

Mia Miletić  
Elektrodalmacija  
[mia.miletic@hep.hr](mailto:mia.miletic@hep.hr)

Vinka Antonijević  
HEP-ODS  
[vinka.antonijevic@hep.hr](mailto:vinka.antonijevic@hep.hr)

## POGONSKI UTJECAJI I IZAZOVI PRIKLJUČENJA SOLARNIH ELEKTRANA NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU ELEKTRODALMACIJE

### SAŽETAK

Obnovljivi izvori energije, poput solarnih elektrana i vjetroelektrana, imaju značajan utjecaj na distribucijsku mrežu zbog svoje intermitentnosti i varijabilnosti u proizvodnji električne energije. Kada proizvodnja iz obnovljivih izvora premašuje trenutnu potrošnju, višak energije može dovesti do problema u stabilnosti mreže, kao što su preopterećenje transformatora i poremećaj drugih mrežnih komponenti. S druge strane, u periodima kada proizvodnja iz obnovljivih izvora opadne, povećava se ovisnost mreže o konvencionalnim izvorima energije (poput termoelektrana), što može dovesti do viših troškova i negativnih utjecaja na okoliš. Kako bi se izazovi minimizirali, ključno je unaprijediti infrastrukturu distribucijske mreže, uključujući implementaciju pametnih mreža, sustava za pohranu energije i fleksibilnih tržišta električne energije, čime bi se osigurala stabilnost i učinkovitost mreže. Na području Elektrodalmacije integrirano je nekoliko većih solarnih elektrana, a očekuje se daljnji porast njihovog broja. U ovom radu prikazan je način priključenja solarnih elektrana na distribucijsku mrežu, analiza njihovih pogonskih utjecaja te nekoliko primjera postojećih solarnih elektrana na području Elektrodalmacije.

**Ključne riječi:** solarne elektrane, analiza pogonskih utjecaja, stabilnost distribucijske mreže

## OPERATIONAL IMPACTS AND CHALLENGES OF CONNECTING SOLAR POWER PLANTS TO THE DISTRIBUTION NETWORK OF ELEKTRODALMACIJA

### SUMMARY

Renewable energy sources, such as solar power plants and wind farms, have a significant impact on the distribution network due to their intermittency and variability in electricity production. When production from renewable sources exceeds current consumption, excess energy can lead to stability issues in the network, such as transformer overload and disruption of other network components. On the other hand, during periods when renewable energy production drops, the network becomes more dependent on conventional energy sources (such as thermal power plants), which can lead to higher costs and negative environmental impacts. To minimize these challenges, it is crucial to improve the infrastructure of the distribution network, including the implementation of smart grids, energy storage systems, and flexible electricity markets, to ensure the stability and efficiency of the network. In the Elektrodalmacija area, several larger solar power plants have already been integrated, and further growth in their numbers is expected. This paper presents the process of connecting solar power plants to the distribution network, analyzes their operational impacts, and provides several examples of existing solar power plants in the Elektrodalmacija region.

**Key words:** solar power plants, power analysis, stability of distribution network

## **1. UVOD**

U posljednjem desetljeću koncept vođenja mreže se skroz promijenio. Napuštaju se stabilni izvori proizvodnje električne energije poput termoelektrana pa čak i nuklearnih elektrana (ako pogledamo Europu, u posljednjih nekoliko godina Njemačka je zatvorila većinu svojih nuklearnih elektrana) te se kako svijet, Europa pa tako i Hrvatska okreće proizvodnji iz obnovljivih izvora energije (sunca i vjetra). Smanjuje se onečišćenje okoliša no, povećava se nestabilnost proizvodnje električne energije koja ovisi o količini sunčanih dana, brzini vjetra i tome sličnom. To utječe i na samo vođenje mreže te mreža iz pasivne postaje aktivna.

### **1.1. Pasivna mreža**

U pasivnoj distribucijskoj mreži (tj. mreži koja je bez aktivnog izvora proizvodnje energije kao što su solarne elektrane, male hidroelektrane, vjetroelektrane), tokovi snaga u granama mreže nastaju isključivo zbog potrošnje (električna energija koju krajnji korisnici troše) i gubitaka (energetski gubici u mreži).

Na radijalnim izvodima distribucijske mreže, snaga se smanjuje prema kraju izvoda, jer udaljenost od pojne točke (obično trafostanica ili glavnog energetskog čvorišta) povećava gubitke i padove napona.

Padovi napona rastu s udaljenostima od pojne točke, jer gubici i potrošnja uzrokuju smanjenje napona prema krajnjim dijelovima mreže. Padovi napona ovise o razini opterećenja te što je opterećenje veće, to su i padovi napona veći.

### **1.2. Aktivna mreža**

Kada se u distribucijsku mrežu priključi npr. solarna elektrana, ona stvara aktivne tokove snage. U ovom slučaju, mreža postaje aktivna, jer osim što dolazi do potrošnje, sada se u mrežu injektira i proizvedena energija (radna i jalova snaga) iz priključene elektrane.

Ako nema potrošnje na izvodu, snaga koju elektrana proizvodi teče prema pojnoj točki (npr. trafostanici), u jednakim iznosima kroz sve grane mreže. Time se mijenja ravnoteža u mreži jer tokovi snage koji nastaju uslijed proizvodnje i oni koji nastaju uslijed potrošnje imaju suprotan smjer.

