P_{ESS}^{I,II}(k) < P_{ESSmax} \quad (25)$$

$$P_{ESS}^{I,II}(k) < \Delta Q_{ESS} - \sum_i^{k-1} P_{ESS}^{I,II}(i) \quad (26)$$

5. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

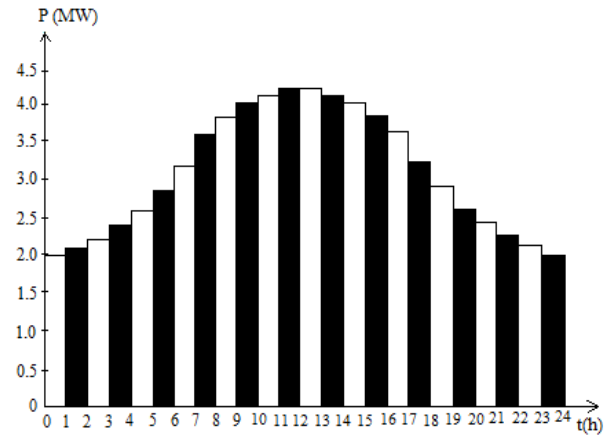
Svi rezultati dobijeni u ovom radu se odnose na IEEE radijalnu distributivnu mrežu sa 33 čvora, prikazanu na slici 2. Usvojeno je isto rastojanje između svaka dva susedna čvora i ono iznosi 250 m. Ovo je urađeno radi jednostavnosti izvođenja opštih zaključaka. Naponski nivo distributivne mreže je 10 kV, dok vrednosti podužne 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 koeficijenata ubrzanja koje daju najbolje rezultate, a one su: $w = 0,85$, $C_1 = 0,5$ i $C_2 = 0,6$.

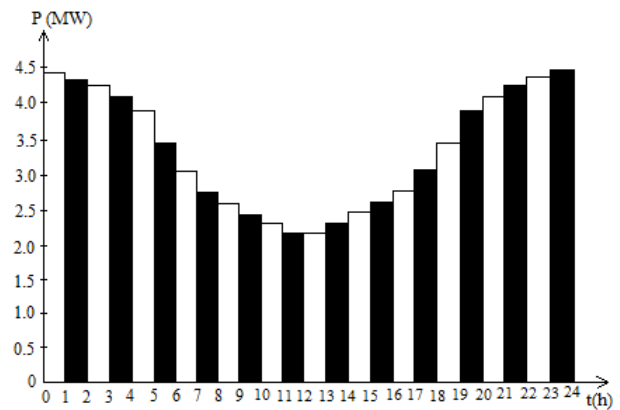


Slika 2. IEEE 33 distributivna mreža

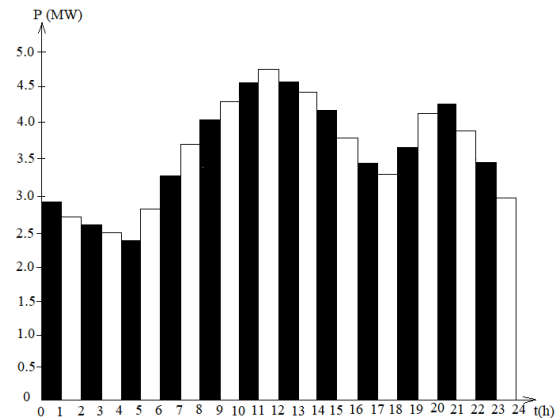
Razmatrana su tri različita dijagrama opterećenja distributivne mreže, prikazana na slikama 3, 4 i 5. Oblici prva dva dijagrama opterećenja imaju više teorijski karakter i odabrani su kao primeri opterećenja koje se u većoj ili manjoj meri poklapa sa dnevnim dijagramom sunčeve iradijacije PV sistema. Kao što se može videti sa slika 3 i 4, prvi i drugi dijagram opterećenja distributivne mreže imaju različite raspodele snage opterećenja u vremenu, ali istu maksimalnu ($P_{max1,2} = 4,462 MW$) i srednju snagu ($P_{sr1,2} = 3,285 MW$). Za razliku od njih, oblik trećeg dijagrama opterećenja, prikazanog na slici 5, bolje opisuje opterećenje koje se može naći u praksi i ima nešto veću maksimalnu ($P_{max3} = 4,75 MW$) i srednju snagu ($P_{sr3} = 3,398 MW$). 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 dijagram opterećenja distributivne mreže



