

Analiza pokazatelja pouzdanosti distributivnog sistema uz uvažavanje prisustva prozjumeru sa baterijskim skladištenjem energije

Doroteja Zarev, Jelisaveta Krstivojević

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet Beograd, Republika Srbija

Rezime - Standardni proračun pokazatelja pouzdanosti distributivnih sistema najčešće se zasniva na pretpostavci da su potrošači pasivni i u potpunosti zavisni od napajanja iz elektrodistributivne mreže. Međutim, savremeni distributivni sistemi sve češće uključuju prozjumere koji poseduju lokalne izvore električne energije i baterijska skladišta, što može uticati na način na koji se prekidi napajanja manifestuju kod krajnjih korisnika. U ovom radu biće dat proračun pokazatelja pouzdanosti distributivnog sistema koji sadrži distribuirane izvore električne energije u vidu prozjumeru sa fotonaponskim elektranama i baterijskim skladištem energije. Posebna pažnja posvećena je razlici između mrežnih prekida i efektivnih prekida napajanja koje prozjumeri zaista doživljavaju, pri čemu se prekid definiše u slučajevima kada lokalna proizvodnja i skladištenje energije nisu dovoljni da pokriju potrošnju tokom prekida napajanja iz mreže. Model prozjumeru obuhvata fotonaponski sistem, baterijsko skladište energije i sistem upravljanja energijom, dok se neizvesnosti ulaznih podataka u proračunu pouzdanosti uzimaju u obzir primenom Monte Karlo simulacija. U radu će biti analizirano na koji način prisustvo prozjumeru utiče na pokazatelje pouzdanosti distributivnog sistema, kao i uticaj veličine fotonaponskog sistema, kapaciteta baterijskog skladišta i režima rada baterije na ostvarene vrednosti pokazatelja pouzdanosti..

Ključne reči - pouzdanost distributivnog sistema, distribuirani izvori električne energije, prozjumeri, baterijsko skladištenje energije, Monte Karlo simulacije

I UVOD

Pouzdanost napajanja predstavlja jedan od ključnih pokazatelja kvaliteta rada elektrodistributivnih sistema i uobičajeno se ocenjuje pomoću standardnih indeksa koji opisuju učestanost i trajanje prekida napajanja, kao i količinu neisporučene električne energije. U tom kontekstu, pokazatelji SAIFI (eng. *system average interruption frequency index*) i SAIDI (eng. *system average interruption duration index*) daju informaciju o prosečnom broju, odnosno ukupnom trajanju prekida napajanja po potrošaču, dok pokazatelj ENS (eng. *energy not supplied*) omogućava sagledavanje energetske posledica kvarova kroz ukupnu neisporučenu energiju [1]. Ovi pokazatelji decenijama predstavljaju osnovu za kvantitativnu procenu pouzdanosti distributivnih sistema i donošenje odluka u njihovom planiranju i eksploataciji [2].

Klasični proračuni pokazatelja pouzdanosti zasnivaju se na pretpostavci da su potrošači pasivni korisnici električne energije,

u potpunosti zavisni od napajanja iz elektrodistributivne mreže, te da svaki kvar u mreži neminovno dovodi do prekida napajanja kod krajnjih korisnika u punom trajanju ispada. Ovakav pristup je opravdan za tradicionalne distributivne sisteme bez lokalnih izvora energije, ali postaje ograničavajući u savremenim mrežama sa rastućim udelom distribuiranih energetskih resursa [3].

Savremeni distributivni sistemi sve češće uključuju prozjumere (kupce-proizvođače), koji se u ovom radu posmatraju kao potrošači opremljeni lokalnim fotonaponskim (eng. *photovoltaic* – PV) sistemom i baterijskim skladištem energije (eng. *battery energy storage system* – BESS). Prisustvo ovakvih resursa može značajno uticati na način na koji se prekidi napajanja manifestuju kod krajnjih korisnika, jer prozjumeri u određenim situacijama mogu nastaviti sa snabdevanjem sopstvene potrošnje i tokom prestanka napajanja iz elektrodistributivne mreže [4]. Zbog toga standardni pokazatelji pouzdanosti, zasnovani isključivo na mrežnim prekidima, ne moraju u potpunosti da odražavaju stvarno iskustvo korisnika u sistemima sa prozjumerima koji raspolažu lokalnom proizvodnjom i skladištenjem energije [5].

Posebno je važno napraviti razliku između mrežnih prekida i efektivnih prekida napajanja koje krajnji korisnici zaista doživljavaju [6]. Kod prozjumeru sa lokalnom proizvodnjom i baterijskim skladištem energije, prekid napajanja se može smatrati relevantnim samo u slučajevima kada raspoloživa proizvodnja iz fotonaponskih sistema i energija uskladištena u bateriji nisu dovoljne da pokriju potrošnju tokom trajanja ispada iz mreže. U suprotnom, iako postoji kvar u distributivnoj mreži, prozjumer ne doživljava prekid napajanja u klasičnom smislu [7,8].

U ovom radu sproveden je proračun pokazatelja pouzdanosti niskonaponskog distributivnog sistema primenom Monte Karlo simulacija, pri čemu je posebna pažnja posvećena modelovanju ponašanja prozjumeru tokom kvarova u mreži. Razvijen je simulacioni model koji omogućava sagledavanje uticaja lokalne proizvodnje i baterijskog skladištenja energije na ostvarene vrednosti pokazatelja pouzdanosti, uz uvažavanje sezonskih varijacija potrošnje i proizvodnje. Proračuni su izvršeni za više scenarija, kako bi se kvantifikovao uticaj snage fotonaponskog sistema, kapaciteta baterijskog skladišta i režima rada baterije na pokazatelje pouzdanosti distributivnog sistema.

II POKAZATELJI POUZDANOSTI DISTRIBUTIVNOG SISTEMA

Pouzdanost elektrodistributivnog sistema se u praksi najčešće kvantifikuje pomoću standardnih sistemskih pokazatelja

pouzdanosti, koji omogućavaju objedinjeno sagledavanje učestanosti i trajanja prekida napajanja, kao i energetskih posledica kvarova. U ovom radu koriste se pokazatelji *SAIFI*, *SAIDI*, *ENS*, *AIF* i *AID* koji su definisani u nastavku.

II.1. System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)

Pokazatelj *SAIFI* predstavlja prosečan broj prekida napajanja koje jedan potrošač doživi tokom posmatranog perioda, usled kvarova na komponentama distributivnog sistema. Ovaj pokazatelj se dobija kao odnos ukupnog broja prekida svih potrošača i ukupnog broja potrošača priključenih na sistem. Jedinica mere *SAIFI* pokazatelja je broj prekida po potrošaču godišnje [9].

Matematički, *SAIFI* se može izraziti kao:

$$SAIFI = \frac{\sum_{j=1}^R \lambda_j \cdot N_{c,j}}{\sum_{j=1}^R N_{c,j}} \quad (1)$$

gde su:

λ_j – intenzitet kvarova na j -tom čvoru,
 $N_{c,j}$ – broj potrošača priključenih na j -ti čvor, i
 R – ukupan broj čvorova u sistemu.

Ovaj pokazatelj daje informaciju o učestalosti prekida napajanja koje prosečan potrošač doživljava tokom godine.

II.2. System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

Pokazatelj *SAIDI* predstavlja prosečno ukupno trajanje prekida napajanja koje jedan potrošač pretrpi tokom posmatranog perioda. Dobija se kao odnos ukupnog vremena trajanja svih prekida napajanja kod svih potrošača i ukupnog broja potrošača u sistemu. Jedinica mere *SAIDI* pokazatelja je sat po potrošaču godišnje [9].