U trenutku priključenja elektrane, dolazi do superpozicije tokova snaga, jer se kombiniraju tokovi snage nastali zbog potrošnje i oni nastali zbog proizvodnje elektrane.

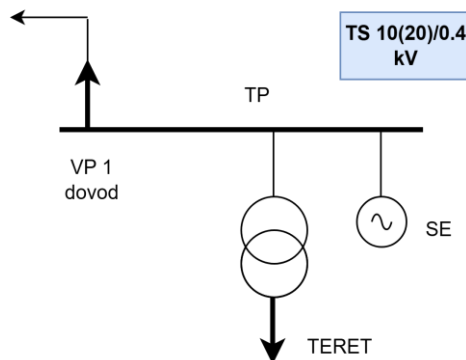
## **2. NAČINI PRIKLJUČENJA SOLARNIH ELEKTRANA**

Za priključak na postojeći vod 10(20) kV solarne elektrane veće snage (od 0.5 MVA do 10 MVA) na sredjenaponsku distribucijsku mrežu ističu se dva karakteristična slučaja:

1. priključak po sistemu ulaz/izlaz
2. radijalni (T) spoj. [1]

### **2.1. Radijalni T spoj**

Radijalni (T) spoj je često korištena konfiguracija za priključivanje veće solarne elektrane na distribucijsku mrežu, osobito kada je elektrana smještena na većoj udaljenosti od najbliže priključne trafostanice (TS) ili u slučajevima kada je potrebno povezati niskonaponsku (NN) mrežu s visokonaponskom (SN) mrežom.



Slika 1. Jednopolna shema radijalnog priključka

"T" konfiguracija znači da se povezuje jedna glavna linija (npr. zračni vod ili dalekovod) koja vodi od glavne distribucijske mreže do priključne trafostanice, a zatim se iz te trafostanice vodi daljnji vod do solarne elektrane. Dakle, između glavnog voda i elektrane postoji samo jedan pravac prijenosa energije. U slučaju kvara na bilo kojem dijelu te dionice, elektrana ostaje bez dovoda energije te ispada sa mreže. Takav spoj omogućava jednostavno proširenje distribucijske mreže bez potrebe za instalacijom kompleksne infrastrukture (kao što je kružni ili mrežni spoj), što može biti skupo i zahtjevno u određenim uvjetima. Ovaj tip spoja najčešće se primjenjuje u ruralnim područjima gdje su postojeći dalekovodi već postavljeni na zračnoj visokonaponskoj mreži, a nije potrebno ulagati u dodatnu infrastrukturu.

Koristi se u situacijama kada je zračna SN mreža već postavljena jer omogućuje brže povezivanje sa što manje infrastrukturnih zahvata što ga čini jednostavnim za projektiranje i implementaciju u kratkom vremenskom razdoblju. Ekonomičniji je od drugih složenih metoda (kao što su kružni spojevi ili spajanja u mreži) jer zahtijeva manje instalacija i manje opreme. Manje komplicirana infrastruktura smanjuje početne troškove te omogućava lakše održavanje. Jednostavnost, manji troškovi i brza implementacija su glavne prednosti radijalnog spoja. Nedostaci radijalnog spoja su niža pouzdanost, ograničeni kapacitet i ovisnost o glavnoj liniji. Dakle, u slučaju kvara na vodu ili drugim komponentama mreže cijeli sustav može biti isključen tj. dolazi do prekida opskrbe električnom energijom što ga čini manje pouzdanim i ovisnim o glavnoj liniji. Ima niži kapacitet u smislu prijenosa energije u odnosu na kružni ili mrežni spoj. Ako se očekuje velika proizvodnja energije može doći do preopterećenja glavnog voda.

Prilikom izvedbe radijalnog spoja, potrebno je:

- osigurati dovoljno kapaciteta za prijenos energije od solarne elektrane prema distribucijskoj mreži. Ovisno o veličini elektrane, potrebno je osigurati odgovarajući promjer vodiča i kapacitet trafostanice.
- zaštititi od kratkih spojeva i preopterećenja. Na svim dijelovima sustava trebaju biti instalirani odgovarajući zaštitni uređaji kako bi se spriječili problemi u slučaju kratkog spoja ili preopterećenja u sustavu.
- ugraditi brojila koja omogućuju praćenje količine energije koja se predaje u mrežu i registraciju svih potrebnih podataka za obračun potrošnje i otkupa energije.

Radijalni spoj je vrlo česta opcija za veće solarne elektrane u ruralnim područjima Hrvatske gdje su razmaci između naselja ili industrijskih objekata i glavnih distribucijskih linija veći. Ako se solarna elektrana nalazi na većoj udaljenosti od glavne mreže, radijalni spoj omogućava učinkovitije spajanje bez potrebe za izgradnjom složenih infrastrukture. Iako ima svoje prednosti u pogledu jednostavnosti i nižih troškova, također je važno uzeti u obzir nedostatke poput niže pouzdanosti u slučaju kvarova na mreži.

