

# Utjecaj priključenja fotonaponskih elektrana na pogon srednjenaponske mreže

---

**Vugrinec, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:611642>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**UTJECAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA  
NA POGON SREDNJENAPONSKE MREŽE**

Rijeka, rujan 2024.

Dominik Vugrinec  
0069086930

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

**UTJECAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA  
NA POGON SREDNJENAPONSKE MREŽE**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, rujan 2024.

Dominik Vugrinec  
0069086930

Rijeka, 16.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku  
Predmet: Zaštita i automatika električnih postrojenja

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Dominik Vugrinec (0069086930)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (1300)  
Modul: Elektroenergetika (1332)  
Zadatak: **Utjecaj priključenja fotonaponskih elektrana na pogon srednjenaponske mreže / Impact of PV power plants on medium voltage network operation**

### Opis zadatka:

U ovom radu opisati će se značajke distribucijskih mreža i priključenja obnovljivih izvora energije na srednjenaponsku (SN) mrežu. Obraditi će se osnovni pojmovi i načelo rada fotonaponskih elektrana, te uvjeti i tehnički proračuni koji se moraju napraviti prije njihova priključenja, a sukladno Mrežnim pravilima distribucijskog sustava. Definirati će se osnovni principi zaštite fotonaponskih elektrana na sučelju sa mrežom. Konačno, uporabom nadomjesnih krivulja opterećenja i krivulje proizvodnje fotonaponske elektrane ispitati će se njen utjecaj na sljedeće parametre srednjenaponske mreže: na strujnu opterećenost elemenata, naponski profil čvorova i struje kratkog spoja u mreži. Navedeno će se promatrati za karakterističan dan u godini i realizirati uz pomoć softverskog paketa NEPLAN.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
prof. dr. sc. Dubravko Franković

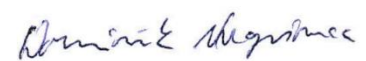
SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Utjecaj priključenja fotonaponskih elektrana na pogon srednjenaponske mreže“, koristeći se navedenom literaturom, znanjem stečenim tijekom dosadašnjeg studija i konzultacijama s mentorom izv. prof. dr. sc. Rene Prencom.

Rijeka, rujan 2024.



---

Dominik Vugrinec

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Rene Prencu na nesebičnoj pomoći, prijedlozima i smjernicama pri izradi ovog rada. Također, zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na bezuvjetnoj podršci, pomoći i razumijevanju tijekom cjelokupnog studija.

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. DISTRIBUCIJSKE MREŽE .....	2
2.1. Srednjenaponske mreže .....	4
2.2. Kriteriji planiranja srednjenaponskih mreža u Hrvatskoj .....	6
3. PRIKLJUČENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA SREDNENAPONSKU MREŽU .....	8
3.1. Mrežna pravila distribucijskog sustava.....	10
3.2. Puštanje fotonaponske elektrane u rad.....	11
3.3. Otkup električne energije .....	13
3.4. Izvedbe priključaka .....	13
4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE .....	16
4.1. Princip rada fotonaponske elektrane .....	16
4.2. Dijelovi fotonaponske elektrane .....	17
4.2.1. Fotonaponske ćelije .....	18
4.2.2. Fotonaponski modul.....	21
4.2.3. Izmjenjivači.....	22
4.2.4. Ostale komponente fotonaponskih sustava .....	24
4.3. Zaštita fotonaponske elektrane .....	24
5. NEINTEGRIRANE FOTONAPONSKE ELEKTRANE U HRVATSKOJ .....	29
6. NADOMJESNE KRIVULJE OPTEREĆENJA I PROIZVODNJE .....	32
7. UTJECAJ FOTONAPONSKIH ELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKI SUSTAV ...	36
7.1. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na naponske prilike u mreži .....	36
7.2. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na gubitke snage u mreži.....	38
7.3. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na kratkospojne prilike u mreži.....	39
7.4. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na emisije viših harmonika u mreži .....	39

8. UTJECAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA PRIMJERU STVARNE SREDNJE NAPONSKE MREŽE – NEPLAN .....	41
8.1. Ulazne vrijednosti simulacije.....	43
8.2. Krivulje opterećenja i proizvodnje.....	45
8.3. Analiza tokova snaga .....	48
8.4. Analiza naponskog profila .....	66
8.5. Analiza struja kratkog spoja.....	69
8.6. Analiza gubitaka snage u mreži .....	74
9. ZAKLJUČAK.....	76
LITERATURA.....	77
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	79
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLJSKOM JEZIKU .....	80



## 1. UVOD

U suvremenom dobu, održiva i čista energija postaje ključni čimbenik u oblikovanju energetskega sektora. Fotonaponske elektrane, kao oblik obnovljivog izvora energije, sve su više prisutne u globalnom energetskega miksu. Njihova sposobnost proizvodnje električne energije bez emisija štetnih plinova čini ih atraktivnim rješenjem za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i smanjenje emisija stakleničkih plinova.

Izvori energije koji se mogu neprestano obnavljati kroz prirodne procese nazivaju se obnovljivim izvorima energije. To uključuje energiju vjetrova, sunca, vode, krutu biomasu, bioplina, tekuća biogoriva i geotermalne izvore. Fotonaponske elektrane postaju sve relevantniji i značajniji oblik obnovljivih izvora energije. Fotonaponske elektrane koriste direktnu sunčevu svjetlost za proizvodnju električne energije, a osnovu tog procesa čine fotonaponski paneli.

Pružanje pouzdane i stabilne opskrbe električnom energijom predstavlja izazov u kontekstu integracije fotonaponskih elektrana u postojeće elektroenergetske sustave. Posebno je važno razumjeti kako se takva integracija odražava na pogon srednjenaponskih mreža, koje su ključne za distribuciju električne energije na regionalnoj razini.

Fotonaponske elektrane koriste se od manjih instalacija za kućanstva do velikih industrijskih postrojenja. Odluka o investiranju u vlastitu energetskega neovisnost uglavnom će ovisiti o troškovima postavljanja sustava i potencijalnim uštedama koje se mogu postići. Geografski položaj Hrvatske, s obiljem sunčanih dana, doprinosi rastućem interesu za izgradnju fotonaponskih elektrana.

U ovom radu razmatran je utjecaj priključenja distribuiranog izvora na rad srednjenaponske distribucijske mreže, opisane su značajke i elementi distribucijskih mreža i fotonaponskih elektrana, definirani su osnovni principi zaštite fotonaponskih elektrana na sučelju s mrežom. Ispitan je utjecaj fotonaponske elektrane na strujnu opterećenost elemenata, naponski profil čvorova i struje kratkog spoja u mreži. U računalnom programu NEPLAN na primjeru realne srednjenaponske mreže ispitan je utjecaj priključenja fotonaponske elektrane za karakterističan dan u godini.

## 2. DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Elektroenergetski sustav (EES) sastoji se od četiri glavne komponente: proizvodni objekti odnosno elektrane, prijenosne i distribucijske mreže te krajnji potrošači električne energije, obuhvaćajući sve pripadajuće objekte, postrojenja i uređaje.

S obzirom na funkciju ili namjenu, elektroenergetske mreže se dijele na prijenosne i distribucijske mreže, koje služe za transport i distribuciju električne energije. Glavna svrha elektroenergetskih mreža je osigurati povezanost svih dijelova EES-a, uz koordinaciju pogonwskih uvjeta unutar sustava i omogućiti paralelni rad elektrana s usklađenom frekvencijom.

Distribuirana proizvodnja električne energije odnosi se na proizvodnju energije na manjim razinama, bliže potrošačima. Ovaj pristup omogućuje lokalnu proizvodnju električne energije koristeći različite izvore energije, uključujući obnovljive izvore poput solarnih panela, vjetroelektrana, malih hidroelektrana i drugih. Distribuirani izvor je onaj izvor koji je priključen na razdjelnu mrežu. Ovi izvori obično imaju snagu u rasponu od 3 kW do 10 MW. Neke od prednosti distribuirane proizvodnje su veća energetska neovisnost, smanjenje gubitaka tijekom prijenosa, bolja iskorištenost obnovljivih izvora energije, veća otpornost na kvarove i prekide u opskrbi, a također izrazito je bitno napomenuti da distribuirana proizvodnja pridonosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i poboljšanju održivosti energetskeg sustava.

Distribucijska mreža omogućuje transport manjih količina električne energije na kraće udaljenosti do manjih i srednjih korisnika. Ova mreža dobiva energiju iz prijenosne mreže i koristi srednje i niže naponske razine od 35 kV, 20 kV, 10 kV za srednji napon i 0,4 kV za niski napon. Za opskrbu kućanstva i manjih potrošača koriste se transformatorske stanice s nižim naponima od 10(20)/0,4 kV, a industrijski ili veći potrošači se priključuju direktno na 10(20) kV razinu. Distribucijska mreža obuhvaća kombinaciju zračnih i kablskih vodova te manjih rasklopnih postrojenja u usporedbi s prijenosnom mrežom, s obzirom na to da je snaga koju prenosi distribucijska mreža višestruko manja od snage koju prenosi prijenosna mreža. Distribucijske mreže se u pogonu uglavnom sastoje od radijalnih struktura, što znači da imaju glavni radijalni vod s otcjepima koji se granaju od njega. U izvedbi se često koriste i prstenaste strukture, gdje glavni prsten ima radijalne otcjepe. U prstenastim mrežama, u slučaju kvara na jednom djelu mreže ili transformatoru, potrošači se mogu napajati iz drugog smjera, jer postoji alternativni izvor napajanja. Prstenaste strukture se često primjenjuju u urbanim distribucijskim mrežama [1].