Matematička definicija *SAIDI* pokazatelja glasi:

$$SAIDI = \frac{\sum_{j=1}^R Du r_j \cdot N_{c,j}}{\sum_{j=1}^R N_{c,j}} \quad (2)$$

gde je Dur_j ukupno trajanje prekida napajanja za čvor j .

SAIDI pokazatelj omogućava sagledavanje vremenskog aspekta pouzdanosti, odnosno ukupnog trajanja prekida napajanja koje prosečan potrošač doživi tokom godine.

II.3. Energy Not Supplied (ENS)

Pokazatelj *ENS* predstavlja ukupnu količinu neisporučene električne energije usled prekida napajanja u posmatranom periodu. Ovaj pokazatelj se dobija sumiranjem proizvoda opterećenja i trajanja prekida za sve pogođene potrošače i daje dodatni uvid u energetske posledice kvarova u distributivnom sistemu [10]:

$$ENS = \sum_{j=1}^R ENS_j \quad (3)$$

$$ENS_j = \lambda_j \cdot Dur_j \cdot P_j \quad (4)$$

P_j predstavlja potrošnju u čvoru j , dok ostale veličine imaju identično značenje kao kod pokazatelja *SAIFI* i *SAIDI*.

II.4 Definicija pokazatelja *AIF* i *AID* na nivou potrošača

U cilju kvantifikacije pouzdanosti napajanja na nivou pojedinačnih potrošača, u ovom radu koriste se pokazatelji *AIF* (eng. *average interruption frequency*) i *AID* (eng. *average interruption duration*), koji se definišu na osnovu vremenskog toka stanja sistema tokom posmatranog perioda.

Neka je $I(t)$ promenljiva koja opisuje pojavu prekida napajanja u diskretnom vremenskom koraku t . Promenljiva $I(t)$ ima vrednost 1 u trenucima kada dolazi do započinjanja prekida napajanja, odnosno kada sistem prelazi iz stanja normalnog rada u stanje prekida, dok u suprotnom ima vrednost 0. Posmatrani vremenski period obuhvata ukupno T diskretnih vremenskih koraka.

Pokazatelj *AIF* predstavlja prosečan broj započetih prekida napajanja tokom posmatranog perioda i definiše se kao [3]:

$$AIF = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T I(t) \quad (5)$$

Pokazatelj *AID* predstavlja prosečno trajanje prekida napajanja tokom posmatranog perioda. Neka je $s_r(t)$ promenljiva koja opisuje stanje napajanja rezidencijalnog sistema u trenutku t , pri čemu $s_r(t)=1$ označava stanje prekida, a $s_r(t)=0$ stanje normalnog rada. Tada se *AID* definiše kao [3]:

$$AID = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_r(t) \quad (6)$$

Na ovaj način, pokazatelji *AIF* i *AID* omogućavaju kvantifikaciju učestalosti i trajanja prekida napajanja iz perspektive krajnjeg korisnika, pri čemu se u sistemima sa prozjumerima i baterijskim skladištem energije ovi pokazatelji odnose na efektivno doživljene prekide, a ne nužno na sve mrežne ispade.

III MODEL SISTEMA ZA PRORAČUN POUZDANOSTI

U ovom poglavlju prikazan je model distributivnog sistema i krajnjih korisnika koji se koristi za proračun pokazatelja pouzdanosti. Poseban akcenat stavljen je na modelovanje rezidencijalnih prozjumeri sa fotonaponskim sistemima i baterijskim skladištem energije, kao i na definisanje pretpostavki i uslova pod kojima su sprovedeni proračuni.

Analiza pouzdanosti zasniva se na simulacionom modelu niskonaponskog distributivnog sistema i izvršena je za dve konfiguracije – osnovna konfiguracija podrazumeva radijalnu topologiju, dok druga konfiguracija podrazumeva postojanje poluprstenova između određenih izvoda. U obe analizirane konfiguracije integrisani su prozjumeri. Proračuni su sprovedeni primenom Monte Karlo simulacije, uz uvažavanje stohastičke prirode kvarova u distributivnoj mreži i vremenskih varijacija potrošnje i proizvodnje električne energije.

Proračun pokazatelja pouzdanosti realizovan je odvojeno za tri sezonska perioda definisana u Pravilima o radu distributivnog sistema [11]: zimski, prelazni i letnji period. Zimski period obuhvata mesece novembar, decembar, januar, februar i mart, prelazni period april, maj, septembar i oktobar, dok letnji period obuhvata jun, jul i avgust.

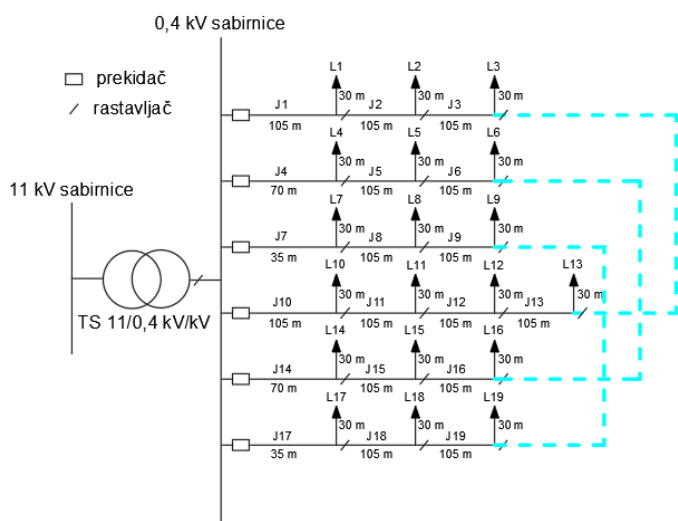
Ovakav pristup omogućava realističnije sagledavanje ponašanja

sistema tokom godine, imajući u vidu izražene sezonske razlike u potrošnji krajnjih kupaca i proizvodnji iz fotonaponskih sistema.

III.1. Model distributivne mreže

Posmatrana niskonaponska distributivna mreža u osnovi ima radijalnu topologiju i sastoji se od šest nezavisnih izvoda sa ukupno 19 potrošačkih čvorova [12]. Model mreže prikazan je na Slici 1. Isprekidane linije predstavljaju vodove koji povezuju izvode i čine konfiguraciju mreže sa poluprstenovima. Na početku svakog izvoda nalaze se prekidači, dok se na početku svake deonice nalaze rastavljači.