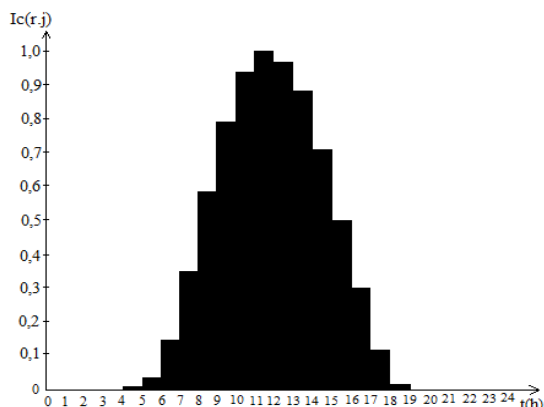
Slika 4. Drugi dijagram opterećenja distributivne mreže



Slika 5. Treći 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.

Dnevni dijagram sunčeve iradijacije panela PV sistema, korišćen pri određivanju snage PV sistema, izražen u relativnim jedinicama, je dat na slici 6.



Slika 6. Dnevni dijagram sunčeve iradijacije PV sistema

U tabeli I 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 I Srednja dnevna snaga gubitaka pre priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS

Dijagram opterećenja	I	II	III
$P_{g_{sr}}[kW]$	63,037 (46,001)	63,037 (46,001)	68,097 (49,498)

Rezultati iz tabele I su očekivani, s obzirom 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 II sadrži rezultate dobijene nakon njegovog priključenja na distributivnu mrežu. Ovi rezultati, pored srednje dnevne snage gubitaka ($P_{g_{sr}}$), 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}), potrebnu maksimalnu snagu ESS (P_{ESS}) i potreban energetske kapacitet ESS (ΔQ_{ESS}) za različite stepene efikasnosti ESS ($\eta=1$, $\eta=0,9$ 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, maksimalnu snagu ESS i energetske kapacitet ESS).

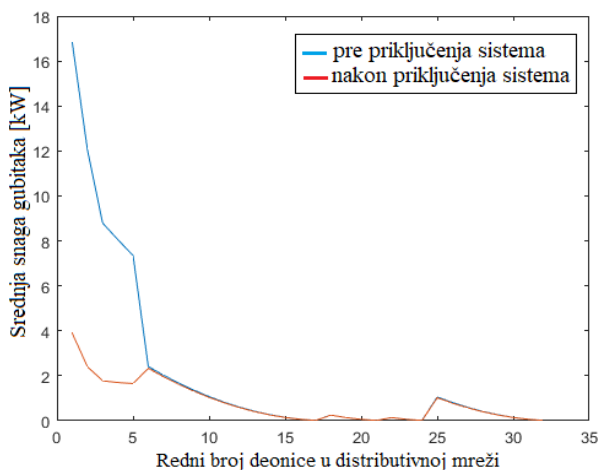
Tabela II Srednja dnevna snaga gubitaka nakon priključenja sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, lokacija priključenja i parametri konfiguracije sistema za različite stepene efikasnosti ESS

Dijagram opterećenja	I	II	III
$P_{g_{sr}}[kW]$	24,047 (11,257)	24,047 (11,257)	25,970 (12,125)
i	5 (5)	5 (5)	5 (5)
$P_{PVmax1}[MW]$	8,530 (8,354)	8,529 (8,354)	8,830 (8,640)
$P_{ESS1}[MW]$	4,988 (4,905)	6,855 (6,702)	5,056 (4,972)
$\Delta Q_{ESS1}[MWh]$	27,115 (26,680)	40,783 (39,827)	29,219 (28,701)
$P_{PVmax0,9}[MW]$	9,382 (9,192)	9,825 (9,619)	9,758 (9,551)
$P_{ESS0,9}[MW]$	5,841 (5,744)	8,154 (7,968)	5,984 (5,884)
$\Delta Q_{ESS0,9}[MWh]$	29,508 (29,045)	44,861 (43,817)	32,131 (31,554)
$P_{PVmax0,8}[MW]$	10,522 (10,316)	11,594 (11,347)	11,026 (10,796)
$P_{ESS0,8}[MW]$	6,981 (6,867)	9,923 (9,695)	7,252 (7,128)
$\Delta Q_{ESS0,8}[MWh]$	32,370 (31,872)	49,784 (48,624)	35,657 (35,017)