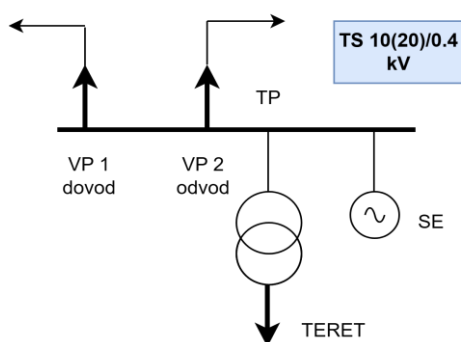
## 2.2. Priključak po sustavu ulaz/izlaz

Priključak prema sustavu ulaz/izlaz (poznat i kao „entry/exit“ sustav) predstavlja jedan od naprednijih načina za povezivanje solarnih elektrana s distribucijskom mrežom. Ovaj tip priključka

omogućava interpolaciju (umetanje) u već postojeći dalekovod ili kabel, što može biti vrlo korisno u različitim situacijama, posebno kada je potrebno razdvojiti ili poboljšati distribuciju energije u mreži.

Sustav ulaz/izlaz znači da se solarnoj elektrani dodaje nova priključna točka u mrežu, koja je izvedena na način da se postojeći dalekovod ili kabelski vod razdvoji u dvije dionice:

- Ulaz (entry) - u ovoj točki „ulazi“ energija iz solarnih panela prema distribucijskoj mreži.
- Izlaz (exit) - ovdje dolazi do prijenosa ili "izlaza" energije iz mreže prema krajnjim korisnicima ili drugim dijelovima mreže.



Slika 2. Jednopolna shema priključka po sustavu ulaz/izlaz

Stoga se pri ovoj konfiguraciji na postojećem vodu vrši interpolacija (umetanje) novih priključaka, gdje se elektrana spaja tako da se optimizira distribucija i eventualno povećava fleksibilnost sustava.

Ovaj tip priključka nudi nekoliko važnih prednosti tako što povećava fleksibilnost za distribuciju energije, razdvajanje postojećeg voda, optimizacija zaštite, manju udaljenost, smanjenje opterećenja na jednom dijelu mreže te veću pouzdanost i stabilnost. Kada se solarna elektrana poveže u ulaz/izlaz sustav, postoji veća mogućnost za plasman energije koju elektrana proizvodi. Time se smanjuje rizik od prekida u opskrbi jer energija može putovati različitim smjerovima prema različitim dijelovima mreže. Priključak ulaz/izlaz podrazumijeva razdvajanje postojećeg dalekovoda na dvije dionice. Ovo omogućava da se povećaju mogućnosti zaštite i održavanja svake dionice zasebno, što povećava sigurnost cijelog sustava. Na primjer, ako dođe do kvara na jednom dijelu dalekovoda, drugi dio može ostati u funkciji i nastaviti opskrbu energijom. Razdvajanje na dvije dionice omogućava da se kvalitetnije štite oba dijela mreže, jer se može implementirati specifična zaštita na svakom dijelu. Također, ovaj sustav omogućava bolju detekciju kvarova i brže reagiranje na njih. Priključak ovog tipa obično se koristi u situacijama kada je solarna elektrana smještena bliže glavnom priključku na mrežu, što omogućava brže povezivanje i niže troškove instalacije. Osim toga, kod ovakvih priključaka nije potrebna velika infrastruktura, pa je proces ugradnje brži i jeftiniji. Ovaj sustav je vrlo prikladan za kabelsku distribucijsku mrežu, gdje je poželjno izgraditi novu pojnu točku ili prilagoditi postojeći sustav s minimalnim utjecajem na ostatak mreže. U kabelskim mrežama lakše je implementirati ovakav priključak jer već postoji mogućnost integracije u postojeću infrastrukturu. Ovaj sustav zahtijeva kabliranje ili dalekovod koji se koristi za spajanje elektrane na mrežu. Mreža se razdvaja na dvije dionice, a svaka dionica se može posebno zaštititi i održavati. Prilikom odabira mjesta za ulaz/izlaz, važno je razmotriti faktore poput dostupnosti infrastrukturnih objekata (kao što su trafostanice i zaštitne opreme), pristupnosti mjernim točkama i mogućnostima za prijenos energije. Nakon što je elektrana priključena, na sustavu je nužno postaviti zaštitu od kratkog spoja i preopterećenja, te implementirati sustave za mjerna brojila koja bilježe energiju koja se predaje u mrežu, kao i sustave za daljinsko praćenje. Razdvajanjem postojećeg voda i stvaranjem novih pojnihih točaka, energetska sustav postaje uravnoteženiji. Ovisno o potrošnji i proizvodnji, energija može biti redistribuirana u različitim smjerovima, čime se smanjuje preopterećenje jednog dijela mreže. Ako dođe do kvara u jednom dijelu mreže, sustav može nastaviti raditi u manjem obimu jer su različiti dijelovi mreže odvojeni i zaštićeni.

Ovaj tip priključka najčešće se koristi u sljedećim situacijama:

- kada je elektrana smještena u blizini već postojećeg dalekovoda ili kablenskog voda - ovaj tip priključka omogućava brže i jeftinije spajanje na mrežu.
- za elektrane s većim kapacitetom - ako je solarna elektrana veća, sustav ulaz/izlaz omogućava bolje upravljanje distribucijom proizvedene energije čime se smanjuje rizik od preopterećenja i nestabilnosti u mreži.
- za veću distribuciju i prodaju električne energije - omogućava lakše slanje viška proizvedene energije u širu mrežu povećavajući fleksibilnost u distribuciji energije.
- u slučaju kablrane SN mreža - ako se koristi kablenska distribucijska mreža, ovaj priključak omogućava manju potrebu za izgradnjom novih infrastrukturnih objekata i veću efikasnost u raspodjeli energije.