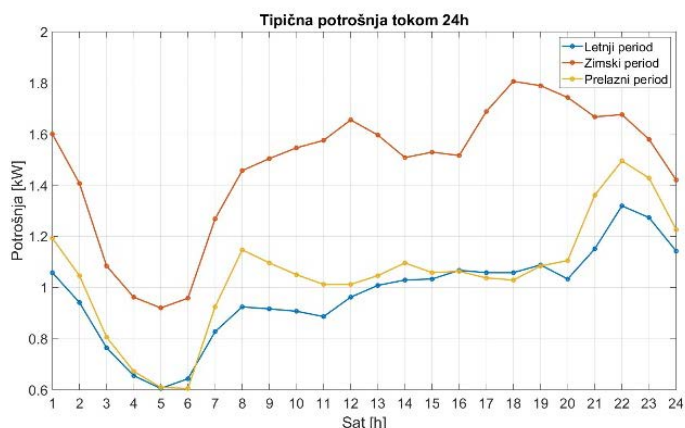
U slučaju nastanka kvara na određenoj deonici, svi potrošači priključeni na odgovarajući izvod ostaju bez napajanja tokom vremena potrebnog za identifikaciju njegove lokacije i izolovanje, pri čemu je u ovom radu to vreme modelovano kao konstantno i iznosi 1 h. Nakon izolacije mesta kvara, u slučaju osnovnog modela niskonaponske distributivne mreže, odnosno radijalne mreže bez poluprstenova, bez napajanja ostaju potrošači iza mesta kvara tokom trajanja popravke oštećene deonice, koje iznosi 6 h. U slučaju topologije sa poluprstenovima, nakon izolovanja mesta kvara, 6h bez napajanja ostaje potrošač koji se nalazi na deonici koja je direktno pogođena kvarom. Prosečan broj prekida napajanja deonica određen je proporcionalno njihovoj dužini, pri čemu se koristi jedinstven prosečan broj prekida po kilometru voda – 0,168 1/(km·god). U modelu se pretpostavlja da su svi elementi distributivnog sistema, osim vodova, idealno pouzdani.



Slika 1. Niskonaponska distributivna test mreža [12]

III.2. Model potrošnje krajnjih kupaca

Opterećenje svakog potrošačkog čvora definisano je korišćenjem realnih sezonskih profila potrošnje krajnjeg kupca koji ne koristi električnu energiju za grejanje. Profili potrošnje su u modelu unapred definisani i zasnovani na dostupnom skupu podataka, pri čemu se razlikuju za zimski, prelazni i letnji period. Na Slici 2 prikazani su dvadesetčetvoročasovni dijagrami potrošnje za svaki od perioda. Na ovaj način se u proračunu koristi isti referentni skup podataka za sve simulacione realizacije, čime se obezbeđuje konzistentnost ulaznih uslova i omogućava direktno poređenje različitih scenarija.



Slika 2. Profili potrošnje po sezonama

III.3. Matematički model rezidencijalnog sistema (prozjumer)

U ovom radu prozjumer se modeluje kao rezidencijalni sistem, koji se sastoji od tri osnovne komponente: opterećenja, sistema distribuiranih izvora energije i sistema za upravljanje energijom (eng. *Energy Management System – EMS*). EMS upravlja radom distribuiranih izvora i načinom povezivanja rezidencijalnog sistema sa elektrodistributivnom mrežom. Osnovni režim rada sistema je režim, u kojem distribuirani izvor električne energije predstavlja primarni izvor napajanja, dok elektrodistributivna mreža ima ulogu dopunskog izvora za pokrivanje dela potrošnje koji nije zadovoljen lokalnom proizvodnjom i energijom koja je uskladištena u baterijskom sistemu.

Distribuirani izvori energije u rezidencijalnom sistemu obuhvataju krovni fotonaponski sistem i baterijsko skladište energije. U zavisnosti od razmatranog scenarija, opšti model može se svesti na specifične konfiguracije, odnosno različite instalisane snage fotonaponskog sistema, kao i kapaciteta baterije.

Podaci o proizvodnji fotonaponskog sistema preuzeti su sa platforme PVGIS (eng. *Photovoltaic Geographical Information System*) [13]. Proračun proizvodnje izvršen je za lokaciju u okolini Kragujevca, pri čemu su u okviru dostupnog kalkulatora odabrani optimalni nagibni ugao i azimut modula, u skladu sa preporukama alata za maksimalnu godišnju proizvodnju. Usvojeni gubici PV sistema iznose 10%. Kao izlazni podaci korišćene su satne vrednosti proizvodnje za period od jedne godine (8760 časova), koje su dalje implementirane u simulacioni model.

Baterijsko skladište energije modelirano je preko stanja napunjenosti (eng. *State of Charge – SOC*), koje predstavlja odnos trenutno raspoložive energije i maksimalnog kapaciteta skladišta. Dinamika promene SOC-a u diskretnom vremenskom koraku t data je izrazom:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{\eta_c \cdot Ch(t) - \frac{D(t)}{\eta_d}}{ES_{cap}} \quad (7)$$

gde su η_c i η_d efikasnosti punjenja i pražnjenja, respektivno, C_h i D energije punjenja i pražnjenja u datom vremenskom trenutku, dok ES_{cap} predstavlja kapacitet baterijskog skladišta.

Raspoloživa energija u baterijskom skladištu u trenutku t određuje se kao:

$$ES(t) = SOC(t) \cdot ES_{cap} \quad (8)$$

Rad baterijskog sistema ograničen je sledećim uslovima:

$$\begin{aligned} 0 &\leq Ch(t) \leq Ch_{max} \\ 0 &\leq D(t) \leq D_{max} \\ 0 &\leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{aligned} \quad (9)$$

gde su Ch_{max} i D_{max} maksimalne dozvoljene energije punjenja i pražnjenja u jednom vremenskom koraku, dok SOC_{max} predstavlja maksimalno dozvoljeno stanje napunjenosti baterije.

Energetski bilans rezidencijalnog sistema u diskretnom vremenskom koraku t modeluje se preko neto opterećenja, koje predstavlja opterećenje viđeno na priključnom mestu rezidencijalnog sistema prema elektrodistributivnoj mreži. Neto opterećenje definisano je izrazom:

$$l_n(t) = l(t) - PV_{out}(t) \pm ES(t) \quad (10)$$

gde je $l(t)$ trenutna potrošnja rezidencijalnog sistema, dok $l_n(t)$ predstavlja neto opterećenje u trenutku t . Pozitivan znak ispred ES u izrazu odnosi se na pražnjenje baterije, dok negativan znak ispred ES označava punjenje baterijskog skladišta [3]. Treba naglasiti da se energija koju proizvede fotonaponski sistem prvenstveno koristi za napajanje potrošnje u posmatranom čvoru. Ukoliko je proizvodnja iz fotonaponskog sistema veća od potrošnje, tada se baterija puni. U slučaju da je proizvodnja prevazilazi potrošnju, a baterija je puna, tada se proizvedena energija predaje mreži. Punjenje baterije iz mreže nije dozvoljeno, kao ni predaja energije iz baterije u mrežu.

III.4. Režimi rada i ponašanje tokom ispada mrežnog napajanja

U normalnom režimu rada, prozjumer razmenjuje energiju sa elektrodistributivnom mrežom u skladu sa definisanim energetskim bilansom. U slučaju kvara u distributivnoj mreži, prozjumeri sistem se automatski odvaja od mreže i prelazi u ostrvski režim rada. Tokom ovog režima dozvoljeno je napajanje isključivo sopstvenog opterećenja, dok napajanje drugih potrošača u mreži nije moguće.

Tokom trajanja ispada proverava se da li lokalna proizvodnja i energija uskladištena u bateriji mogu da pokriju potrošnju rezidencijalnog sistema. Ukoliko to nije moguće, registruje se efektivni prekid napajanja, koji se koristi u daljem proračunu pokazatelja pouzdanosti.

IV SIMULACIJA

Proračun pokazatelja pouzdanosti sproveden je primenom Monte Karlo simulacije kroz ukupno 10.000 nezavisnih iteracija. Jedna iteracija predstavlja jednu simuliranu godinu rada distributivnog sistema i obuhvata sva tri sezonska perioda definisana u [11], odnosno zimski, prelazni i letnji period. Rezolucija je satna. Tokom svake iteracije analiziraju se svi relevantni događaji u toku godine, uključujući pojavu kvarova u distributivnoj mreži i ponašanje potrošača i prozjumeru u uslovima normalnog rada i tokom ispada mrežnog napajanja.