Niskonaponska distribucijska mreža se opskrbljuje s transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV. Velika većina potrošača u distribucijskoj niskonaponskoj mreži s naponskom razinom od 400 V

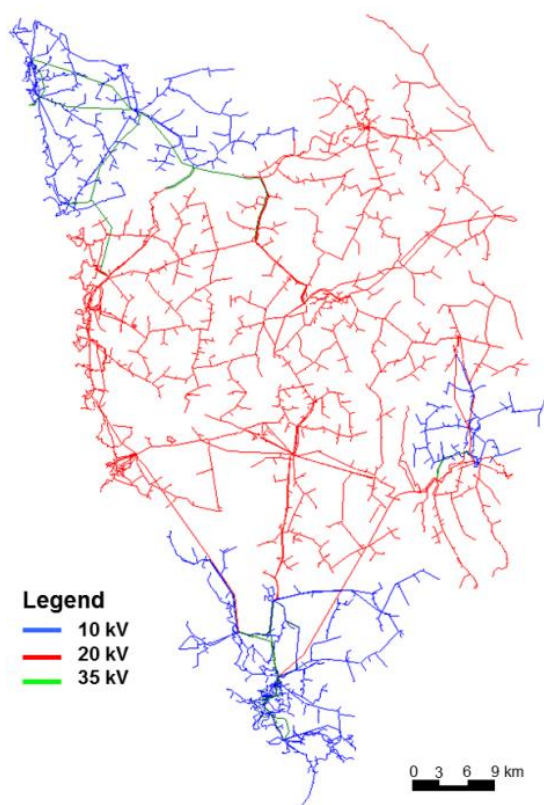
opskrbljuje se preko izvoda tog transformatora. Javna rasvjeta obično ima odvojene izvode za napajanje, međutim u određenim specifičnim situacijama se koriste viševodički izvodi, pri čemu se potrošači napajaju s tri voda, dok se javna rasvjeta napaja dodatnom jednom ili dvije faze i eventualno zajedničkim nul vodom u posebnom strujnom krugu.

Distribucijska mreža sastoji se od nekoliko ključnih elemenata koji omogućuju prijenos električne energije od prijenosne mreže do krajnjih korisnika. Distribucijske podstanice su ključni elementi elektroenergetskog sustava koji omogućuju smanjenje napona s prijenosne razine (visokonaponske mreže) na srednjenaponsku razinu, obično između 10 kV i 35 kV. Transformatori unutar ovih podstanica obavljaju ovu konverziju napona, čime se omogućuje daljnji prijenos energije prema potrošačima. Osim transformatora, podstanice sadrže i prekidače i sklopke, koje služe za zaštitu, isključenje i upravljanje dijelovima mreže, čime se osigurava stabilan i siguran rad sustava. Razvodni ormari unutar podstanica također igraju važnu ulogu, jer u njima se nalaze prekidači, sklopke, instrumenti za mjerenje i zaštitni uređaji, koji zajedno omogućuju precizno upravljanje i kontrolu distribucijske mreže. Nadzemni vodovi uključuju stupove, vodiče, izolatore, zaštitno užje i uzemljenje stupa, temelje te SKS. Oni prenose energiju putem visokih stupova i vodova postavljenih iznad zemlje. Nadalje, mreža obuhvaća kabela vodove koji se sastoje od podzemnih i podmorskih kabela, osiguravajući prijenos električne energije ispod zemlje ili kroz vodene površine. Zatim transformatori koji igraju ključnu ulogu u pretvaranju napona; oni mogu biti energetske, mjerni ili specijalni transformatori, prilagođeni specifičnim potrebama mreže. Konačno, tu su potrošači, krajnji korisnici električne energije, koji mogu biti kućanstva, poslovni objekti ili industrijski korisnici. Ovi elementi zajedno čine kompleksan i učinkovit sustav distribucije električne energije.

Obnovljivi izvori energije sve više postaju integralni dio distribucijskih mreža. Priključne točke za fotonaponske elektrane omogućuju povezivanje solarnih elektrana sa srednjenaponskom mrežom, čime se solarna energija može učinkovito distribuirati i koristiti. Osim fotonaponskih elektrana, i vjetroelektrane te drugi obnovljivi izvori energije mogu se priključiti na distribucijsku mrežu, čime se dodatno diversificira izvor električne energije i povećava udio obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji energije.

## 2.1. Srednjenaponske mreže

Srednjenaponske mreže su ključni segment elektroenergetskog sustava koji je zadužen za prijenos električne energije od visokonaponskih prijenosnih mreža do niskonaponskih distribucijskih mreža koje napajaju krajnje korisnike. Obično se sastoje od vodova koji rade na naponskim razinama od 10 kV i 20 kV, pri čemu je najviši napon opreme 24 kV te 30 kV i 35 kV, pri čemu je najviši napon opreme 38 kV. Nazivne kratkotrajne podnosive struje kratkog spoja 1 s su 16 kA za naponske razine srednjenaponske mreže. Srednjenaponske mreže omogućuju učinkovit prijenos energije na srednje udaljenosti, pri čemu se vodi računa o balansu između potreba za visokom pouzdanošću i ekonomičnošću.



Slika 2.1.: Srednjenaponska mreža Istre [2]

Osnovni elementi srednjenaponskih mreža uključuju nadzemne vodove, koji se sastoje od stupova, vodiča i izolatora, te podzemne kablove koji osiguravaju siguran prijenos energije u urbanim područjima ili na mjestima gdje nadzemni vodovi nisu praktični. U sastavu mreže nalaze se i transformatori, koji smanjuju napon s visokonaponske razine na srednjenaponsku, omogućujući daljnji prijenos energije prema krajnjim korisnicima ili lokalnim transformatorima koji će ga dodatno smanjiti na niskonaponsku razinu.

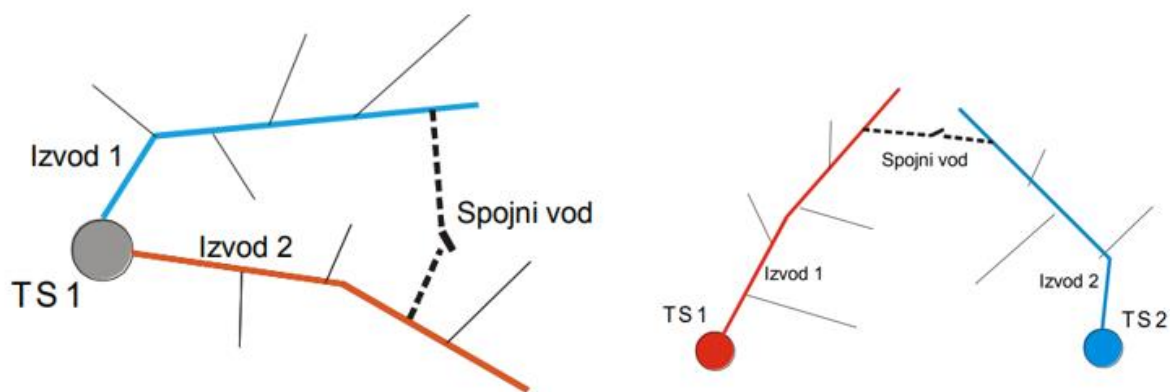
Srednjenaponske mreže također uključuju različite zaštitne uređaje i sklopke koji osiguravaju sigurnost i stabilnost sustava, sprečavajući kvarove i omogućujući brzo isključenje dijelova mreže u slučaju problema. Uloga srednjenaponskih mreža postaje sve važnija s povećanjem integracije obnovljivih izvora energije, koji se često priključuju upravo na ovu razinu mreže, omogućujući distribuciju čiste energije prema potrošačima. Ove mreže predstavljaju temelj modernih elektroenergetskih sustava, osiguravajući pouzdanu, stabilnu i održivu opskrbu električnom energijom.

SCADA (engl. Supervisory Control and Data Acquisition) sustav igra ključnu ulogu u upravljanju srednjenaponskom mrežom. Ovaj sustav omogućuje nadzor i upravljanje distribucijskom mrežom u realnom vremenu, povećavajući učinkovitost i brzinu odgovora na eventualne probleme. SCADA sustavi prikupljaju podatke s različitih senzora i uređaja raspoređenih po mreži, a koji sadrže informacije o naponu, struji, stanju prekidača i sklopki te podatke o okolišnim uvjetima. Ti podaci se zatim prenose do nadzornog centra, gdje operateri mogu pratiti stanje mreže, identificirati i brzo reagirati na kvarove, te optimizirati operacije mreže.

Razvoj srednjenaponske mreže zasnovan je na dvije ključne smjernice: prelazak s naponske razine 10 kV na 20 kV te implementacija izravne transformacije 110/10(20) kV uz postupno ukidanje naponske razine 35(30) kV. Konceptija srednjenaponske mreže mora biti takva da, kada je ekonomski opravdano, osigurava (n-1) kriterij kako bi se zadovoljili zahtjevi za kvalitetom opskrbe električnom energijom, posebno u pogledu pouzdanosti napajanja [3].

Postoje dvije osnovne koncepcije za izgradnju srednjenaponske mreže s ciljem osiguranja rezervnog napajanja u čvorištima srednjenaponske mreže uz kriterij (n-1) [3]:

- prstenasta struktura – osiguranje napajanja putem drugog izvoda iste TS VN/SN ili TS SN/SN
- povezna struktura – osiguranje napajanja putem drugog izvoda druge TS VN/SN ili TS SN/SN



Slika 2.2.: Prstenasta i povezna struktura SN mreže [3]

Procjena potrebe za izgradnjom novih srednjenaponskih izlaza ili novih spojnih srednjenaponskih vodova između postojećih radijalnih srednjenaponskih izlaza, s ciljem ispunjenja (n-1) kriterija, provodi se analizom pouzdanosti napajanja dijela mreže uzimajući u obzir razinu opterećenja, broj korisnika te njihovu važnost [3].

## 2.2. Kriteriji planiranja srednjenaponskih mreža u Hrvatskoj

Planiranje distribucijske mreže uključuje proces određivanja optimalne izgradnje i unapređenja distribucijske mreže na određenom području tijekom definiranog razdoblja, s ciljem postizanja potrebne sigurnosti i kvalitete opskrbe uz minimalne investicijske troškove [4].

Ciljevi planiranja obuhvaćaju dimenzioniranje komponenti distribucijske mreže za pouzdan rad, održavanje kvalitete električne energije prema standardima, usklađeni razvoj distribucijske mreže s prijenosnom mrežom te učinkovito korištenje prostora. Također, planiranje razvoja distribucijske mreže ima za cilj omogućiti funkcioniranje tržišta električne energije kroz nepristran pristup mreži za treće strane.