Iako ovaj sustav nudi brojne prednosti, postoje i određeni nedostaci kao što je kompleksnost implementacije i većeg troška u slučaju složenih mreža. Za izvođenje ovog tipa priključka potrebna je precizna koordinacija između različitih dijelova mreže, jer se radi o razdvajanju postojećih vodova, što može zahtijevati dodatne tehničke intervencije. Iako je ovo optimalno za kraće udaljenosti i postojeće infrastrukture, u kompleksnijim mrežama ili s većim udaljenostima, može doći do većih troškova povezanih s modificiranjem i održavanjem postojećih dalekovoda.

### 3. ANALIZA POGONSKOG STANJA

Provjera uvjeta na mreži je ključni korak u postupku priključenja veće solarne elektrane (preko 10 kW) na distribucijsku mrežu. Ovaj korak osigurava da će sustav biti pravilno integriran u postojeću mrežnu infrastrukturu i da neće izazvati tehničke probleme poput preopterećenja ili pada kvalitete napona.

Operator distribucijske mreže (HEP-ODS) prvo analizira kapacitet mreže u području gdje se planira priključenje solarne elektrane. Provode se sljedeće provjere:

- povoljnost za priključenje - provodi se analiza dostupnog slobodnog kapaciteta u sustavu distribucijske mreže. Mreža mora imati dovoljno kapaciteta da podnese dodatno opterećenje koje će izazvati nova elektrana.
- kapacitet transformatora - provodi se analiza trenutne opterećenosti transformatora jer se solarne elektrane obično povezuju s postojećim transformatorima koji se nalaze u trafostanicama na koje se priključuje solarna elektrana. Ako su postojeći transformatori već na granici kapaciteta, potrebna je zamjena postojećeg transformatora novim većeg kapaciteta tj. veće snage.
- „zdravlje“ i stabilnost mreže - provodi se ispitivanje stabilnosti mreže s obzirom na dodatnu proizvodnju energije iz solarne elektrane, uključujući mogućnost fluktuacija napona zbog povećane proizvodnje ili potrošnje.

Udaljenost između solarne elektrane i najbliže trafostanice ima značajan utjecaj na troškove i tehničku izvedivost priključenja. Dug put od elektrane do trafostanice može zahtijevati postavljanje dodatne infrastrukture (npr. dalekovode ili kablove), što može povećati cijenu i složenost priključenja. Potrebno je razmotriti dužinu trase i mogućnost optimizacije priključenja. Što je veća udaljenost, to će instalacija prijenosnih linija ili kabela biti skuplja i tehnički zahtjevnija. Razmatraju se alternative za smanjenje troškova i složenosti. Na primjer, moguće je koristiti postojeće infrastrukturne objekte (npr. postojeće dalekovode), ako to omogućava distribucijska mreža.

Za svakog novog proizvođača energije (kao što je solarna elektrana), operator mora izračunati utjecaj na opterećenje mrežnih elemenata. To uključuje moguće prijenosne gubitke i povećanje strujnog opterećenja. Ako nova elektrana proizvodi energiju koja se unosi u mrežu, postoji mogućnost povećanja gubitaka energije u prijenosu, osobito na dugim udaljenostima. Novi sustav može povećati strujno opterećenje na određenim dijelovima mreže (npr. vodiči ili trafostanice), što može zahtijevati njihovo nadogradnju ili dodatnu zaštitu.

Ako sustav koji se priključuje zahtijeva veću snagu ili može izazvati neravnotežu u opterećenju na mreži, operator distribucijske mreže može zahtijevati instalaciju dodatnih transformatora ili druge infrastrukturne promjene. To može uključivati ugradnju novih transformatora te instalaciju novih priključaka. Ako postoji opasnost od preopterećenja postojećih transformatora potrebno je instalirati dodatni transformator za podupiranje veće proizvodnje. U slučajevima kad je potrebno postaviti novu liniju ili dalekovod, operator može zatražiti dodatne infrastrukturne radove.

Jedan od ključnih tehničkih aspekata priključenja veće solarne elektrane je kvaliteta napona u mreži. Solarne elektrane mogu izazvati fluktuacije u naponu (posebno tijekom oblačnih dana ili ujutro i navečer), što može utjecati na stabilnost mreže. Stoga se analizira:

- fluktuacije napona - ako solarna elektrana proizvodi previše energije, može doći do povećanja napona u određenim dijelovima mreže. Ako je proizvodnja premala, može doći do smanjenja napona.
- kompenzacija i stabilizacija - u nekim slučajevima, operator može zahtijevati instalaciju opreme koja će stabilizirati napon, poput kompenzacijskih kondenzatora ili reaktora.
- frekvenzijska stabilnost - ako solarna elektrana u velikoj mjeri doprinosi proizvodnji, potrebno je osigurati da mreža ostane stabilna u pogledu frekvencije (50 Hz), jer sunčeva energija može uzrokovati fluktuacije u proizvodnji.