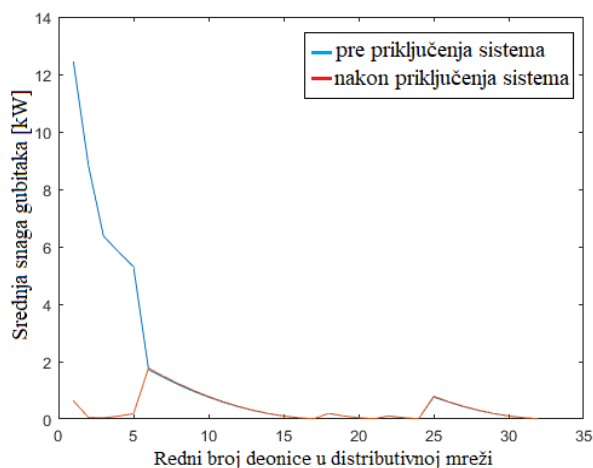
Na osnovu rezultata iz tabele II može se zaključiti da se priključenjem sistema sačinjenog od PV sistema i ESS mogu znatno smanjiti gubici u distributivnoj mreži. Kako je srednja snaga gubitaka nakon priključenja ista za prvi i drugi dijagram opterećenja, a nešto veća kod trećeg, konstatuje se da na visinu gubitaka nakon priključenja utiče vrednost snage opterećenja, a ne njen raspored u vremenu. Takođe, iz tabele II dâ 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, nezavisno od tipa opterećenja, to čvor 5. Pored toga, tabela II 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 energetske kapacitet i maksimalnu snagu ESS od najvećeg značaja je poklapanje dijagrama opterećenja sa dijagramom proizvodnje PV sistema, što se pokazuje daleko većim energetske kapacitetom i maksimalnom snagom ESS u slučaju drugog nego u slučaju prvog dijagrama opterećenja. Kao i maksimalna snaga PV sistema i potreban energetske kapacitet i maksimalna snaga ESS se povećavaju 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 ESS, kao i energetske kapaciteta ESS, kod opterećenja konstantne snage posledica nešto većeg opterećenja u tom slučaju.

Na slikama 7 i 8 su prikazane srednje 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.



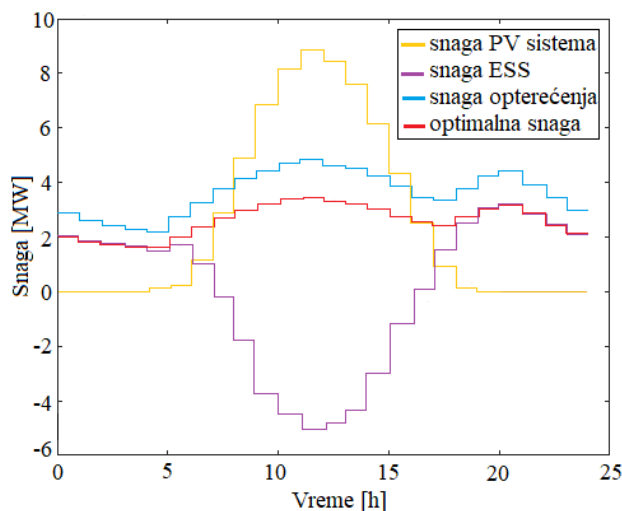
Slika 7. Srednja snaga gubitaka na deonicama distributivne mreže za opterećenje konstantne snage



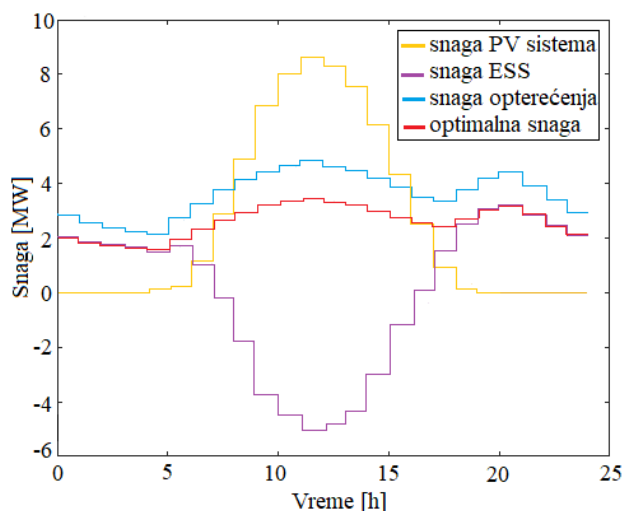
Slika 8. Srednja snaga gubitaka na deonicama distributivne mreže za opterećenje konstantne impedanse

Na osnovu slika 7 i 8 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 zbog postojanja tokova reaktivnih snaga na koje se značajnije nije moglo uticati, gubici u napojnim deonicama veći u slučaju opterećenja konstantne snage.