Kriteriji za planiranje srednjenaponskih mreža u Hrvatskoj obuhvaćaju sve objekte i postrojenja u elektroenergetskom sustavu Republike Hrvatske koji su priključeni na napone niže od 110 kV i transformatorske stanice 110/35(30) kV i 110/10(20) kV, bez obzira na vlasništvo. Ovi kriteriji obuhvaćaju dopuštena opterećenja elemenata u mreži, dopuštenu toleranciju napona, pouzdanost napajanja te utjecaj obnove distribucijske mreže na strategije razvoja.

Prema literaturi [4], dopuštena opterećenja vodova i transformatora ogledaju se kroz dva parametra, to su trajno dopušteno opterećenje i dopušteno opterećenje za vrijeme trajanja neplaniranog poremećaja. Dopuštena opterećenja u postupku planiranja razvoja distribucijske mreže vrijede za nadzemni vod, kabel i transformator, a vrijednosti dopuštenih opterećenja vidljive su na slici 2.3.

Element mreže	Trajno dopušteno opterećenje	Dopušteno opterećenje za vrijeme trajanja neplaniranog poremećaja
Nadzemni vod	maksimalno dopuštena struja u <i>normalnom</i> pogonu u stanju <i>vršnog</i> opterećenja (100%)	maksimalno dopuštena struja u <i>poremećenom</i> pogonu u stanju <i>vršnog</i> opterećenja (120% zimi, 110% ljeti)
Kabel	maksimalno dopuštena struja u normalnom pogonu (100%)	
Transformator	maksimalno dopušteno opterećenje u <i>normalnom</i> pogonu u stanju <i>vršnog</i> opterećenja (100%)	maksimalno dopušteno opterećenje u <i>poremećenom</i> pogonu u stanju <i>vršnog</i> opterećenja (120% zimi, 110% ljeti)

Slika 2.3. : Dopuštena opterećenja vodova i transformatora u postupku planiranja razvoja distribucijske mreže [4]

Prema normi HRN EN 50160:2012 vrijedi da dopuštena odstupanja napona u distribucijskoj mreži srednjeg i niskog napona iznose  $\pm 10\%$  nazivnog napona na mjestu priključka korisnika za trajno dopušteno odstupanje napona, odnosno  $+10\%/-15\%$  nazivnog napona na mjestu priključka za vrijeme trajanja poremećaja. U postupku planiranja razvoja distribucijske mreže vrijedi dopušteni pad napona u mreži 10(20) kV u iznosu od  $8\%$  u normalnim pogonskim prilikama, odnosno  $12\%$  u izvanrednim pogonskim prilikama [4].

Hrvatska energetska regulatorna agencija propisuje pokazatelje kvalitete opskrbe električnom energijom, a sukladno Zakonu o tržištu električne energije. Pokazatelji kvalitete koje propisuje HERA se odnose na pogon distribucijske mreže. Kriteriji pouzdanosti napajanja u postupku planiranja distribucijske mreže srednjeg napona ogledaju se kroz tri definirane vrste mreže, a to su gradsko područje s pretežno kablskom mrežom, prigradska područja i veća naselja te nadzemni vodovi u izvangradskom području. Definirane granične vrijednosti koeficijenta SAIDI i SAIFI za te tri vrste mreže su karakteristične za distribucijska područja s boljim pokazateljima pouzdanosti napajanja korisnika mreže od prosjeka na razini mreže HEP-ODS-a. Vrijednosti su manje odnosno „strože“ u gradskom području, gdje SAIDI iznosi 120 minuta godišnje, a SAIFI 2 komada godišnje, dok u izvangradskom području iznose 360 minuta godišnje odnosno 8 komada godišnje.

Prema literaturi [4], posljednji kriterij za planiranje srednjenaponskih mreža odnosi se na utjecaj obnove distribucijske mreže na planove razvoja. Obnova postojeće infrastrukture uključuje zamjenu neispravnih ili zastarjelih komponenata s jednakim ili odgovarajućim novim tipovima, bez značajnih dodatnih ulaganja zbog drugih razloga izgradnje distribucijske mreže. Elementi distribucijske mreže koji se pojedinačno analiziraju za potrebe zamjene i rekonstrukcije obuhvaćaju transformatorske stanice i transformatore 110/35(30) kV i 110/10(20) kV, vodove 35(30) kV, transformatorske stanice i transformatore 35(30)/10(20) kV i vodove 10(20) kV. Pretpostavlja se da redovna obnova transformatorskih stanica 10(20)/0,4 kV i niskonaponske mreže ima zanemariv utjecaj na planiranje razvoja srednjenaponske mreže.

### 3. PRIKLJUČENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA SREDNENAPONSKU MREŽU

Priključenje obnovljivih izvora energije na srednjenaponsku mrežu postaje sve značajnija tema s obzirom na rastući trend upotrebe obnovljivih izvora za proizvodnju električne energije. Priključenje obnovljivih izvora energije na srednjenaponsku mrežu predstavlja ključnu strategiju za tranziciju prema održivom energetsom sustavu. Unatoč raznim izazovima, integracija obnovljivih izvora energije donosi brojne ekološke, ekonomske i socijalne prednosti koje pridonose održivom razvoju i boljoj budućnosti.

Prema mrežnim pravilima distribucijskog sustava, na niskonaponsku mrežu može se priključiti postrojenje ili instalacija pojedinačnog proizvođača s priključnom snagom do 500 kW, dok se na srednjenaponsku mrežu može priključiti postrojenje ili instalacija pojedinačnog proizvođača s priključnom snagom do 20 MW, u skladu s niže definiranim kriterijima:

Tablica 3.1. Niskonaponski i srednjenaponski priključak

NN jednofazni priključak	NN trofazni priključak	SN trofazni priključak
do 3,68 kW	do 100 kW na NN vod ili do 500 kW na sabirnicu transformatora	od 500 kW do uključivo 20 MW na sabirnicu transformatora

Prema mrežnim pravilima distribucijskog sustava, postrojenja ili instalacije mogu se priključiti na trofaznu srednjenaponsku mrežu s priključnom snagom većom od 500 kW. U praksi, priključne snage na srednjenaponskoj mreži mogu biti različite i često ovisne o specifičnim zahtjevima i kapacitetima distribucijske mreže.

Granica od 500 kW minimalne instalirane snage fotonaponske elektrane koja je potrebna za priključenje na srednjenaponsku mrežu u Hrvatskoj je postavljena kako bi se osigurala tehnička, ekonomska održivost priključka, omogućujući učinkovitu integraciju veće proizvodnje obnovljive energije u elektroenergetski sustav.

Postupak priključenja uključuje nekoliko koraka. Investitor mora zaključiti Ugovor o priključenju na mrežu s HEP Operatorom distribucijskog sustava (HEP ODS). Nakon plaćanja naknade za

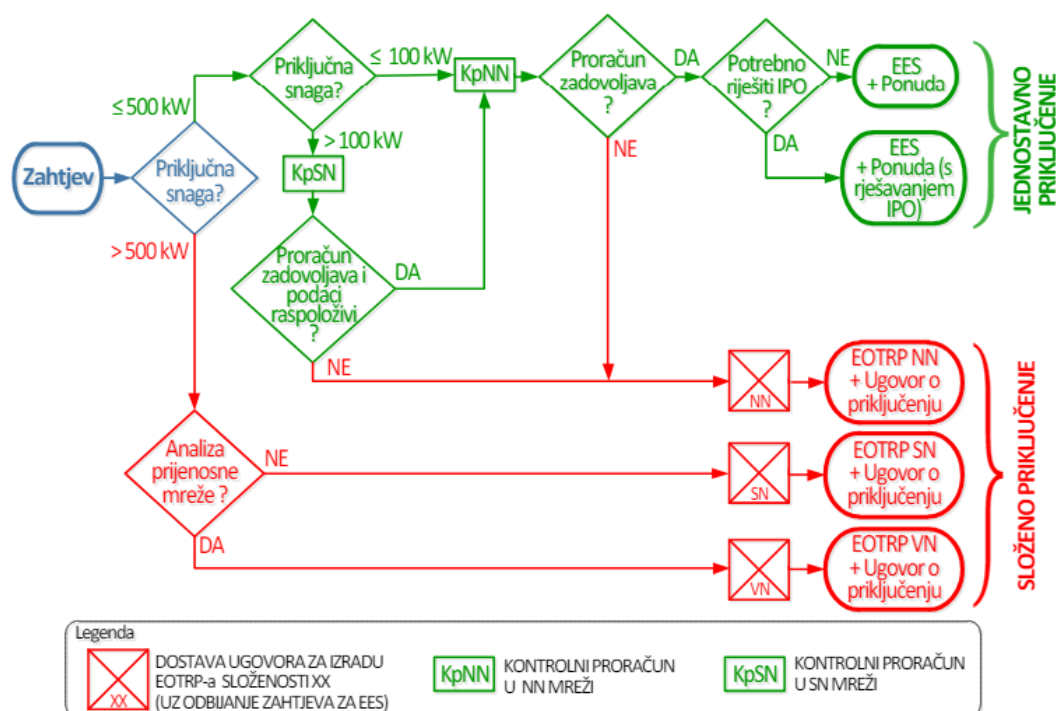


izgradnju priključka, operater distribucijskog sustava gradi priključak, a potom investitor sklapa Ugovor o korištenju mreže kako bi formalno započeo s korištenjem mreže.

Za priključenje obnovljivih izvora energije na distribucijsku mrežu potrebno je provesti opsežna testiranja i analize kako bi se procijenio utjecaj elektrane na mrežu. Također, potrebna je detaljna dokumentacija koja obuhvaća tehničke, ekonomske i pravne aspekte priključenja. Ta dokumentacija mora uključivati mjere zaštite na radu, plan kontrole, osiguranja kvalitete, upravljanje otpadom te potrebne službene dokumente kao što su dozvole, izvadci, izjave i rješenja.