Solarne elektrane također mogu imati utjecaj na sigurnost i zaštitu mreže. Priključenje novog izvora energije mora biti usklađeno s pravilima zaštite kako bi se spriječili mogući problemi poput preopterećenja i zaštite od kratkog spoja, kompatibilnosti sa sustavima drugih korisnika. Prilikom priključenja solarne elektrane mora se osigurati da sustav bude zaštićen od preopterećenja ili kratkog spoja, te da bude usklađen s postojećim zaštitnim uređajima na mreži. Operator mora osigurati da nova elektrana ne utječe negativno na postojeće korisnike mreže, npr. druge industrijske objekte ili kućanstva koji se napajaju s istog područja mreže.

Ako operator distribucijske mreže utvrdi da je postojeća infrastruktura nesposobna za podnošenje novog opterećenja, može biti potrebno nadograditi prienosnu mrežu te dodatni nadzor i zaštitu. Nadogradnja ili proširenje postojeće mreže uključuje postavljanje novih kablova, dalekovoda, trafostanica itd. Instalacija dodatnih uređaja za praćenje i zaštitu mreže potrebna je kako bi se osigurala sigurnost i stabilnost sustava.

Ako operator distribucijske mreže utvrdi da je potrebno ulaganje u dodatnu infrastrukturu, trošak tih radova obično snosi investitor solarne elektrane, tj. poduzetnik koji pokreće projekt. Ti troškovi mogu uključivati troškove instalacije novih dalekovoda ili kabela, troškove postavljanja novih transformatora te ugradnju kompenzacijskih uređaja za stabilizaciju napona ili frekvencije.

Dakle, provjera uvjeta na mreži osigurava da nova solarna elektrana može biti priključena na distribucijsku mrežu bez stvaranja tehničkih problema. To uključuje analizu kapaciteta mreže, kvalitetu napona, potrebu za dodatnim infrastrukturnim radovima (poput novih transformatora ili dalekovoda) i očuvanje stabilnosti sustava. Za veće elektrane (preko 10 kW) ovo je ključni korak jer svaka promjena u mrežnoj infrastrukturi mora biti pažljivo planirana kako bi se osigurala sigurna i efikasna integracija.

### **3.1. Utjecaj na naponske prilike**

Veće solarne elektrane (preko 10 kW) mogu imati značajan utjecaj na kvalitetu napona u distribucijskoj mreži, jer proizvodnja energije iz solarnih panela nije konstantna i podložna je promjenama. To znači da nepravilnosti u proizvodnji mogu uzrokovati promjene u naponskim vrijednostima u mreži, što može utjecati na stabilnost sustava i sigurnost rada drugih uređaja na mreži.

Nekoliko ključnih načina kako veće solarne elektrane mogu utjecati na kvalitetu napona:

1. fluktuacije napona (povećanje ili smanjenje napona)
2. harmonične distorzije
3. preopterećenje sustava (niskofrekventni problemi)

4. prelazna stanja i skokovi napona
5. frekvencijska stabilnost
6. povećanje naponskih varijacija u ruralnim područjima.

Solarne elektrane imaju promjenjivu proizvodnju, koja ovisi o uvjetima osvjetljenja (sunčevo zračenje), vremenskim uvjetima (oblačnost, temperatura) i dobu dana. Ove fluktuacije mogu uzrokovati promjene u naponskim razinama u distribucijskoj mreži. Kada solarna elektrana proizvodi više energije nego što je potrebna za lokalnu potrošnju, višak energije se mora predati u mrežu. To može uzrokovati povećanje napona u mreži, osobito ako je proizvodnja energije naglo porasla zbog pojave sunca ili smanjenja oblačnosti. S druge strane, kad proizvodnja padne zbog oblaka, zalaska sunca ili promjena u uvjetima (npr. zbog naglih promjena temperature), to može uzrokovati pad napona u mreži, jer distribucijska mreža mora podnijeti manju količinu proizvedene energije.

Ove promjene u naponu mogu biti problematične za uređaje i potrošače povezane na mrežu, jer oscilacije mogu dovesti do smanjenja učinkovitosti ili oštećenja opreme.

Solarne elektrane, osobito kada koriste neprikladne ili niskokvalitetne invertore, mogu proizvesti harmonične distorzije u mreži. Inverteri koji pretvaraju istosmjernu struju (DC) iz solarnih panela u izmjeničnu struju (AC) potrebnu za korištenje u mreži, mogu generirati visoke frekvencije struje koje nisu dio standardnog sinusoidnog oblika napona. Harmonične frekvencije mogu uzrokovati smanjenje kvalitete napona jer mogu interferirati s normalnim radom drugih uređaja, poput računala, električnih motora, kućanskih aparata i industrijskih sustava. Ako su harmonici prisutni u velikim količinama doći će do pregrijavanja opreme, smanjenja životnog vijeka elektroničkih uređaja ili povećanja gubitaka energije u sustavima. Da bi se smanjile ove distorzije, inverteri moraju biti usklađeni s odgovarajućim standardima (kao što je IEEE 1547) i opremljeni filterima koji smanjuju izvor harmonika.