Monte Karlo simulacija u ovom radu koristi se za modelovanje kvarova u distributivnoj mreži, odnosno lokacije i vremena

nastanka kvarova. Vreme do kvara se generiše eksponencijalno prema intenzitetu kvarova pojedinih deonica, dok se mesto kvara bira nasumično između deonica, uzimajući u obzir verovatnoću za svaku deonicu. Verovatnoća se određuje proporcionalno intenzitetima kvarova deonica. Profili potrošnje i proizvodnje električne energije unapred su definisani i tretirani kao deterministički ulazi u svim iteracijama, dok se slučajnost u model uvodi kroz realizacije kvarova i početni stepen napunjenosti baterije. Na početku svake od 10.000 iteracija, stepen napunjenosti baterije bira se proizvoljno, gde je raspodela verovatnoće uniformna. Za svaki sat nakon početnog u okviru jedne godine (jedne iteracije Monte Karlo simulacije) stepen napunjenosti baterije se računa na osnovu podataka u simulaciji, odnosno na osnovu proizvodnje i potrošnje, kao i načina upravljanja baterijskim sistemom.

IV.1. Definisanje scenarija i tehnička ograničenja

Analiza je sprovedena za više scenarija koji se razlikuju po instalisanoj snazi fotonaponskog sistema i kapacitetu baterijskog skladišta energije. Razmatrani su različiti nivoi instalisane snage PV sistema, kao i dva kapaciteta baterijskog skladišta, čime je omogućeno sagledavanje uticaja veličine distribuiranih izvora energije na pokazatelje pouzdanosti. Različiti scenariji (SC) prikazani su u Tabeli 1.

Analiza je sprovedena uz pretpostavku da su čvorovi 3, 8 i 14, prikazani na Slici 1, prozjumeri sa jednakim karakteristikama.

Tabela 1: Različiti scenariji instalisane snage PV sistema i kapaciteta baterijskog skladišta prozjumeru

	Instalisana snaga PV sistema	Kapacitet baterije	Maksimalna snaga punjenja/pražnjenja baterije
Scenario 1	1 kW	5 kWh	3,5 kW
Scenario 2	2 kW	5 kWh	3,5 kW
Scenario 3	2 kW	10 kWh	3,5 kW
Scenario 4	5 kW	10 kWh	3,5 kW
Scenario 5	10 kW	10 kWh	3,5 kW

U modelu je dodatno uvaženo ograničenje izlazne snage invertora fotonaponskog sistema. U slučajevima kada izračunata izlazna snaga fotonaponskih panela premaši nazivnu snagu invertora, proizvodnja se ograničava na maksimalnu dozvoljenu snagu invertora. Na ovaj način obezbeđeno je da simulacija realno odražava tehnička ograničenja sistema.

IV.2. Režimi upravljanja baterijskim skladištem energije

U radu su analizirana dva različita režima upravljanja baterijskim skladištem energije. Prvi režim je režim samopotrošnje (eng. *self-consumption*), u kojem se baterija koristi za pokrivanje potrošnje prozjumeru u trenucima kada proizvodnja iz fotonaponskog sistema nije dovoljna, dok se višak energije iz PV sistema koristi za punjenje baterije ili, u slučaju pune baterije, predaje mreži.

Drugi razmatrani režim je režim rezervnog napajanja (eng. *backup-only*), u kojem se baterijsko skladište koristi isključivo tokom ispada mrežnog napajanja. U ovom režimu, u normalnim

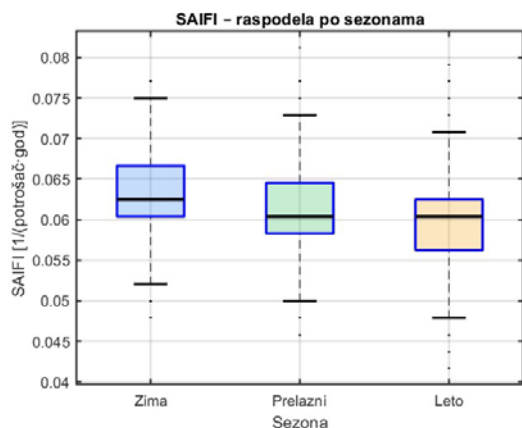
uslovima rada, potrošnja prozjuma se pokriva iz PV sistema i/ili iz mreže, dok se energija iz baterije čuva za slučajeve prekida napajanja. Ovim pristupom omogućeno je poređenje uticaja različitih strategija upravljanja baterijom na pokazatelje pouzdanosti.

V REZULTATI SIMULACIJE

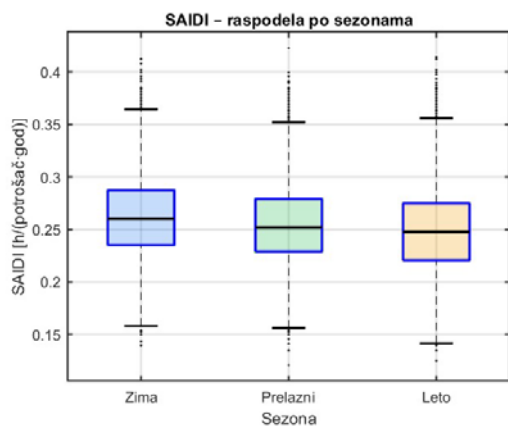
V.1. Osnovni model NN distributivne mreže

Za svaki scenario i svaki sezonski period, u slučaju osnovnog modela niskonaponske distributivne mreže, dobijene su distribucije vrednosti pokazatelja pouzdanosti za 10.000 iteracija. Kao ilustrativan primer, na Slikama 3-5, za scenario 4 prikazane su vrednosti pokazatelja *SAIFI*, *SAIDI* i *ENS* u formi boxplot dijagrama (tzv. „kutije“).

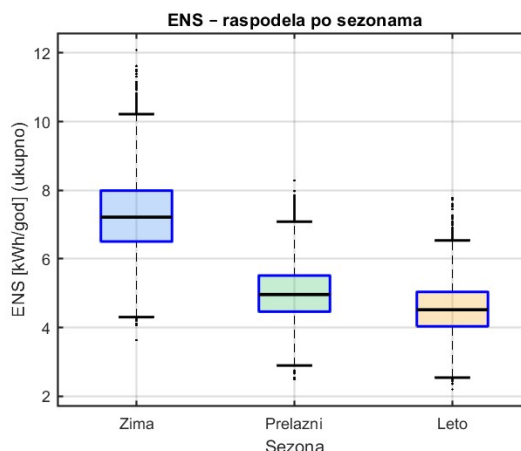
Kod pokazatelja *SAIFI* i *SAIDI* primećuje se da su učestanost i trajanje prekida relativno stabilni između sezona, ali sa blagim smanjenjem tokom leta. Sa druge strane, *ENS* pokazuje izraženiju sezonsku zavisnost, pri čemu su trajanje prekida i neisporučena energija značajno manji u letnjem periodu, što je posledica povećane proizvodnje iz fotonaponskih sistema i povoljnijeg energetskog bilansa prozjuma.