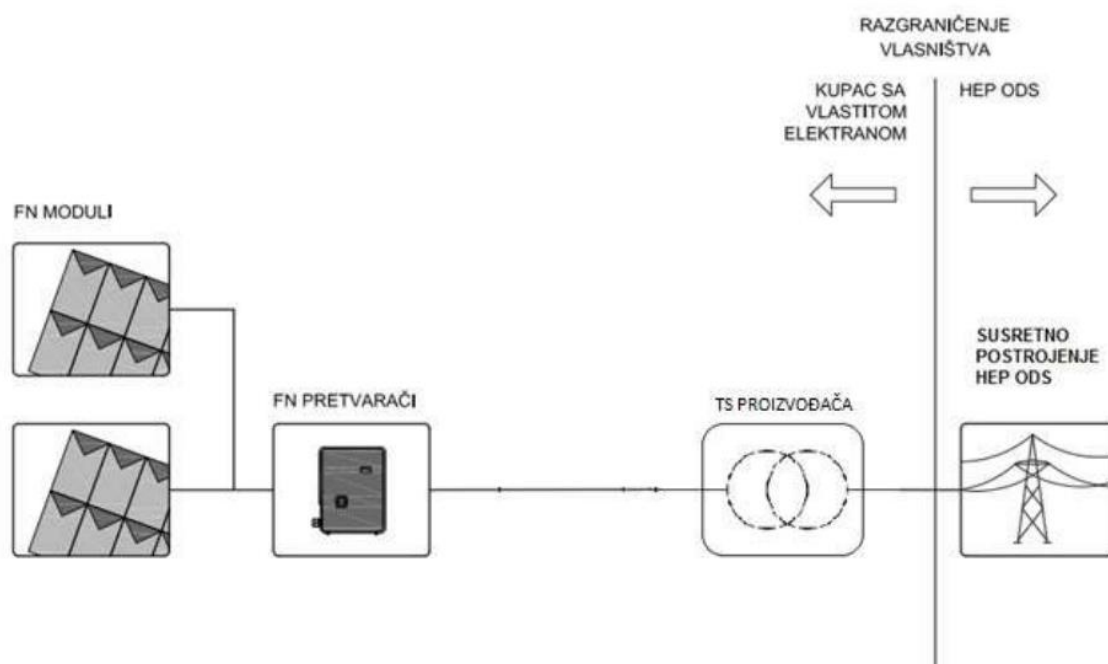
Za elektrane u kategoriji poduzetništva maksimalna instalirana snaga elektrane u smjeru proizvodnje može biti jednaka zakupljenoj priključnoj snazi u smjeru potrošnje. Potrebno je podnijeti zahtjev HEP ODS-u za izdavanje elektroenergetske suglasnosti s priloženom tehničkom dokumentacijom, izvatkom iz katastarskog plana ili odgovarajućom podlogom s ucrtanom građevinom, dokazom vlasništva ili drugog stvarnog prava, potpisanim ugovorom o priključenju (za slučaj složenog priključenja) te dokazom o legalnosti građevine i vlasništvu.

Za elektrane s instaliranom snagom do 50 kW nisu potrebni posebni dokumenti, dok je za elektrane s instaliranom snagom većom od 50 kW potrebno izraditi operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu (OPIP), elaborat podešenja zaštite (EPZ) i elaborat utjecaja na elektroenergetsku mrežu (EUEM) [5].



Slika 3.1.: Složenost priključka [5]

Svaki priključak na mrežu srednjeg napona se naziva složenim priključkom. Za svaki priključak veći od 100 kW potrebno je napraviti kontrolni proračun u srednjenaponskoj mreži, a za svaki priključak veći od 500 kW potrebno je napraviti analizu prijenosne mreže, dostaviti ugovor za izradu EOTRP-a složenosti SN i ugovor o priključenju [5].



Slika 3.2.: Principna shema priključenja fotonaponske elektrane na mrežu

### 3.1. Mrežna pravila distribucijskog sustava

Sukladno mrežnim pravilima distribucijskog sustava (s naglaskom na priključenje fotonaponskih elektrana) uređuju se tehnički uvjeti priključenja korisnika distribucijske mreže na elektroenergetsku distribucijsku mrežu, planiranje razvoja mreže, pogon i način vođenja mreže te korištenje mreže [3].

- Postupak priključenja korisnika mreže na mrežu definiran je Uredbom o priključenju, Pravilima o priključenju i ovim Mrežnim pravilima.
- Podjela korisnika mreže prema nazivnom naponu na mjestu isporuke ili preuzimanja:
  - korisnici mreže s mjestom isporuke ili preuzimanja na niskom naponu (NN), s priključnom snagom do uključivo 500 kW te
  - korisnici mreže s mjestom isporuke ili preuzimanja na srednjem naponu (SN), s priključnom snagom većom od 500 kW, ili priključnom snagom manjom ili jednakom 500 kW u slučaju kada operator distribucijskog sustava elaboratom optimalnog

tehničkog rješenja priključenja utvrdi da nema potrebe izgradnje niskonaponske mreže ili na zahtjev korisnika mreže.

- Tehnički uvjeti za priključenje definiraju uvjete koje treba zadovoljiti korisnik mreže, što se provjerava u postupku priključenja na mrežu.
- Za projektnu vrijednost struje kratkog spoja u pravilu se odabire 16 kA za SN mrežu.
- Priključak se sastoji od priključnog voda i susretnog postrojenja.
- Prilikom puštanja u pogon postrojenja i instalacije korisnika mreže koja ima vlastiti izvor napajanja, za koje je odobren kratkotrajni paralelni rad, korisnik mreže dužan je tijekom pokusnog rada s mrežom provesti ispitivanje kojim će dokazati funkcionalnost odobrenog tehničkog rješenja te dokazati da njegovo postrojenje ispunjava tehničke uvjete za kratkotrajni paralelni rad s mrežom.
- Pokusni rad je niz planiranih ispitivanja ograničenog trajanja u stvarnim pogonskim uvjetima kojima se utvrđuje spremnost postrojenja i instalacije korisnika mreže za dopušteni paralelni pogon s mrežom, odnosno kojim se provjerava je li postrojenje i instalacija korisnika mreže sposobno ispuniti uvjete operatora distribucijskog sustava na njen dopušteni paralelni pogon s mrežom definirane u elektroenergetskoj suglasnosti i važećim propisima koji reguliraju uvjete priključenja
- Ispitivanje sustava zaštite i pojedinih uređaja zaštite, prije puštanja u pogon i tijekom korištenja mreže, provodi operator distribucijskog sustava uvažavajući vrste, namjene i tehnološke izvedbe uređaja zaštite, kao i značajke šticećenih jedinica mreže, u skladu s važećim propisima, normama, preporukama i dobrom praksom.

### **3.2. Puštanje fotonaponske elektrane u rad**

Puštanje fotonaponske elektrane u rad obuhvaća niz koraka koji osiguravaju da sustav radi ispravno i sigurno prije nego što započne s redovitom proizvodnjom električne energije. Ovaj proces je izrazito kompleksan, uključuje pokusni rad, ispitivanje sustava i završne provjere, a svaki od tih koraka ima za cilj osigurati pouzdanost i učinkovitost fotonaponske elektrane. HEP provodi detaljne i stroge procedure kako bi osigurao da sve fotonaponske elektrane rade ispravno i sigurno, doprinoseći održivom razvoju i energetske neovisnosti Hrvatske.

Pokusni rad elektrane je prva faza puštanja u rad koja uključuje detaljno testiranje svih komponenti sustava kako bi se osiguralo njihovo ispravno funkcioniranje. U ovoj fazi provjeravaju se performanse fotonaponskih modula, izmjenjivača i zaštitnih uređaja. Testiranje izmjenjivača uključuje provjeru njihove sposobnosti pretvaranja DC struje u AC struju i reakcije na različite

uvjete opterećenja. Uz to, provodi se i provjera zaštitnih sustava, uključujući osigurače, prekidače i releje, kako bi se osiguralo njihovo pravilno funkcioniranje u slučaju kvara. Nakon provedenih nužnih testiranja komponenti sustava i dobivenih pozitivnih rezultata od ovlaštenih tijela za ispitivanje, elektrana se pušta u probni rad.

Tijekom pokusnog rada vršit će se ispitivanja i mjerenja bitnih zahtjeva prema verificiranom planu i programu ispitivanja [6]:

- Pregled i verifikacija projektno-tehničke dokumentacije fotonaponske elektrane,
- Pregled podešenja relejne zaštite i prekidača u nadređenoj niskonaponskoj mreži te u niskonaponskoj instalaciji kupca i elektrane,
- Provjera istoimenosti faza i okretnog polja istoimenih faza,
- Ispitivanje ulaska svakog pretvarača u paralelni pogon s distribucijskom mrežom – prva sinkronizacija elektrane,
- Ispitivanje ulaska elektrane u paralelni pogon s distribucijskom mrežom – automatska sinkronizacija elektrane,
- Ispitivanje ulaska pretvarača u paralelni pogon s mrežom bez prisutnosti faze/nule,
- Ispitivanje odziva elektrane na prekid u faznom/nultom vodiču mreže,
- Ispitivanje izlaska elektrane iz paralelnog pogona s distribucijskom mrežom,
- Ispitivanja djelovanja relejne zaštite pri odstupanju od uvjeta paralelnog pogona – provjera zaštite od otočnog rada elektrane,
- Mjerenje kvalitete električne energije na OMM-u kupca s vlastitom elektranom – prije priključenja elektrane,
- Mjerenje kvalitete električne energije na OMM-u kupca s vlastitom elektranom – s priključenom elektranom u pogonu.

Ispitivanje sustava uključuje niz tehničkih provjera kako bi se osiguralo da su svi dijelovi sustava pravilno instalirani i funkcionalni unutar predviđenih specifikacija. Ovaj korak obuhvaća električna ispitivanja, poput provjere izolacije i uzemljenja, te funkcionalna ispitivanja sustava pod različitim uvjetima opterećenja. Također se provode termalna ispitivanja kako bi se provjerila stabilnost sustava u različitim temperaturnim uvjetima.