Slike 9 i 10 prikazuju aktivnu snagu opterećenja, optimalnu (radnu) snagu sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, kao i snage PV sistema i ESS pojedinačno za jedinični stepen efikasnosti ESS i treći dijagram opterećenja.



Slika 9. Snaga opterećenja, optimalna (radna) snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, snaga PV sistema i snaga ESS za opterećenje konstantne snage



Slika 10. Snaga opterećenja, optimalna (ukupna) snaga sistema sačinjenog od PV sistema i ESS, snaga PV sistema i snaga ESS za opterećenje konstantne impedanse

Na slikama 9 i 10 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.

U tabeli III je data minimalna srednja dnevna snaga gubitaka, srednja dnevna snaga gubitaka dobijena prvim i drugim pristupom i promena energetskeg nivoa ESS dobijena u drugom pristupu, za različita odstupanja snage opterećenja i sunčeve iradijacije od očekivanih vrednosti. Važno je napomenuti da je usvojeno odstupanje snage opterećenja (ΔP) procentualno isto za svaki sat u toku dana, što takođe važi i za odstupanje sunčeve iradijacije (ΔI_c). Minimalna srednja dnevna snaga gubitaka je dobijena za slučaj kada sistem sačinjen od PV sistema i ESS u svakom satu injektira optimalnu snagu sa aspekta smanjenja gubitaka, uvažavajući stvarnu vrednost opterećenja u mreži, a zanemarujući ograničenja određena konfiguracijom sistema. Ova snaga gubitaka ima teorijski karakter i služi kao referenca na osnovu koje se ocenjuje efikasnost prvog i drugog pristupa. Pomenuta dva pristupa su detaljno objašnjena u četvrtom poglavlju.

Tabela III Minimalna srednja dnevna snaga gubitaka, srednja dnevna snaga gubitaka dobijena prvim i drugim pristupom i promena energetskeg nivoa ESS dobijena u drugom pristupu, za različita odstupanja snage opterećenja i sunčeve iradijacije od očekivanih vrednosti.

$\Delta P(\%)$, $\Delta I_c(\%)$	$P_{gsr,min}[kW]$	$P_{gsr}^I[kW]$	$P_{gsr}^{II}[kW]$	$\Delta W_{ESS}^{II}[MWh]$
30, 0	44,339 (20,414)	48,202 (23,564)	44,340 (20,414)	-19,365 (-18,949)
20, 0	37,651 (17,416)	39,355 (18,823)	37,652 (17,416)	-12,910 (-12,632)
10, 0	31,530 (14,653)	31,953 (15,006)	31,530 (14,653)	-6,454 (-6,316)
-10, 0	20,951 (9,837)	21,367 (10,190)	21,839 (10,625)	3,207 (3,154)
-20, 0	16,501 (7,780)	18,152 (9,214)	18,885 (9,904)	6,401 (6,290)
-30, 0	12,593 (5,963)	16,282 (9,206)	17,402 (10,284)	9,596 (9,426)
0, -10	25,970 (12,125)	26,921 (12,963)	25,970 (12,125)	-6,455 (-6,316)
0, -20	25,970 (12,125)	29,807 (15,505)	25,970 (12,125)	-12,910 (-12,632)
0, -30	25,970 (12,125)	34,674 (19,790)	25,970 (12,125)	-19,365 (-18,948)
30, -30	44,339 (20,414)	66,161 (38,681)	51,240 (26,270)	-29,219 (-28,701)
20, -30	37,651 (17,416)	54,174 (31,468)	39,322 (18,903)	-29,219 (-28,701)
10, -30	31,530 (14,653)	43,689 (25,167)	31,530 (14,653)	-25,819 (-25,264)
-30, -20	12,593 (5,963)	14,349 (7,565)	12,593 (5,963)	6,454 (6,316)
-30, -10	12,593 (5,963)	14,385 (7,545)	13,657 (6,911)	9,324 (9,159)
-20, -20	16,501 (7,780)	18,110 (9,255)	16,501 (7,780)	0 (0)