Slika 3. Prikaz raspodele vrednosti pokazatelja *SAIFI* po sezonama

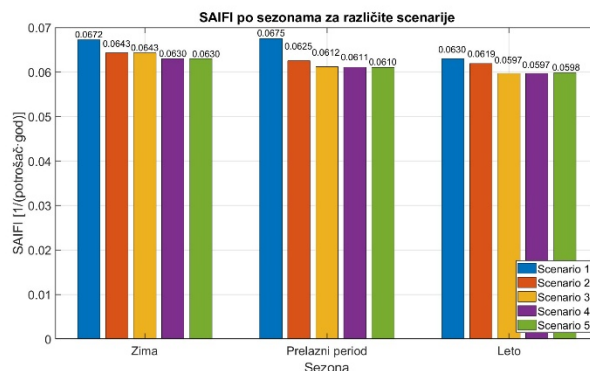


Slika 4. Prikaz raspodele vrednosti pokazatelja *SAIDI* po sezonama

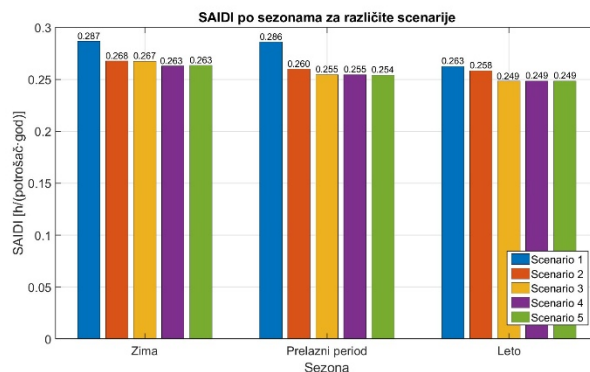


Slika 5. Prikaz raspodele vrednosti pokazatelja *ENS* po sezonama

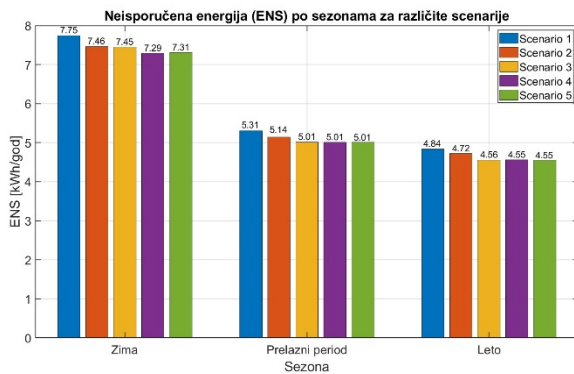
Sezonski pokazatelji pouzdanosti korišćeni u daljoj analizi predstavljaju srednje vrednosti dobijene iz 10.000 iteracija. Radi poređenja više scenarija, sezonske srednje vrednosti prikazane su grafički, na Slikama 6-8, pri čemu je za svaki sezonski period prikazano više stubića koji odgovaraju različitim razmatranim scenarijima, sa jasno razdvojenim bojama za svaki scenario.



Slika 6. Prosečna vrednost pokazatelja *SAIFI* po sezonama za različite scenarije



Slika 7. Prosečna vrednost pokazatelja *SAIDI* po sezonama za različite scenarije



Slika 8. Prosečna vrednost pokazatelja ENS po sezonama za različite scenarije

Kao što je prikazano, pokazatelji pouzdanosti se u okviru svake iteracije najpre određuju odvojeno za zimski, prelazni i letnji period. Za svaki sezonski period dobijaju se vrednosti pokazatelja pouzdanosti na osnovu simuliranih događaja u tom periodu. Sezonski pokazatelji zatim se agregiraju na godišnji nivo primenom težinskih koeficijenata koji odgovaraju odnosu broja dana u pojedinom sezonskom periodu i ukupnog broja dana u sva tri perioda. Na ovaj način obezbeđeno je da godišnji pokazatelji pouzdanosti realno odražavaju trajanje pojedinih sezona tokom godine.

Sa Slike 5 uočava se da učestanost prekida napajanja opada sa povećanjem instalisane snage PV sistema i kapaciteta baterije, pri čemu su razlike između scenarija izraženije u zimskom i prelaznom periodu nego tokom leta. Letnji period karakterišu niže vrednosti SAIFI za sve scenarije, što je posledica veće dostupnosti solarne energije i veće verovatnoće da prozjumer tokom ispada mreže ostane snabdeven energijom koju sam proizvede i energijom iz baterijskog skladišta. Razlika između scenarija 4 i 5 je zanemarljiva, što ukazuje na zasićenje efekta povećanja instalisane snage PV sistema u pogledu smanjenja prosečnog broja prekida napajanja potrošača.

Kada je u pitanju pokazatelj SAIDI, sa Slike 6 se može zaključiti da trajanje prekida napajanja po potrošaču opada sa prelaskom na scenarije sa većom instalisanom snagom PV sistema i većim kapacitetom baterije. Najveće vrednosti SAIDI javljaju se u zimskom periodu, dok su u letnjem periodu najniže za sve scenarije. Ovakvo ponašanje je očekivano, budući da je u letnjem periodu veća proizvodnja iz fotonaponskog sistema, što omogućava baterijskom skladištu da duže obezbedi napajanje tokom ispada mreže. Slično kao kod pokazatelja SAIFI, razlike između scenarija 4 i 5 su male, što potvrđuje da dalje povećanje instalisane snage PV sistema ne donosi proporcionalno poboljšanje trajanja prekida.

Sa Slike 7 uočava se smanjenje neisporučene energije prelaskom sa scenarija 1 na scenarije sa većim distribuiranim izvorima energije. ENS ima najveće vrednosti u zimskom periodu, što je posledica veće potrošnje i niže solarne proizvodnje, dok su u letnjem periodu vrednosti ENS najniže. Smanjenje ENS je izraženije pri povećanju kapaciteta baterije (scenariji 2 i 3), nego pri samom povećanju snage PV sistema (scenariji 4 i 5).

Srednje godišnje vrednosti sistemskih pokazatelja pouzdanosti,

dobijene ponderisanjem sezonskih rezultata, prikazane su u Tabeli 2. zajedno sa procentualnim poboljšanjem u odnosu na referentni slučaj bez distribuiranih izvora energije ($\delta SAIFI$ i $\delta SAIDI$). Vrednosti pokazatelja SAIFI i SAIDI u slučaju bez prozjumeru iznose redom 0,0672 1/god i 0,2869 h/god.

U odnosu na referentni slučaj bez distribuiranih izvora energije, svi razmatrani scenariji pokazuju poboljšanje pouzdanosti. Najveća relativna poboljšanja ostvarena su u scenarijima 4 i 5, gde se SAIFI smanjuje za oko 8,5%, dok se SAIDI smanjuje za više od 10%.

Iako scenario 5 ima najveću instalisanu snagu PV sistema, dodatno poboljšanje u odnosu na scenario 4 je minimalno, što potvrđuje postojanje granice nakon koje dalji porast snage PV sistema ne donosi značajna poboljšanja.

U Tabeli 3. prikazani su pokazatelji pouzdanosti na nivou krajnjih korisnika – AIF, AID i raspoloživost napajanja. Date su prosečne vrednosti ovih pokazatelja za sve čvorove sistema, kao i posebno prosečne vrednosti za prozjumerne čvorove i prosečne vrednosti za pasivne potrošače, čime je omogućeno jasno sagledavanje razlika u pouzdanosti napajanja, posmatrano iz uglova različitih kategorija korisnika.

Rezultati jasno pokazuju da prozjumeri imaju znatno povoljnije pokazatelje pouzdanosti u odnosu na pasivne potrošače. Sa povećanjem kapaciteta baterije dolazi do značajnog smanjenja i učestanosti (AIF) i trajanja prekida (AID) kod prozjumeru, dok se pokazatelji pasivnih potrošača praktično ne menjaju.