Završne provjere uključuju pregled svih tehničkih dokumenata, vizualne inspekcije svih dijelova sustava te službeno puštanje u rad koje uključuje završne provjere od strane inženjera i nadležnih tijela. Ovaj korak osigurava da je sustav spreman za kontinuiranu proizvodnju električne energije.

### **3.3. Otkup električne energije**

Na stranici HROTE-a navedeni su ključni koraci i potrebna dokumentacija za sklapanje ugovora o otkupu električne energije iz fotonaponskih elektrana. Proces uključuje dobivanje energetskeg odobrenja, sklapanje ugovora o priključenju na elektroenergetsku mrežu, stjecanje statusa povlaštenog proizvođača i podnošenje zahtjeva za otkup električne energije.

Prema literaturi [7] nositelj projekta treba ishoditi sljedeću dokumentaciju kako bi stekao status povlaštenog proizvođača i pravo na otkup električne energije po poticajnoj cijeni:

- Energetsko odobrenje za izgradnju postrojenja (izdaje ga Ministarstvo gospodarstva);
- Ugovor ili predugovor o priključenju na elektroenergetsku mrežu (sklopljen s HEP-Operatorom distribucijskog sustava d.o.o. ili Hrvatskim operatorom prijenosnog sustava d.o.o.);
- Prethodno rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača (izdaje ga Hrvatska energetska regulatorna agencija);
- Rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača (izdaje ga Hrvatska energetska regulatorna agencija nakon što je postrojenje izgrađeno);

Nositelj projekta podnosi HROTE d.o.o. zahtjev za sklapanje ugovora o otkupu električne energije zajedno sa propisanom dokumentacijom.

Trajanje ugovora o otkupu električne energije iznosi četrnaest godina od početka primjene ugovora.

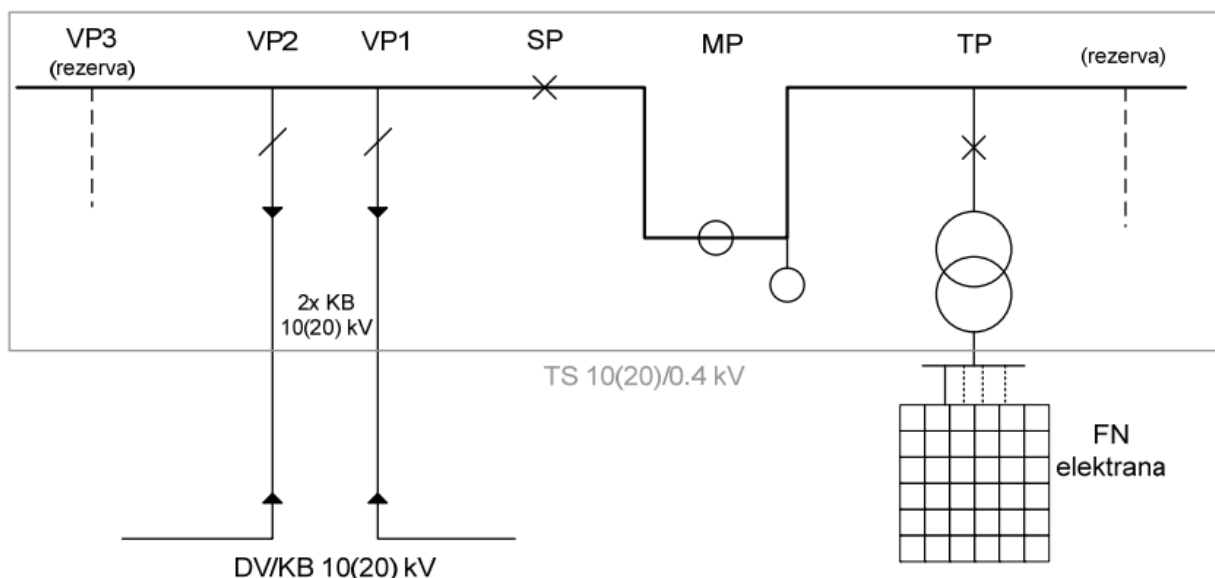
HEP-ODS d.o.o. će svakog mjeseca dostavljati podatke o ukupno proizvedenoj/isporučenoj električnoj energiji u elektroenergetski sustav HROTE-u i povlaštenom proizvođaču. Budući da su podaci zaštićeni, HEP-ODS obavještava povlaštenog proizvođača o načinu dostave. Ovi mjesečni podaci koriste se za obračun i plaćanje isporučene električne energije.

### **3.4. Izvedbe priključaka**

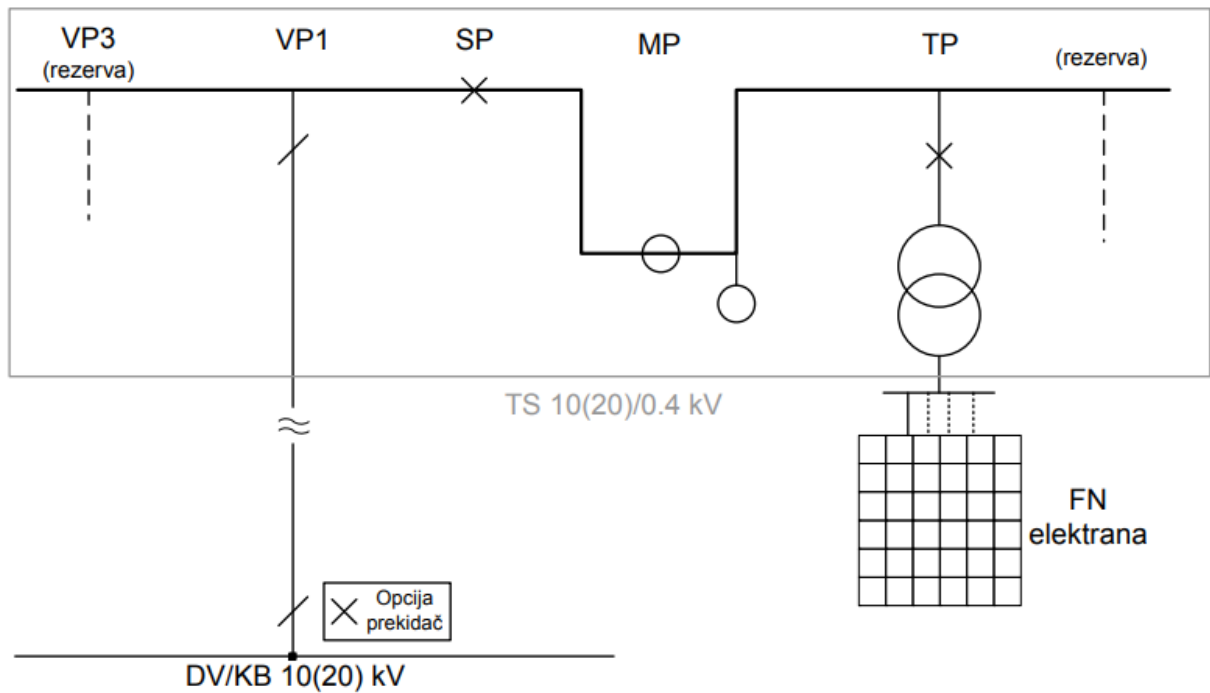
Većina današnjih fotonaponskih elektrana u svijetu priključeno je na elektroenergetsku mrežu. Za priključenje fotonaponskih elektrana na postojeći srednjenaponski vod postoji nekoliko karakterističnih slučajeva koji se obično koriste. Priključak fotonaponskih elektrana se najčešće izvodi na distribucijsku mrežu niskog i srednjeg napona, s obzirom na relativno male instalirane snage fotonaponskih elektrana. U slučaju fotonaponske elektrane veće instalirane snage (veće od 500 kW) nužan je priključak na srednjenaponsku distribucijsku mrežu. Izvedbe priključaka fotonaponskih elektrana na srednjenaponsku mrežu su direktni radijalni priključak, radijalni T

spoj, prstenasti priključak, mrežasti priključak, priključak po sistemu ulaz-izlaz, priključak putem postojeće transformatorske stanice (na niskonaponsku ili srednjenaponsku stranu TS 10(20)/0,4 kV), priključak putem nove transformatorske stanice, priključak putem pametnih mreža, priključak putem sustava za skladištenje energije te priključak putem virtualne elektrane [8].

Kada je fotonaponska elektrana priključena radijalno na mrežu u izvedbi direktnog radijalnog priključka, tada je elektrana direktno priključena na srednjenaponski vod s jednog kraja, dok je kod izvedbe radijalnog T spoja fotonaponska elektrana postavljena kao dodatna grana, kako je prikazano na slici 3.4.. Radijalni T spoj se izvodi u slučaju većih udaljenosti od fotonaponske elektrane do mjesta priključka na mrežu. Ako je fotonaponska elektrana priključena na srednjenaponsku mrežu koja je konfigurirana u obliku prstena, tada omogućuje dvosmjernu opskrbu, a kada je priključena na mrežu koja ima više povezanih vodova i omogućava više smjerova opskrbe tada pričamo o mrežastom priključku fotonaponske elektrane. Priključak po sistemu ulaz-izlaz izvodi se interpolacijom u obližnji dalekovod, kao što je prikazano na slici 3.3.. Uz navedene izvedbe priključaka, za male fotonaponske elektrane koristi se priključak na niskonaponsku stranu postojeće transformatorske stanice, dok se srednje velike fotonaponske elektrane priključuju na srednjenaponsku stranu postojeće transformatorske stanice. Za velike fotonaponske elektrane izgrađuje se nova transformatorska stanica za priključak.



Slika 3.3.: Načelna shema priključka fotonaponske elektrane po sistemu ulaz-izlaz [8]



Slika 3.4.: Načelna shema radijalnog T priključka fotonaponske elektrane [8]

Suvremenije metode koje se koriste za priključenje fotonaponske elektrane su priključak putem pametnih mreža (Smart Grid) gdje se koriste napredne tehnologije za upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije te priključak putem VPP (Virtual Power Plant) s naprednim softverskim rješenjima za upravljanje različitim izvorima energije.