Ako solarna elektrana isporučuje previše energije u distribucijsku mrežu, ili ako postoji brzi porast proizvodnje, može doći do preopterećenja mrežnih sustava ili opreme (kao što su trafostanice ili kabeli), što može izazvati nestabilnost napona. Preopterećenje može uzrokovati smanjenje napona jer mreža ne može pravilno rasporediti ili stabilizirati proizvodnju i potrošnju u stvarnom vremenu. Ako mreža postane preopterećena, napon u mreži može pasti ispod prihvatljivih granica.

Solarne elektrane, osobito one koje koriste veće invertore, mogu izazvati prelazna stanja prilikom uključivanja i isključivanja sustava. Na primjer, kada sunčeve ploče počnu generirati energiju ili kada proizvodnja naglo padne zbog naoblake ili zalaska sunca, može doći do skokova napona („voltage sags“ ili „voltage surges“).

Skokovi napona mogu uzrokovati kratkoročne fluktuacije u naponskoj kvaliteti koje utječu na osjetljive uređaje i mogu uzrokovati kvarove ili isključenja uređaja, posebno u industrijskim postrojenjima ili uređajima visoke osjetljivosti.

Prelazna stanja mogu također dovesti do povećanih naponskih udaraca, što može biti štetno za elektroničku opremu u kućanstvima i tvrtkama.

Solarne elektrane mogu imati utjecaj na stabilnost frekvencije u mreži, osobito ako je udio solarnih elektrana u odnosu na ukupnu proizvodnju u mreži visok. U nekim slučajevima, previše solarne energije može uzrokovati neregulirane promjene u frekvenciji, jer solarne elektrane obično ne pružaju kompenzaciju za promjene u potrošnji (tj. solarni sustavi ne mogu dinamički prilagoditi svoju proizvodnju na temelju potrošnje energije, kao što to može učiniti tradicionalna elektrana).

Ovo može dovesti do nestabilnosti u frekvenciji, što u ekstremnim slučajevima može uzrokovati prekinde u opskrbi ili smanjenje učinkovitosti drugih generatora u mreži koji se koriste za ravnotežu.

U ruralnim ili manje razvijenim dijelovima distribucijske mreže, gdje je manja gustoća potrošnje energije, solarne elektrane mogu uzrokovati veće varijacije u naponu. Ako je mreža slabo razvijena, prijenos i distribucija energije može postati izazov, jer nije dovoljno izgrađena da izdrži učinke niskih i visokih naponskih oscilacija. U ruralnim područjima može doći do neujednačene raspodjele napona, što može značiti da neki dijelovi mreže imaju prenizak ili previsok napon, ovisno o sunčanim uvjetima i proizvodnji iz solarnih elektrana.

### 3.2. Promjene u tokovima snage i strujnim opterećenjima

Kad se elektrana priključi na mrežu, dolazi do promjene u tokovima snaga, što rezultira promjenama u strujnom opterećenju dionica mreže i dolazi do povećanja strujnog opterećenja te promjene smjera toka snage.

Uobičajena situacija je da su dionice mreže najbliže mjestu priključenja elektrane izložene povećanom strujnom opterećenju. Razlog za ovo povećano opterećenje leži u tome što elektrana sada injektira energiju u mrežu, što povećava tokove u smjeru prema trafostanici.

S obzirom na to da elektrana počinje proizvoditi energiju, tokovi snage se mijenjaju u odnosu na stanje kada je mreža bila samo pasivna. Na mjestu priključenja, energija se „pumpa“ prema trafostanici, što stvara veće struje u tom dijelu mreže.

Naponske prilike značajno se mijenjaju kada se elektrana priključi mreži. Stacionarne varijacije napona (tj. promjene napona u stanju ravnoteže) mogu postati najveći ograničavajući faktor kod priključenja elektrana na mrežu. Bez elektrane, naponi opadaju od početka izvoda prema kraju, ovisno o opterećenju. U mreži postoji maksimalno i minimalno opterećenje.

S elektranom u pogonu, tokovi radne snage idu u suprotnom smjeru, prema trafostanici (npr. na 10(20) kV), što rezultira povećanjem napona. Najveće povećanje napona događa se na mjestu priključenja, ali to također utječe i na ostatak mreže.

Povećanje napona može biti posebno izraženo u slabo opterećenim dugim zračnim vodovima, jer i mala količina proizvedene energije može uzrokovati značajno povećanje napona. Čak i u slučaju kada je energija koja se injektira relativno mala u odnosu na nazivnu snagu SN voda, može doći do značajnih promjena u naponskim prilikama.