Raspoloživost napajanja kod prozjumeru dostiže vrednosti veće od 0,99999 u scenarijima 4 i 5, što potvrđuje da lokalni distribuirani izvori energije značajno povećavaju pouzdanost napajanja iz perspektive krajnjeg korisnika, čak i kada sistemski pokazatelji pokazuju umerenija poboljšanja.

Tabela 2. Srednje godišnje vrednosti sistemskih pokazatelja pouzdanosti – osnovna test mreža

	SAIFI [1/god]	$\delta SAIFI$	SAIDI [h/god]	$\delta SAIDI$	ENS [kWh/god]
SC 1	0,0662	1,49 %	0,2803	2,30 %	6,189
SC 2	0,0631	6,10 %	0,2628	8,40 %	5,985
SC 3	0,0621	7,59 %	0,2590	9,72 %	5,911
SC 4	0,0615	8,48 %	0,2564	10,63 %	5,832
SC 5	0,0615	8,48 %	0,2566	10,56 %	5,838

Nakon analize rezultata dobijenih za režim samopotrošnje, razmotren je i alternativni režim upravljanja baterijskim skladištem energije – režim rezervnog napajanja. Za razliku od režima samopotrošnje, režimu rezervnog napajanja baterijsko skladište se ne koristi za pokrivanje potrošnje u uslovima normalnog rada sistema, već se njegova energija isključivo rezerviše za slučajeve ispada mrežnog napajanja. Ovakav način upravljanja omogućava veći raspoloživi energetski kapacitet baterije u toku prekida napajanja, čime se unapređuje pouzdanost napajanja krajnjih korisnika.

Radi uporedne analize, za iste scenarije prikazano je poređenje sistemskih pokazatelja pouzdanosti SAIFI, SAIDI i ENS za oba

režima upravljanja baterijom. Na Slici 9. prikazane su srednje godišnje vrednosti ovih pokazatelja, dobijene ponderisanjem sezonskih rezultata.

Iz prikazanih rezultata uočava se da u režimu rezervnog napajanja, u odnosu na režim samopotrošnje, dovodi do drastično nižih vrednosti *SAIFI*, *SAIDI* i *ENS* u svim razmatranim scenarijima, što potvrđuje da očuvanje kapaciteta baterije za vreme prekida napajanja može efikasnije smanjiti broj i trajanje efektivnih prekida, kao i neisporučenu energiju. Iako je ovakav režim upravljanja baterijom neisplativ za korisnika, jer se u trenucima kada PV sistem ne proizvodi dovoljno energije da pokrije potrošnju, energija uzima isključivo iz mreže, može se zaključiti da daje veoma dobre rezultate u pogledu poboljšanja pokazatelja pouzdanosti sistema.

Tabela 3. Godišnji pokazatelji pouzdanosti na nivou potrošača za različite scenarije – osnovna test mreža

		<i>AIF</i> [1/god]	<i>AID</i> [h/god]	Raspoloživost
Scenario 1	Svi čvorovi	0,066248	0,280396	0,999968
	Prozumeri	0,056268	0,230512	0,999974
	Pasivni potrošači	0,068119	0,289750	0,999967
Scenario 2	Svi čvorovi	0,063100	0,262769	0,999970
	Prozumeri	0,035903	0,117632	0,999987
	Pasivni potrošači	0,068200	0,289983	0,999967
Scenario 3	Svi čvorovi	0,062104	0,258901	0,999970
	Prozumeri	0,029445	0,089988	0,999990
	Pasivni potrošači	0,068228	0,290572	0,999967
Scenario 4	Svi čvorovi	0,061510	0,256467	0,999971
	Prozumeri	0,026038	0,076775	0,999991
	Pasivni potrošači	0,068161	0,290159	0,999967
Scenario 5	Svi čvorovi	0,061532	0,256593	0,999971
	Prozumeri	0,025898	0,076437	0,999991
	Pasivni potrošači	0,068214	0,290372	0,999967

raspoloživost napajanja za prozumere, za različite razmatrane scenarije.

Prikazani rezultati pokazuju izražen uticaj režima rezervnog napajanja na pokazatelje pouzdanosti na nivou prozumerera, dok su vrednosti pokazatelja za pasivne potrošače praktično nepromenjene u odnosu na referentni slučaj. To je i očekivano, budući da pasivni potrošači ne raspolažu lokalnim izvorima energije i skladištem, te u potpunosti zavise od napajanja iz distributivne mreže.

Tabela 4. Godišnji pokazatelji pouzdanosti za prozumere za različite scenarije – osnovna test mreža

	<i>AIF</i> [1/god]	<i>AID</i> [h/god]	Raspoloživost
Scenario 1	0,025192	0,100625	0,999989
Scenario 2	0,015912	0,051046	0,999994
Scenario 3	0,003857	0,005996	0,999999
Scenario 4	0,003729	0,005788	0,999999
Scenario 5	0,003751	0,005795	0,999999

Za prozumere, vrednosti pokazatelja *AIF* i *AID* su višestruko niže u poređenju sa pasivnim potrošačima, pri čemu dostupnost napajanja dostiže gotovo jediničnu vrednost u scenarijima sa većim kapacitetom baterijskog skladišta. Ovi rezultati ukazuju da u režimu rezervnog napajanja baterijsko skladište energije efikasno eliminiše ili značajno ublažava efektivne prekide napajanja koje prozumeri doživljavaju tokom ispada mrežnog napajanja.

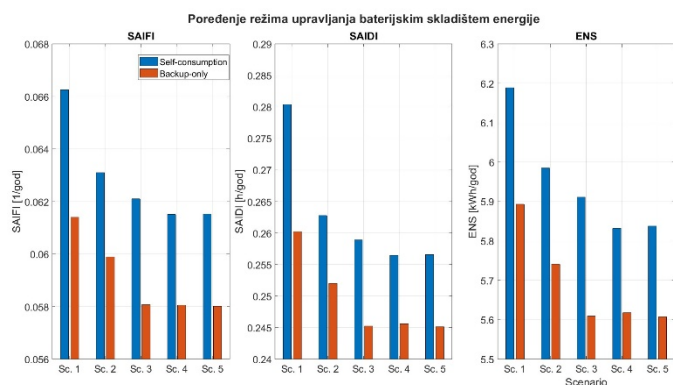
Dalje se uočava da povećanje kapaciteta baterijskog skladišta ima dominantniji uticaj na smanjenje *AIF* i *AID* pokazatelja u odnosu na povećanje instalisane snage fotonaponskog sistema. To je posebno izraženo u poređenju scenarija sa istom instalisanom snagom PV sistema, ali različitim kapacitetom baterije, gde veći kapacitet baterije omogućava duže autonomno napajanje tokom prekida.

V.2. Model NN distributivne mreže sa poluprstenovima

Pored osnovne radijalne topologije, analizirana je i distributivna mreža sa poluprstenastom strukturom, kako bi se ispitaio uticaj topoloških karakteristika mreže na pokazatelje pouzdanosti. Poluprstenasta konfiguracija omogućava napajanje zdravih delova sistema preko alternativnih puteva nakon izolacije mesta kvara, zahvaljujući dodatnim vezama između izvoda. Ostali elementi simulacionog modela, uključujući pozicije prozumerera, sezonske profile potrošnje i proizvodnje, kao i strategije upravljanja baterijskim skladištem energije, ostali su nepromenjeni, čime je obezbeđeno objektivno poređenje rezultata između razmatranih topologija.