Priključak fotonaponskih elektrana na srednjenaponsku mrežu može se realizirati kroz različite izvedbe, od radijalnih i prstenastih priključaka do integracije u pametne mreže i virtualne elektrane. Svaka izvedba ima svoje prednosti i nedostatke, a izbor ovisi o specifičnim zahtjevima projekta, kapacitetu fotonaponske elektrane i postojećoj infrastrukturi.

## **4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE**

Fotonaponske elektrane predstavljaju tehnologiju za proizvodnju električne energije iz sunčeve svjetlosti s pomoću fotonaponskih ćelija, koje pretvaraju sunčevu energiju izravno u električnu energiju putem fotoelektričnog efekta. Ova tehnologija omogućuje održivu i čistu proizvodnju električne energije bez emisija štetnih plinova, što je ključno za borbu protiv klimatskih promjena i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima.

Glavni sastavni element fotonaponske elektrane su fotonaponski moduli, koji su sastavljeni od solarnih ćelija obično napravljenih od silicijevih materijala. Kada sunčeva svjetlost obasipa solarnu ćeliju, ona generira električnu struju koja se prenosi do izmjenjivača. Izmjenjivač ili pretvarač pretvara istosmjernu DC struju u izmjeničnu AC struju koja se može koristiti u električnoj mreži ili skladištiti u baterijama. Naravno, samo mali dio raspoložive sunčeve energije se stvarno iskorištava, dok većina energije ostaje neiskorištena.

Fotonaponske elektrane mogu biti različitih veličina, od malih balkonskih instalacija, krovnih instalacija za kućanstva, pa sve do velikih komercijalnih i industrijskih postrojenja. Njihova fleksibilnost i modularna struktura omogućuju prilagodbu različitim potrebama i uvjetima, što čini ovu tehnologiju sve popularnijom i konkurentnijom na tržištu energije.

Uz ekološke prednosti, fotonaponske elektrane također pružaju ekonomske prednosti kroz smanjenje troškova električne energije, gledano dugoročno, ovisno o lokaciji, cijeni instalacije i državnim poticajima za obnovljive izvore energije. Fotonaponske elektrane igraju ključnu ulogu u tranziciji prema čistoj energetskej budućnosti.

### **4.1. Princip rada fotonaponske elektrane**

Fotonaponska elektrana koristi solarnu tehnologiju za pretvorbu sunčeve svjetlosti izravno u električnu energiju kroz fotoelektrični efekt. Kada sunčeva svjetlost obasipa fotonaponsku ćeliju, fotoni koji se nalaze u sunčevoj svjetlosti izazivaju oslobađanje elektrona u poluvodičkom elementu. Elektroni tako postaju slobodni nosioci naboja, kreću se u istom smjeru pod utjecajem električnog polja PN spoja te time stvaraju električni napon između slojeva materijala u ćeliji, koji je poznat kao fotoelektrični efekt. Nakon pretvorbe istosmjerne struje proizvedene u fotonaponskoj elektrani s pomoću pretvarača u izmjeničnu struju, elektrana se povezuje s električnom mrežom kućanstva, zgrade ili distribucijskom mrežom. Solarna energija koju proizvodi fotonaponska elektrana koristi se za napajanje električnih uređaja i sustava, dok višak proizvedene energije može biti isporučen natrag u električnu mrežu. Sustavi fotonaponskih elektrana su često opremljeni



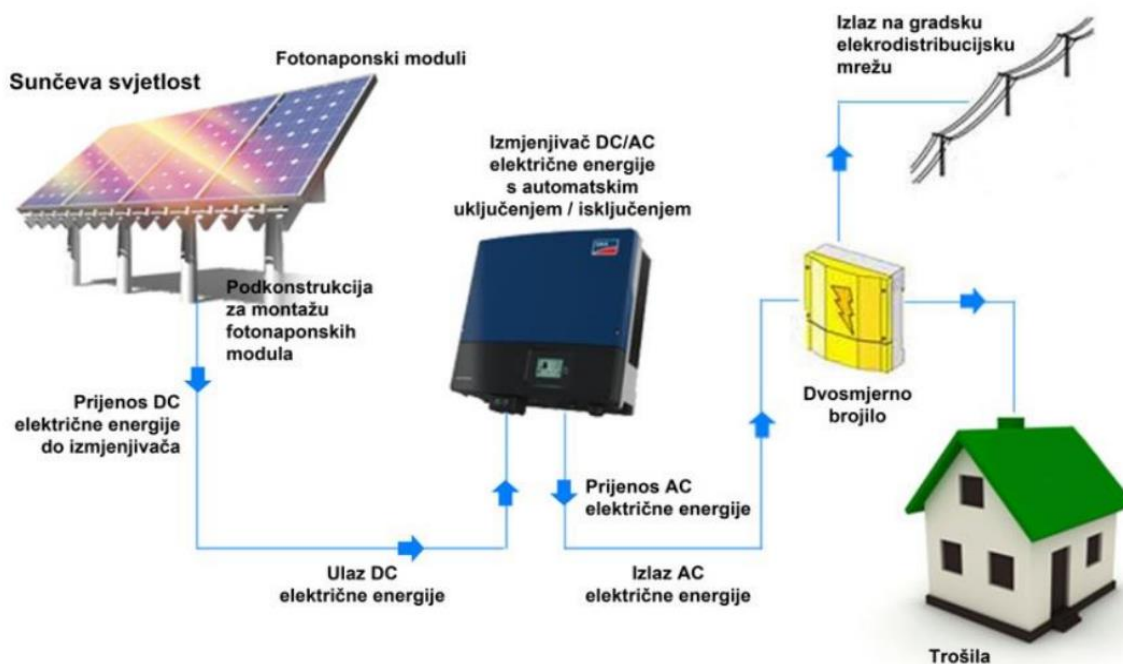
sustavima za praćenje i kontrolu koji prate performanse sustava, uključujući proizvodnju energije, stanje modula, kapacitet baterija i efikasnost pretvarača.

Fotonaponski sustav čine fotonaponski paneli koji su serijski povezani u stringove, obično s 10 do 20 panela u svakom stringu. Dobiveni napon na panelima se mora pretvoriti s pomoću pretvarača ili izmjenjivača u izmjenični napon, s frekvencijom od 50 Hz i sinusoidalnim oblikom za kućanstva. Nakon toga je potrebno uskladiti sustav s mrežnim naponom, odnosno izvršiti sinkronizaciju.

Svaka fotonaponska elektrana se sastoji od fotonaponskih modula kao osnovnog elementa sustava. Pored modula, za generiranje električne energije potrebni su pretvarač, brojila, prekidači, osigurači i zaštita, spojni vodovi te konstrukcija i nosači.

## 4.2. Dijelovi fotonaponske elektrane

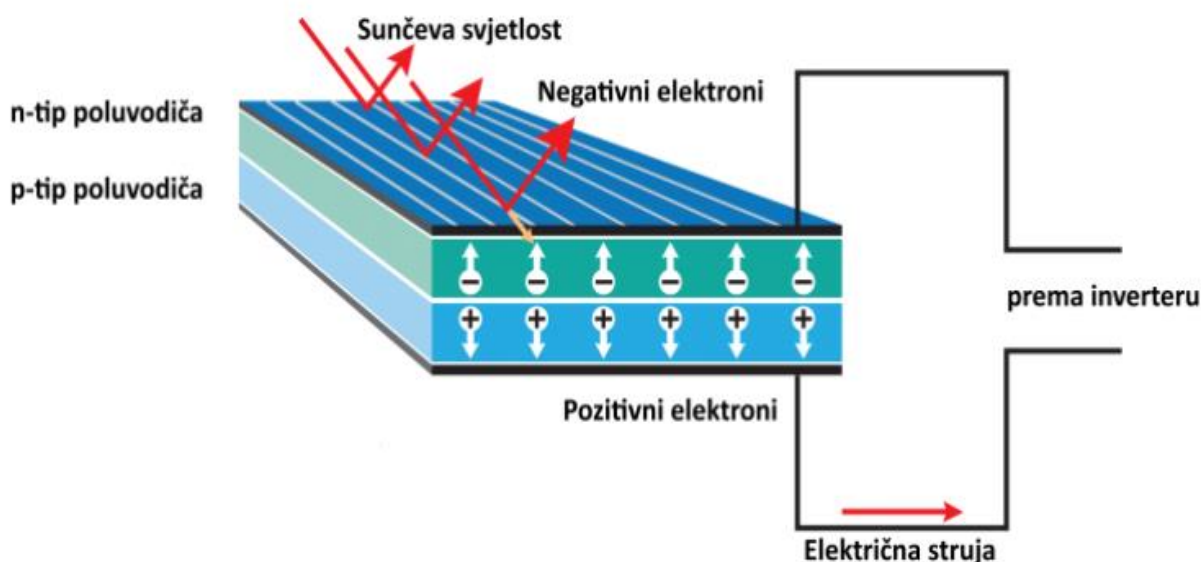
Fotonaponska elektrana je složeni sustav koji se sastoji od različitih komponenti dizajniranih da pretvore sunčevu svjetlost u električnu energiju. Ova tehnologija, koja koristi fotonaponske module kao glavni izvor za generiranje struje, zahtjeva i niz dodatnih dijelova i uređaja kako bi se osigurala učinkovita proizvodnja, skladištenje i distribucija električne energije. U ovom odjeljku detaljno su razmotrene ključne komponente fotonaponske elektrane, njihove funkcije i ulogu koju igraju u cjelokupnom sustavu proizvodnje obnovljive energije.