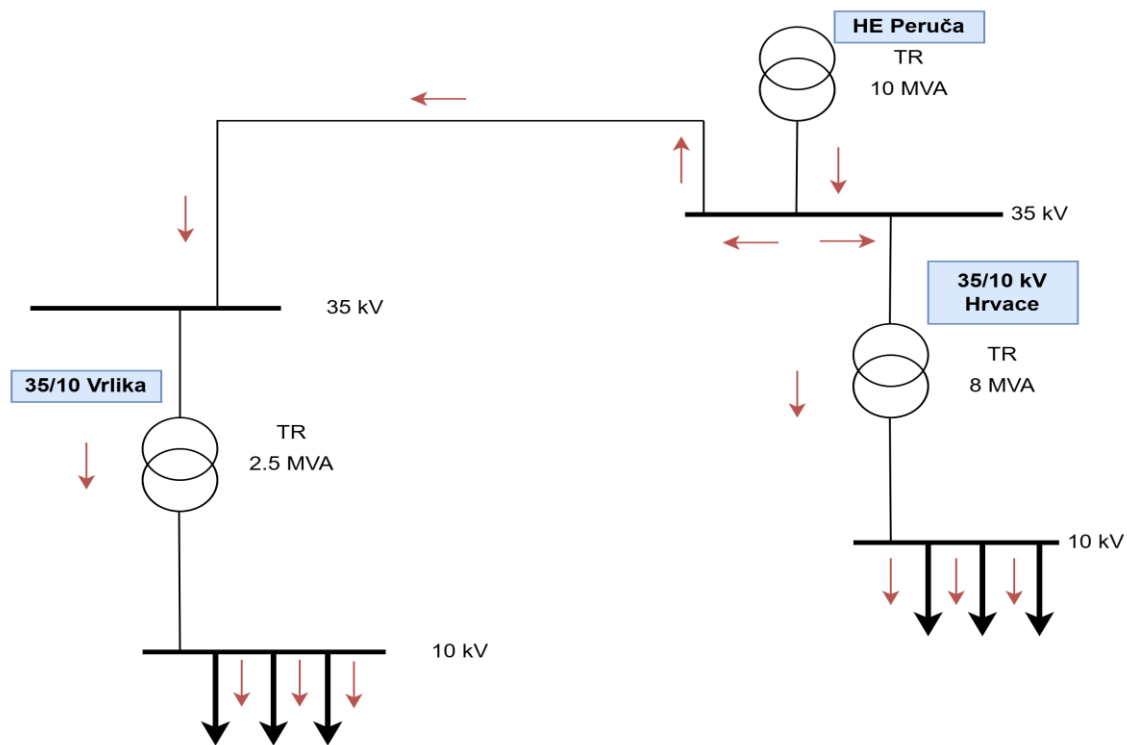
S elektranom, naponska stanja u mreži su sada u rasponu između maksimalnog opterećenja mreže bez elektrane i minimalnog opterećenja kada elektrana isporučuje svoju maksimalnu snagu.

Jedna od pozitivnih specifičnosti solarnih elektrana, u odnosu na npr. vjetroelektrane je dnevna proizvodnja. To znači da nema ekstremnih slučajeva poput onih koji mogu nastati u noćnim satima kada je minimalna potrošnja i maksimalna proizvodnja energije iz vjetra. Dnevna proizvodnja solarne elektrane znači da se u noćnim satima ne događa najveće opterećenje mreže u smislu naponskih promjena, jer elektrana ne proizvodi energiju noću. Time se smanjuje rizik od ekstremnih naponskih fluktuacija koje bi mogle nastati kod elektrana koje imaju nepravilne i nepredvidljive izvore energije kao što je vjetar.

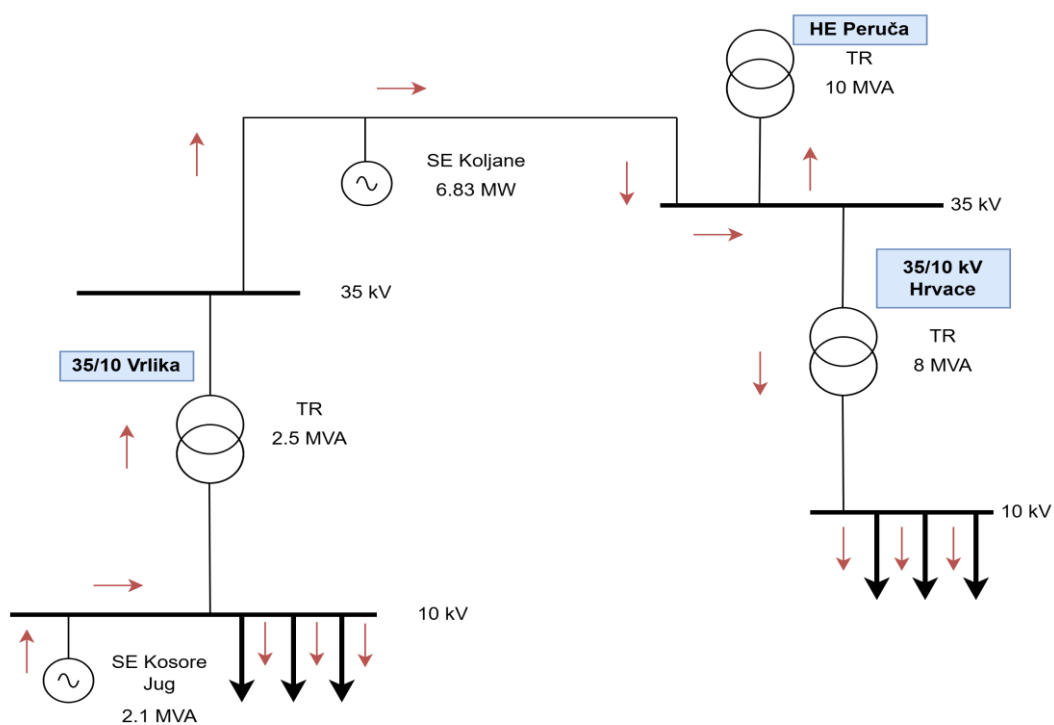
## 4. PRIMJERI POSTOJEĆIH ELEKTRANA NA PODRUČJU ELEKTRODALMACIJE

Na području Elektrodalmacije postoji nekoliko primjera integracije obnovljivih izvora, od čega je najviše integrirano solarnih elektrana. Na 10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Prančevići priključena je mala hidroelektrana MHE Prančevići snage 1.6 MW. Na 35 sabirnicama u HE Kraljevac priključena je vjetroelektrana VE Orjak snage 10 MW. Najzanimljiviji su primjeri integracije solarnih elektrana. SE Vis priključena je na 10 kV sabirnicama u TS 35/10 kV Vis snage 3.6 MW sa popratnim baterijskim spremnikom BSPEE.