U Tabelama 5. i 6. prikazane su srednje godišnje vrednosti sistemskih pokazatelja pouzdanosti, dobijene ponderisanjem sezonskih rezultata za režim samopotrošnje i za režim rezervnog napajanja, respektivno. Bazne vrednosti pokazatelja pouzdanosti u slučaju topologije mreže sa poluprstenovima su: *SAIFI* = 0,0672 1/god i *SAIDI* = 0,1922 h/god.

Analiza rezultata pokazuje da distributivna mreža sa poluprstenastom strukturom ostvaruje bolji pokazatelj *SAIDI* u



Slika 9. Srednje godišnje vrednosti pokazatelja pouzdanosti u režimu samopotrošnje i režimu rezervnog napajanja

S obzirom na to da režim rezervnog napajanja direktno utiče na pouzdanost napajanja krajnjih korisnika sa lokalnim izvorima energije, u Tabeli 4. su prikazani pokazatelji *AIF*, *AID* i

baznom slučaju u poređenju sa osnovnom radikalnom topologijom, dok pokazatelj *SAIFI* ostaje identičan, što je posledica topologije mreže (u obe konfiguracije mreže svi potrošači na izvodu na kom je nastao kvar ostaju bez napajanja bar 1h), kao i nepromenjene učestalosti pojave kvarova u mreži. Bazna vrednost *SAIDI* pokazatelja je značajno niža, budući da topologija mreže omogućava brzu izolaciju mesta kvara i ponovno napajanje zdravih delova sistema. U tom slučaju, korisnici koji nisu direktno pogođeni kvarom ostaju bez napajanja samo tokom faze lociranja i izolovanja kvara u trajanju od 1 h, dok su u osnovnoj test mreži, ukoliko su se nalazili iza mesta kvara, bili bez napajanja tokom čitavog vremena popravke.

Takođe, u distributivnoj mreži sa poluprstenastom strukturom, u režimu samopotrošnje, kao i u režimu rezervnog napajanja, se ostvaruju bolji pokazatelji pouzdanosti u razmatranim scenarijima sa prozjumerima u odnosu na osnovnu test mrežu.

Doprinos prozjumeru poboljšanju pokazatelja *SAIFI* ogleda se prvenstveno u smanjenju efektivno doživljenih prekida napajanja u situacijama kada krajnji korisnici nisu direktno pogođeni kvarom. U razmatranom modelu, u slučaju kvara na izvodu, svi korisnici ostaju bez napajanja iz distributivne mreže tokom inicijalne faze lociranja mesta kvara, koja je usvojena u trajanju od 1 h. Nakon tog perioda, zdravi delovi mreže se ponovo napajaju, dok se sanacija oštećene deonice nastavlja do isteka ukupnog vremena popravke od 6 h. Ukoliko se prozjumer ne nalazi na deonici koja je pogođena kvarom, prekid napajanja iz mreže za tog korisnika ograničen je na inicijalni jednosatni interval, umesto da traje tokom celokupnog vremena popravke. Imajući u vidu da je verovatnoća da prozjumer u kraćem vremenskom intervalu (1 h) ostane bez mogućnosti sopstvenog napajanja manja nego tokom dužeg intervala (6 h), smanjuje se verovatnoća nastanka efektivnog prekida napajanja (odnosno situacije u kojoj ni proizvodnja iz PV sistema, ni energija uskladištena u baterijskom sistemu ne mogu da pokriju potrošnju). Posledično, dolazi do smanjenja učestalosti registrovanih prekida kod prozjumeru, što direktno utiče na niže vrednosti pokazatelja *SAIFI*.

Tabela 5. Srednje godišnje vrednosti sistemskih pokazatelja pouzdanosti u režimu samopotrošnje – mreža sa poluprstenovima

	<i>SAIFI</i> [1/god]	$\delta SAIFI$	<i>SAIDI</i> [h/god]	$\delta SAIDI$	<i>ENS</i> [kWh/god]
SC 1	0,0661	1,70 %	0,1878	2,28 %	4,140
SC 2	0,0627	6,75 %	0,1758	8,52 %	4,000
SC 3	0,0616	8,39 %	0,1726	10,19 %	3,942
SC 4	0,0610	9,28 %	0,1712	10,92 %	3,890
SC 5	0,0610	9,28 %	0,1712	10,92 %	3,895

Tabela 6. Srednje godišnje vrednosti sistemskih pokazatelja pouzdanosti u režimu rezervnog napajanja – mreža sa poluprstenovima

	<i>SAIFI</i> [1/god]	$\delta SAIFI$	<i>SAIDI</i> [h/god]	$\delta SAIDI$	<i>ENS</i> [kWh/god]
SC 1	0,0603	10,32 %	0,1727	10,14 %	3,910
SC 2	0,0589	12,41 %	0,1675	12,84 %	3,818
SC 3	0,0578	14,04 %	0,1635	14,92 %	3,743
SC 4	0,0578	14,04 %	0,1633	15,03 %	3,738
SC 5	0,0578	14,04 %	0,1632	15,08 %	3,736

Poboljšanje pokazatelja *SAIDI* je takođe prisutno, budući da on direktno zavisi od ukupnog trajanja prekida napajanja. Prisustvo lokalne proizvodnje i baterijskog skladišta energije dodatno smanjuje efektivno vreme trajanja kvara, čime se ostvaruje smanjenje vrednosti *SAIDI* pokazatelja. Kao posledica smanjenja pokazatelja *SAIFI* i *SAIDI*, u konfiguraciji mreže sa poluprstenovima, smanjena je i količina neisporučene električne energije, odnosno pokazatelj *ENS*.

U Tabelama 7. i 8. su prikazani pokazatelji *AIF*, *AID* i raspoloživost napajanja za prozjumer, za različite razmatrane scenarije, u slučaju samopotrošnje i u slučaju režima rezervnog napajanja, respektivno.

Tabela 7. Godišnji pokazatelji pouzdanosti za prozjumer za različite scenarije u režimu samopotrošnje – mreža sa poluprstenovima

	<i>AIF</i> [1/god]	<i>AID</i> [h/god]	Raspoloživost
Scenario 1	0,054861	0,159879	0,999982
Scenario 2	0,033374	0,082553	0,999991
Scenario 3	0,026204	0,062928	0,999993
Scenario 4	0,022597	0,053640	0,999994
Scenario 5	0,022343	0,052644	0,999994

Tabela 8. Godišnji pokazatelji pouzdanosti za prozjumer za različite scenarije u režimu rezervnog napajanja – mreža sa poluprstenovima

	<i>AIF</i> [1/god]	<i>AID</i> [h/god]	Raspoloživost
Scenario 1	0,017675	0,063412	0,999993
Scenario 2	0,009540	0,030543	0,999997
Scenario 3	0,002268	0,003528	1,000000
Scenario 4	0,002244	0,003467	1,000000
Scenario 5	0,002310	0,003579	1,000000

Dodatno poboljšanje pokazatelja *AIF* i *AID* u mreži sa poluprstenastom topologijom, u odnosu na osnovnu test mrežu, posledica je smanjenja broja i trajanja efektivnih prekida napajanja kod prozjumeru u slučajevima kada se kvar javlja na izvodu na kom se prozjumeri nalaze i kada nisu direktno pogođeni mestom kvara, zahvaljujući mogućnosti brže izolacije kvara i alternativnog napajanja zdravih delova mreže.