Na osnovu rezultata iz tabele III može se zaključiti da su u najvećem broju slučajeva gubici dobijeni u drugom pristupu znatno manji od onih dobijenih korišćenjem prvog pristupa. Razlika između gubitaka dobijenih drugim pristupom i minimalnih gubitaka je posledica ograničenja vezanih za maksimalnu snagu i energetske kapacitet ESS određenih konfiguracijom sistema, koja onemogućavaju da se u svakom času ostvari optimalna injektirana snaga. Takođe, rezultati iz tabele III pokazuju da se korišćenjem drugog pristupa ESS dopunjuje ($\Delta W_{ESS} > 0$) u slučaju kada je smanjenje opterećenja značajnije od smanjenja sunčeve iradijacije, dok se u suprotnom ESS prazni ($\Delta W_{ESS} < 0$). Praznjenje ESS nakon radnog ciklusa je posebno izraženo kada istovremeno dođe do povećanja opterećenja i smanjenja sunčeve iradijacije u odnosu na njihove očekivane vrednosti toku dana.

Upoređivanjem vrednosti minimalne snage gubitaka i snage gubitaka dobijene korišćenjem prvog pristupa, može se konstatovati da zanemarivanje odstupanja stvarnih od očekivanih vrednosti opterećenja i sunčeve iradijacije prilikom određivanja snage PV sistema i ESS dovodi do uvećanja gubitaka u mreži. Sa druge strane, velika praznjenja ESS kod drugog pristupa ukazuju da se uvažavanje odstupanja i prilagođavanje snage injektiranja u mrežu ne bi trebalo vršiti samo na račun snage ESS već i povećanjem snage PV sistema u fazi konfiguracije.

6. 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 i da je optimalna lokacija za priključenje čvor blizu centra mreže (opterećenja). 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 maksimalna snaga i energetske kapacitet ESS u najvećoj meri zavise od poklapanja dijagrama opterećenja sa dijagramom sunčeve iradijacije PV sistema. Upoređivanjem rezultata za različite stepene efikasnosti ESS može se ustanoviti, da smanjenje efikasnosti ESS dovodi do povećanja maksimalne snage PV sistema i ESS, kao i do povećanja energetskeg kapaciteta ESS za isti nivo smanjenja gubitaka u mreži. Na kraju, potrebno je istaći da nepoklapanje stvarnih i očekivanih vrednosti snage opterećenja i smanjenje sunčeve iradijacije ispod očekivane vrednosti može dovesti do uvećanja gubitaka u mreži ili u velikoj meri promeniti nivo napunjenosti EES.

LITERATURA

- [1] Anaza O. S, Haruna S. Y, Amoo L. A, Sadiq A. A, Yisah A. Y, "Potential of renewable energy sources for distributed generations: An overview", *International Journal of Scientific Advances*, Vol. 4, No. 1, pp. 107-117, 2023.
- [2] Rajaković N, Tasić D., "Distributivne i industrijske mreže", Akademska misao, Beograd, 2008.
- [3] Alam A, Gupta A, Bindal P, Siddiqui A, Zaid M., "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, 2018.
- [4] Das C. K, Bass O, Kothapalli G, Mahmoud T.S, Habibi D, "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 1205–1230, 2018.
- [5] Tang X, Deng K, Wu Q, Feng Y., "Optimal location and capacity of the distributed energy storage system in a distribution network", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 15576-15585, 2020.
- [6] Das S, Fosso O, Marafioti G., "Efficient distribution network loss minimization with optimal DG placement and operation", *IEEE 12th Energy Conversion Congress and Exposition – Asia*, Singapore, 2021.
- [7] 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.
- [8] Adetunji K, Hofsaier 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. 5046-5068, 2020.
- [9] Mahesh K, AL Nallagownden P, AL Elamvazuthi I., "Optimal placement and sizing of DG in distribution system using accelerated PSO for power loss minimization", *IEEE Conference on Energy Conversion*, Johor Bahru, Malaysia, 2015.
- [10] Michline J, Ganesh S., "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, 2014.
- [11] 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.
- [12] Radosavljević J., "Metaheuristic optimization in power engineering", Institution of Engineering and Technology, London, 2018.
- [13] Elattar E. E, Elsayed S.K, "Optimal location and sizing of distributed generators based on renewable energy sources using modified moth flame optimization technique", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 109625–109638, 2020.
- [14] Das C. K, Bass O, Kothapalli G, Mahmoud T. S, Habibi D, "Optimal placement of distributed energy storage systems in distribution networks using artificial bee colony algorithm", *Applied Energy*, Vol. 232, pp. 212–228, 2018.
- [15] Goli P, Yelem S, Jasthi K, Gampa S. R, Das D, "Optimum placement of battery energy storage systems and solar PV units in distribution networks using gravitational search algorithm" In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Techniques for Electrical Engineering Systems (AITEES)*, pp. 113–123, 2022.
- [16] Duong M. Q, Pham T. D, Nguyen T. T, Doan A. T, Tran H. V, "Determination of optimal location and sizing of solar photovoltaic distribution generation units in radial distribution systems", *Energies*, Vol. 12, No. 1, pp. 174 2019.
- [17] Mansouri N, Lashab A, Guerrero J. M, Cherif A, "Photovoltaic power plants in electrical distribution networks: a review on their impact and solutions", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 14, No. 12, pp. 2114–2125, 2020.
- [18] Parihar S. S, Malik N, "Possibilistic uncertainty assessment in the presence of optimally integrated solar PV-DG and probabilistic load model in distribution network", *Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics*, Vol. 35, No.1, pp. 71-92, 2022.
- [19] Wang J, Wang J, Guo J, Wang L, Zhang C, Liu B, "Research progress of complex network modeling methods based on uncertainty theory", *Mathematics*, Vol.11, No. 5, 1212, 2023.