Na području Vrljike priključene su dvije solarne elektrane, prva Kosore Jug snage 2.1 MW spojena na 10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Vrljika te SE Koljane snage 6.83 MW spojena na dalekovod koji povezuje dvije radijalne stanice TS 35/10 kV Vrljika i TS 35/10 kV Hrvace. Na prvoj slici prikazana je pasivna mreža s ucrtanim strelicama crvene boje koje pokazuju tok snage kada su TS 35/10 kV Vrljika i TS 35/10 kV Hrvace bile „napajane“ iz HE Peruća. Na drugoj slici prikazana je aktivna mreža ucrtanim strelicama crvene boje koje pokazuju tok snage nakon integriranja solarnih elektrana.



Slika 3. Primjer pasivne mreže



Slika 4. Primjer aktivne mreže

U prošloj godini, na području otoka Brača puštene su u rad dvije solarne elektrane snage svaka po 9.9 MW, SE Gornji Humac i SE Pelegrin. Obe su spojene direktno na 35 kV sabirnice u TS 35/10 kV Pučišća. Konzum otoka Brača ima manju potrošnju od proizvedene energije integriranih dviju solarnih elektrana te

se većina proizvedene energije vraća nazad u nadređenu prijenosnu mrežu. Budući da je TS Pučišća radijalna stanica imamo gore navedeni primjer radijalnog priključka te su na istima uočene sve gore navedene pozitivne i negativne strane. Priključkom navedenih dviju elektrana došlo je do povećavanja napona na sabirnicama te se javljaju problemi s kvarovima uređaja visoke osjetljivosti.

Integracija navedenih solarnih elektrana koje su spojene na radijalne stanice doprinijela je mogućnosti kontinuiranog napajanja u slučajevima radova na jednom od segmenata radijalnog napajanja jer krajnji korisnici ne ostaju bez napajanja [2].

Fluktuacija napona, mogućnost kontinuiranog napajanja, promjena smjera tokova snage predstavlja izazov u vođenju mreže aktivne mreže koja do prije nekoliko godina nije bila prisutna jer je postojala pasivna mreža s nepromijenjenim smjerom tokova snage.

## **5. ZAKLJUČAK**

Priključak solarnih elektrana na distribucijsku mrežu može značajno promijeniti tokove snage i naponske prilike u mreži. Bez elektrane, mreža je pasivna i naponi padaju od početka do kraja izvoda, dok s elektranom u pogonu, energija se injektira u mrežu, što rezultira povećanjem napona i promjenama u strujnom opterećenju. Na posebno slabo opterećenim dugim zračnim vodovima, čak i mala količina proizvedene energije može uzrokovati značajne promjene u naponskim prilikama. Međutim, sa solarnim elektranama, koje proizvode energiju samo tijekom dana, rizik od ekstremnih naponskih fluktuacija je manji nego kod drugih vrsta obnovljivih izvora energije poput vjetra. No, zbog ovisnosti o vremenskim prilikama proizvodnja iz solarnih elektrana je promjenjiva te je nepouzdana i predstavlja dodatni izazov u planiranju i vođenju elektroenergetske distribucijske mreže. Uz razvoj dodatne tehnologije te kontinuirani razvoj i unapređivanje distribucijske mreže koja će pratiti integraciju solarnih elektrana, mreža će se dodatno automatizirati te će iz aktivne postati pametna mreža čime će se dodatno osigurati stabilnost i učinkovitost mreže.

## **6. LITERATURA**

- [1] R. Goić, D. Jakus, J. Krstulović Opara, I. Zlatunić, I. Penović, „Priključak velikih fotonaponskih elektrana na distribucijsku mrežu“, HRO CIRED, 8. savjetovanje, Umag, 2010.
- [2] M. Miletić, V. Antonijević, „Integracija sunčanih elektrana u elektroenergetski sustav kao mehanizam povećanja sigurnosti napajanja“, HRO CIGRE, 16. simpozij, Šibenik, 2023.
- [3] M. Miletić, V. Antonijević, „Planiranje razvoja elektroenergetskog sustava integracijom sunčanih elektrana“, DIE, 15. Dani inženjera elektrotehnike, Bol, 2023.
- [4] Desetogodišnji (2022.-2031.) plan razvoja distribucijske mreže HEP ODS-a s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje, HEP ODS, 2021.
- [5] Razvoj distribucijske mreže Elektrodalmacije Split, terenskih jedinica Sinj, Imotski, Vrgorac, Makarska, Ploče, Metković, Brač, Hvar i Vis te otok Šolta za razdoblje narednih 20 godina, FESB, Split, 2021.