Slika 4.1. Dijelovi fotonaponske elektrane [9]

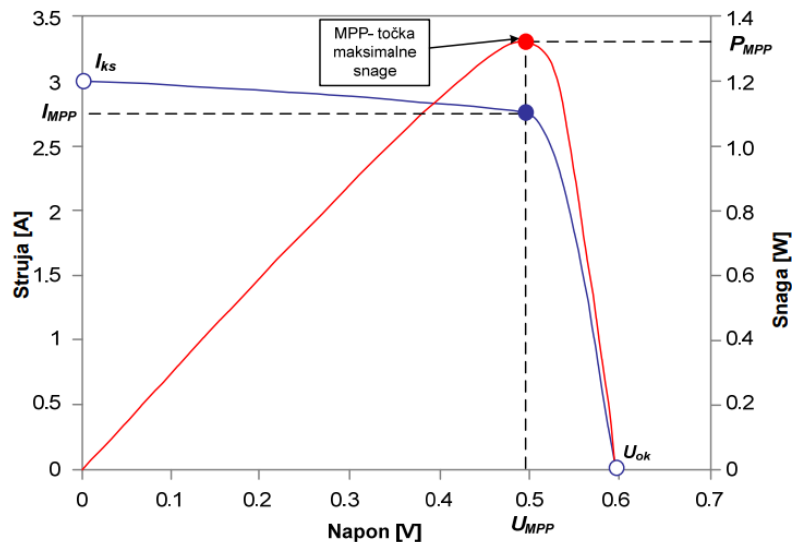
#### 4.2.1. Fotonaponske ćelije

Fotonaponske ćelije su osnovne komponente fotonaponskih modula ili solarnih panela koje pretvaraju sunčevu svjetlost izravno u električnu energiju. Ove ćelije su obično izrađene od poluvodičkih materijala, kao što je najčešće silicij te od monokristalnih i polikristalnih tankoslojnih materijala. Fotonaponska ćelija se sastoji od p i n tipa poluvodiča. Napon koji se generira u jednoj fotonaponskoj ćeliji naziva se naponom otvorenog kruga, a prosječna vrijednost napona jedne ćelije kreće se između 0,5 V i 0,7 V. S druge strane, gustoća struje kratkog spoja obično iznosi nekoliko desetaka miliampera po kvadratnom centimetru ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ). Uz napon otvorenog kruga i gustoću struje kratkog spoja, važni parametri fotonaponske ćelije uključuju stupanj djelovanja, maksimalnu snagu i faktor punjenja. Ovi parametri pružaju detaljan uvid u performanse i efikasnost fotonaponske ćelije te su ključni za procjenu i usporedbu različitih tipova i modela ćelija.



Slika 4.2.: Presjek solarne ćelije

Samostalne fotonaponske ćelije kao takve primjenjuju se na raznim mjestima gdje je potrebno neovisno napajanje električnom energijom. Nalazimo ih na kalkulatorima, satelitima, prometnim znakovima, kamerama za nadzor, meteorološkim stanicama, svjetlima za osvjtljenje cesta i signalizaciju, te na raznim drugim uređajima koji se nalaze na mjestima udaljenima od glavne elektroenergetske mreže, a kojima je potrebno napajanje električne energije.



Slika 4.3.: Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije

**Napon otvorenog kruga** je maksimalni napon koji ćelija može postići kada nema struje u krugu, odnosno to je dobiveni napon na stezaljkama osvijetljene FN ćelije pri otvorenom strujnom krugu.

Napon otvorenog kruga ( $U_{OK}$ ) računa se prema formuli (4.1):

$$U_{OK} = \frac{m \cdot k \cdot T}{q} * \ln \left( \frac{I_{fs}}{I_o} + 1 \right) [V] \quad (4.1)$$

gdje je:

- m faktor idealnosti diode
- k Boltzmannova konstanta
- T temperatura
- q naboj elektrona
- $I_{fs}$  struja generirana fotonaponskom ćelijom
- $I_o$  struja zasićenja diode

**Stupanj djelovanja** je mjera efikasnosti fotonaponskih ćelija i predstavlja omjer između stvarno proizvedene električne snage i teoretski moguće maksimalne snage. Obično, stupanj djelovanja fotonaponskih ćelija je vrlo malen, a tipičan fotonaponski modul ima učinkovitost od oko 20,2 % što znači da pretvara otprilike petinu sunčevog zračenja koje obasipa modul u električnu energiju.

Efikasnost fotonaponskih sustava može varirati ovisno o različitim modelima, gdje jeftinije izvedbe mogu imati efikasnost od oko 5 %, dok visokokvalitetni modeli mogu doseći i do 40 % efikasnosti.

Korisnost fotonaponske ćelije definira se prema izrazu (4.2):

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sunca}} \quad (4.2)$$

gdje je:

$P_{el}$  izlazna električna snaga fotonaponske ćelije

$P_{sunca}$  snaga sunčeva zračenja

**Faktor punjenja** fotonaponske ćelije odnosi se na omjer stvarne maksimalne snage koju fotonaponska ćelija može proizvesti i idealne maksimalne snage koju bi ćelija mogla proizvesti kada bi radila na naponu otvorenog kruga i gustoći struje kratkog spoja. Visoke vrijednosti faktora punjenja obično ukazuju na bolje performanse i veću efikasnost fotonaponske ćelije. Stvarni faktor punjenja iznosi između 0.7 i 0.9, a izražava se omjerom snaga idealne i realne fotonaponske ćelije, kako je prikazano izrazom (4.3).

$$F = \frac{U_m * I_m}{U_{PH} * I_{KS}} \quad (4.3)$$

gdje je:

$U_m$  najveći napon FN ćelije

$I_m$  najveća struja FN ćelije

$U_{PH}$  napon otvorenog kruga

$I_{KS}$  struja kratkog spoja

Tablica 4.1. Tehnička svojstva silicijskih fotonaponskih ćelija

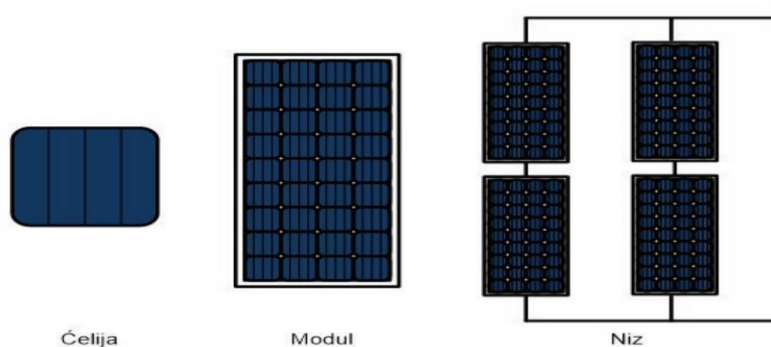
FN ćelija	$U_{OK}$ [V]	$J_{KS}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$\eta$ [%]
FN ćelija od monokristalnog silicija	0,55-0,7	30	16
FN ćelija od polikristalnog silicija	0,6	26	10-14
FN ćelija od amornog silicija	0,85	15	7

#### 4.2.2. Fotonaponski modul

Fotonaponski modul odnosno solarni panel sastoji se od fotonaponskih ćelija koje su povezane serijski, paralelno ili kombinacijom oba načina. Svaka fotonaponska ćelija generira između 0,5 V i 0,7 V s gustoćom struje oko 200 A/m<sup>2</sup>. Da bi se postigao potreban izlazni napon, koji najčešće iznosi 12 V ili 24 V, potrebno je spojiti veći broj fotonaponskih ćelija.

Na primjer, za postizanje izlaznog napona od 12 V, potrebno je povezati 36 fotonaponskih ćelija serijski. Ove ćelije omogućavaju vršne snage solarnih panela koje najčešće iznose 75 W, 100 W ili 120 W. Korištenjem ovih osnovnih jedinica moguće je izgraditi velika fotonaponska postrojenja. Serijsko povezivanje modula koristi se za postizanje željenog napona, dok se paralelno povezivanje koristi za dobivanje potrebne struje.

Kombinirajući module od 12 V, moguće je formirati sustave koji zadovoljavaju različite energetske potrebe, omogućujući fleksibilnost u dizajnu i implementaciji fotonaponskih postrojenja. Ova modularna struktura omogućava prilagodbu sustava specifičnim zahtjevima i uvjetima osiguravajući efikasnu proizvodnju energije.



Slika 4.4.: FN ćelija, FN modul i niz FN modula [10]

Za izgradnju elektrane snage 1000 kW potrebno je postaviti fotonaponske module tipa Reisen RSM 60-60-310M ili slične, svaki s nazivnom snagom od 310 W. Ovi fotonaponski moduli imaju certifikate i usklađeni su s normama HRN EN 61215 i HRN EN IEC 61730. Tehničke karakteristike modula detaljno su objašnjene u tablici 4.2. Elektrana sastavljena od 5280 modula može postići ukupnu nazivnu snagu od 1636,8 kW. Takva elektrana bi godišnje mogla proizvesti 1727 MWh električne energije.

Tablica 4.2. Tehnički karakteristike fotonaponskog modula Reisen RSM 60-30-310M [11]

Broj ćelija	60
Tip sunčane ćelije	Monokristalne, 156.75 mm x 156.75 mm
Nominalna snaga [ $P_{MPP}$ ]	310 W
Napon otvorenog kruga [ $U_{OK}$ ]	40,6 V
Struja kratkog spoja [ $I_{KS}$ ]	9,86 A
Nominalni napon [ $U_{MPP}$ ]	33,4 V
Nominalna struja [ $I_{MPP}$ ]	9.29 A
Efikasnost modula [ $\eta_m$ ]	18,9 %
Dimenzije modula	1650 mm x 992 mm x 35 mm
Standardni uvjeti ispitivanja	1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C, AM 1,5

#### 4.2.3. Izmjenjivači

Izmjenjivači su ključna komponenta sunčanih elektrana jer pretvaraju istosmjernu struju koju proizvode solarni paneli u izmjeničnu struju pogodnu za isporuku u srednjenaponsku mrežu. U srednjenaponskim mrežama, obično se radi s naponom od 10 kV do 35 kV, a izmjenjivači moraju osigurati stabilan i kvalitetan izlaz električne energije koji zadovoljava mrežne standarde. Izmjenjivači za sunčane elektrane povezane na srednjenaponsku mrežu su visokog kapaciteta, obično u rasponu od nekoliko stotina kW do nekoliko MW. Oni moraju biti robusni, pouzdani i učinkoviti, te uključuju napredne tehnologije za optimizaciju performansi i sigurnost.