BIOGRAFIJE



Nikola Krstić je rođen 24. februara 1995. godine u Nišu. Diplomirao je 2018. i završio master akademske studije 2019. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu.

Njegove glavne oblasti interesovanja uključuju analizu distributivnih mreža, optimizaciju elektroenergetskih sistema

primenom metaheurističkih optimizacionih metoda i fotonaponske sisteme.

Trenutno je student doktorskih akademskih studija i radi kao asistent na katedri za Energetiku Elektronskog fakulteta u Nišu.



Dragan Tasić je rođen 22. septembra 1961. u Guberevcu, opština Leskovac. Diplomirao je 1986. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, a doktorirao 1997. godine na Elektronskom fakultetu u Nišu.

Njegove glavne oblasti interesovanja uključuju analizu

elektroenergetskih sistema, elektroenergetsku kablovsku tehniku i metode optimizacije u elektroenergetici.

Redovni je profesor na katedri za Energetiku Elektronskog fakulteta u Nišu.

Nikola N. Krstić¹, Dragan S. Tasić¹



Method for determining the optimal location and configuration of the system consisting of photovoltaic and energy storage system considering the reduction of losses in the distribution network

¹ Faculty of Electronic Engineering in Niš, Niš, Serbia*

Category of article: Original scientific research article

Highlights

- This paper considers the reduction of losses in the distribution network by connecting the system consisting of photovoltaic (PV) and energy storage system (ESS).
- The optimal location and optimal power of the system consisting of PV system and ESS is determined, taking into account the minimization of losses in the distribution network.
- Sizing of the PV system and ESS is carried out.
- The influence of the discrepancy between the actual and expected values of load and solar irradiation on the increase of losses in the distribution network and the change in the state of charge of ESS.

Abstract

In this paper two-step method for determining the optimal location and configuration of the system consisting of PV system and 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 in order to minimize the losses in distribution network. In the second step of the procedure, the individual powers of PV system and ESS are obtained and their configuration (sizing) determined. This is done by iterative procedure using the optimal values of combined power of these two systems during the day, obtained in the first step, and the shape of daily solar irradiation diagram of the PV system for the clear day. The configuration procedure is explained in detail, determining the maximum power of PV system, maximum power of ESS and energy capacity of ESS. In addition, the impact of the difference between the actual and the expected load diagram and the influence of the reduction of solar irradiation during the day on the increase of losses in the distribution network and the change in the state of charge of the ESS are considered. The paper considers cases with different load diagrams and different levels of ESS efficiency. All results are obtained using IEEE radial distribution network with 33 nodes.

Keywords

**Photovoltaic (PV) System, Energy Storage System (ESS),
 Particle Swarm Optimization Method (PSO), Losses in the Distribution Network**

Received: April 5th, 2023 Reviewed: April 25th, 2023
 Modified: April 28th, 2023 Accepted: May 4th, 2023
 *Corresponding author: Nikola N. Krstić
 E - mail: nikola.krstic@elfak.ni.ac.rs

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Optimal location and configuration of the system consisting of photovoltaic and energy storage system considering the reduction of losses in distribution network", awarded by Expert Committee EC-4 Distributed Generation and Efficient Use of Electricity at the 13th CIRED Serbia Conference, Kopaonik, September 12-16, 2022