VI ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su pokazatelji pouzdanosti niskonaponskog distributivnog sistema u prisustvu prozjumeru sa fotonaponskim sistemima i baterijskim skladištima energije, primenom Monte Karlo simulacija. Posebna pažnja posvećena je razlikovanju mrežnih ispada i efektivnih prekida napajanja koje krajnji korisnici stvarno doživljavaju, kao i uticaju topoloških karakteristika mreže na ostvarene vrednosti pokazatelja pouzdanosti.

Rezultati u slučaju osnovnog modela niskonaponske distributivne mreže pokazuju da integracija prozjumeru dovodi do smanjenja vrednosti sistemskih pokazatelja *SAIFI*, *SAIDI* i *ENS* u odnosu na referentni slučaj bez distribuiranih izvora energije. Povećanje instalisane snage fotonaponskog sistema i kapaciteta baterijskog skladišta dodatno unapređuje pouzdanost napajanja, uz uočeno

zasićenje efekta za veće vrednosti ovih veličina. Sezonska analiza je pokazala izraženu zavisnost pokazatelja pouzdanosti od raspoloživosti solarne energije, sa najpovoljnijim rezultatima u letnjem periodu.

Analiza na nivou krajnjih korisnika potvrdila je da prozumeri ostvaruju znatno niže vrednosti pokazatelja *AIF* i *AID* u poređenju sa pasivnim potrošačima, uz visoku raspoloživost napajanja u scenarijima sa većim kapacitetom baterijskog skladišta, čime je ukazano na ograničenja standardnih sistemskih pokazatelja u mrežama sa distribuiranim izvorima energije.

Poređenje različitih mrežnih topologija – osnovnog modela niskonaponske distributivne mreže i niskonaponske distributivne mreže sa poluprstenovima pokazalo je da struktura mreže značajno utiče na pokazatelje pouzdanosti, posebno na trajanje prekida napajanja. Zahvaljujući kraćem trajanju prekida napajanja iz mreže (ograničenom na inicijalni jednosatni interval za korisnike koji se ne nalaze na pogođenoj deonici), povećava se verovatnoća da prozumeri sopstvenom proizvodnjom iz PV sistema kao i energijom koja je uskladištena u baterijskom sistemu u potpunosti pokriju potrošnju. Time se smanjuje broj efektivno doživljenih prekida napajanja, što se direktno odražava na niže vrednosti pokazatelja *SAIFI*, a posredno i na dodatno smanjenje *SAIDI*. Ovaj efekat naročito je izražen u režimu rezervnog napajanja.

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da unapređenje pouzdanosti distributivnih sistema u savremenim mrežama zahteva istovremeno razmatranje topologije mreže, integracije distribuiranih izvora energije i strategije upravljanja baterijskim skladištima. Predloženi metodološki okvir omogućava kvantitativno sagledavanje ovih međuzavisnih uticaja i može predstavljati osnovu za dalja istraživanja koja bi uključila složenije topologije mreže, veći broj elemenata u mreži, ekonomske aspekte, optimizaciju položaja i veličine distribuiranih izvora, kao i napredne strategije upravljanja u okviru aktivnih distributivnih mreža.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (broj ugovora: 451-03-137/2025-03/200103).

LITERATURA

- [1] Nahman, J., Mijailović, V. *Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije*, Akademski misao, Beograd, 2009.
- [2] Florencias-Oliveros, O., González-de-la-Rosa, J.J., Agüera-Pérez, A., Palomares-Salas, J.-C. Discussion on Reliability and Power Quality in the Smart Grid: a prosumer approach of a time scalable index, in Proc.

International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18), Salamanca, Spain, Vol. 1, No. 16, pp. 109–113, 21–23 March 2018.

- [3] Kamgala, A.K., Singh, C., Xie, L. Predictive Reliability Assessment of Distribution Grids with Residential Distributed Energy Resources, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 2598–2609, 2025. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2025.03040>
- [4] Adefarati, T., Bansal, R.C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation, *Applied Energy*, Vol. 185, Part 1, pp. 158–171, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.087>
- [5] Saboori, H., Hemmati, R., Ahmadi Jirdehi, M. Reliability improvement in radial electrical distribution network by optimal planning of energy storage systems, *Energy*, Vol. 93, Part 2, pp. 2299–2312, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.125>
- [6] Bartecka, M., Marchel, P., Zagrajek, K., Lewandowski, M., Kłos, M. Reliability Model of Battery Energy Storage Cooperating with Prosumer PV Installations, *Energies*, Vol. 17, No. 23, 5839, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17235839>
- [7] Kamgala, A.K., Singh, C. Impact of system parameters and geospatial variables on the reliability of residential systems with PV and energy storage, *Applied Energy*, Vol. 344, 121266, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121266>
- [8] Zarate-Perez, E., Santos-Mejia, C., Sebastián, R. Reliability of autonomous solar-wind microgrids with battery energy storage system applied in the residential sector, *Energy Reports*, Vol. 9, Suppl. 9, pp. 172–183, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.239>
- [9] Wang, Z., Yang, R., Wang, L., Tan, J. Reliability assessment of integrated residential distribution and PHEV systems using Monte Carlo simulation, in Proc. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1–5, 21–25 July 2013. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672618>
- [10] Garcia, L., Opazo, H., Lopez, E. Switches optimum location in medium voltage network via minimization of energy not supplied, in Proc. *16th International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP'06)*, Puebla, Mexico, pp. 44–44, 01 March - 27 February 2006. <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2006.58>
- [11] Pravila o radu distributivnog sistema “EPS Distribucija”, d.o.o. Beograd, 2017. http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2025_08/PP_008_2025_001.htm [pristupljeno 12.02.2026]
- [12] Wu, M.Y., Ridzuan, M.I., Djokic, S.Z. Smart grid functionalities for improving reliability of rural electricity networks, in Proc. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*, Belgrade, Serbia, pp. 1–7, 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1036>
- [13] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en [pristupljeno 12.02.2026]

AUTORI

Doroteja Zarev - asistent, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, doroteja.zarev@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0005-4066-9344](https://orcid.org/0009-0005-4066-9344)
Jelisaveta Krstivojević - docent, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, j.krstivojevic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4906-6433](https://orcid.org/0000-0003-4906-6433)

Analysis of Distribution System Reliability Indices Considering the Presence of Prosumers with Battery Energy Storage

Abstract – The conventional calculation of reliability indices of distribution systems is most often based on the assumption that consumers are passive and fully dependent on the electricity supplied from the distribution network.

However, modern distribution systems increasingly include prosumers equipped with local energy sources and battery energy storage systems, which may significantly affect how power supply interruptions are experienced by end users. This paper presents the calculation of reliability indices of a distribution system that includes distributed energy resources in the form of prosumers with photovoltaic systems and battery energy storage. Special attention is given to the distinction between network interruptions and the effective power interruptions actually experienced by prosumers, where an interruption is defined as a condition in which local generation and energy storage are insufficient to meet the load demand during a grid outage. The prosumer model comprises a photovoltaic system, a battery energy storage system, and an energy management system, while uncertainties in the input data for reliability assessment are considered through Monte Carlo simulations. The paper analyses the impact of prosumer presence on distribution system reliability indices, as well as the influence of photovoltaic system size, battery storage capacity, and battery operating mode on the resulting reliability indices.

Index Terms – Distribution system reliability, Distributed energy resources, Prosumers, Battery energy storage, Monte Carlo simulations