Neki od popularnih modela za velike fotonaponske elektrane su izmjenjivač SMA Sunny Central 2200, koji ima nominalnu snagu od 2200 kW i može raditi s ulaznim naponom do 1500 V DC. Dolazi opremljen tehnologijom za aktivno hlađenje, što omogućava rad u teškim uvjetima okoline. Efikasnost mu je preko 98 % te osigurava minimalne gubitke energije. Izmjenjivač Huawei SUN2000-185KTL-H1 ima nazivnu snagu od 185 kW i podržava ulazni napon do 1500 V DC. Efikasnost mu je preko 98,8 %.

Tablica 4.3. Tehničke karakteristike izmjenjivača SMA Sunny Tripower CORE1 [11]

Maksimalna ulazna snaga (DC)	75000 W
Maksimalni ulazni napon (DC)	1000 V
Radno područje ulaznog napona (DC)	500-800 V
Maksimalna izlazna snaga (AC)	50000 W
Nominalni izlazni napon (AC)	230/400 V
Nominalna frekvencija izlaznog napona (AC)	50 Hz
Maksimalna izlazna struja (AC)	72,5 A
Maksimalna izlazna struja kratkog spoja (AC)	86 A



Slika 4.5.: Izmjenjivač SMA Sunny Central 2200

Izmjenjivači su vitalni za uspješan rad sunčanih elektrana priključenih na srednjenaponsku mrežu, a odabir pravih modela može značajno utjecati na performanse i ekonomske rezultate projekta.

#### 4.2.4. Ostale komponente fotonaponskih sustava

Kao što je već spomenuto, fotonaponski sustav sastoji se od nekoliko ključnih komponenti, a najvažniji dio su fotonaponski moduli. Ostale komponente uključuju izmjenjivač, brojila, spojne vodove, prekidače, osigurače i nosače za montažu solarnih panela. Regulator punjenja i baterije, odnosno akumulatori, koriste se isključivo u otočnim fotonaponskim sustavima, gdje je sustav potpuno neovisan o javnoj mreži.

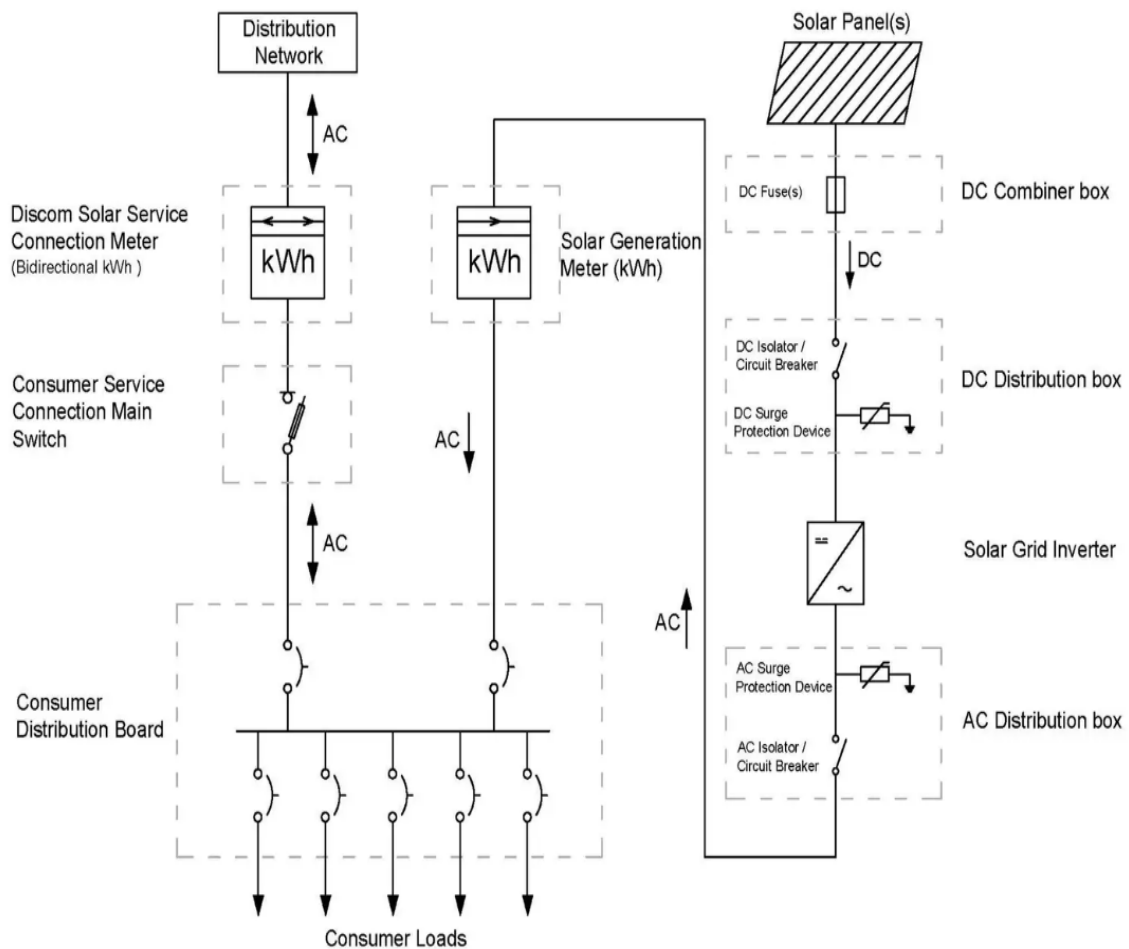
**Brojila** imaju ključnu ulogu u preciznom mjerenju proizvodnje i isporuke električne energije u fotonaponskoj elektrani spojenoj na srednjenaponsku mrežu. Ona omogućuju praćenje performansi sustava, precizno obračunavanje proizvedene energije koja se isporučuje u mrežu te osiguravaju usklađenost s regulatornim zahtjevima. Za mrežne sustave, odnosno sustave gdje se višak proizvedene električne energije može vratiti u mrežu, potrebno je dvosmjerno brojilo radi obračuna električne energije.

**Prekidači** imaju ključnu ulogu u fotonaponskoj elektrani spojenoj na srednjenaponsku mrežu. Oni omogućuju sigurno isključivanje i uključivanje električnih krugova, kao i kontrolu protoka električne energije unutar elektrane. Osim toga, prekidači se koriste za osiguravanje pouzdanosti i sigurnosti sustava te za zaštitu opreme od preopterećenja ili kratkih spojeva. U slučaju nužde ili održavanja, prekidači omogućuju izolaciju od glavnog napajanja, čime se osigurava siguran rad elektrane i osoblja koje radi na njoj.

### 4.3. Zaštita fotonaponske elektrane

Zaštita fotonaponskih postrojenja je ključna za osiguranje sigurnog i pouzdanog rada cijelog sustava. Neki od osnovnih elemenata zaštite koji se primjenjuju na fotonaponskim postrojenjima su zaštita od prenapona, preopterećenja i kratkog spoja, iskrenja, uzemljenje, zaštita izmjenjivača, nadzor i upravljanje te fizička sigurnost. Implementacija ovih zaštitnih mjera osigurava da fotonaponska postrojenja mogu raditi sigurno i pouzdano, smanjujući rizik od kvarova i šteta, te osiguravajući kontinuitet opskrbe električnom energijom.





Slika 4.6.: Elementi zaštite fotonaponskog sustava povezanoga na distribucijsku mrežu [12]

Prenaponska zaštita štiti sustav od visokih napona koji mogu nastati uslijed izravnog ili neizravnog udara munje ili drugih vanjskih utjecaja. Osnovni uređaji za prenaponsku zaštitu su prenaponski zaštitni uređaji (SPD-ovi), koji su dizajnirani da preusmjere višak napona na sigurno uzemljenje. SPD-ovi se postavljaju na kritična mjesta u sustavu, kako na DC stranu između fotonaponskih modula i izmjenjivača, tako i na AC stranu između izmjenjivača i mreže.

Kod fotonaponske elektrane položene na zemlju ne postoji izravna opasnost od atmosferskog pražnjenja, no jedinu opasnost po ljudski život predstavljaju napon koraka i dodirni napon.

Zaštita od prevelikih struja u sredjenaponskim fotonaponskim elektranama ključna je za osiguranje sigurnog i pouzdanog rada sustava. Prevelike struje mogu nastati uslijed preopterećenja ili kratkih spojeva. Osnovne komponente zaštite od prevelikih struja su osigurači i prekidači, pri čemu su osigurači ti koji prekidaju kada struja koja teče kroz njih prelazi određenu granicu, čime se sprječava protok prevelike struje i štiti oprema od oštećenja, a prekidači su automatski uređaji koji prekidaju strujni krug u slučaju preopterećenja ili kratkog spoja. Zaštitu od prevelikih struja

također uključuje pažljivo dimenzioniranje i postavljanje zaštitnih uređaja kako bi se osigurala njihova učinkovitost u različitim uvjetima rada.

Zaštitni releji nadziru struju u sustavu i aktiviraju prekidače kada detektiraju kratki spoj. Ovi releji su programirani da prepoznaju abnormalno visoke struje koje karakteriziraju kratke spojeve. Postoje različiti tipovi releja, uključujući nadstrujne, diferencijalne i zemljospojne releje, svaki sa specifičnom funkcijom.

Zaštita od iskrenja u srednjenaponskoj fotonaponskoj elektrani ključna je za sprječavanje požara i osiguranje sigurnog rada sustava. Iskrenje može nastati zbog loših spojeva, oštećenih vodiča ili kvarova u komponentama, te može uzrokovati ozbiljna oštećenja ili požare. Kako bi se smanjio rizik od iskrenja, u praksi se koriste kvalitetna izolacija i kabliranje, korištenje kvalitetnih spojnica i konektora, a također u sprječavanju iskrenja pomažu i pravilno uzemljenje i zaštita od prenapona.

Prenaponski zaštitni uređaji (SPD) štite izmjenjivač od visokih napona koji mogu nastati zbog udara munje ili drugih prenaponskih događaja. Oni odvede višak napona u uzemljenje prije nego što može doći do oštećenja izmjenjivača. Prenaponska zaštita izmjenjivača se instalira na ulazu i izlazu izmjenjivača kako bi se osigurala maksimalna zaštita. Izmjenjivači su opremljeni zaštitnim sklopovima koji detektiraju opterećenja i kratke spojeve. Ti sklopovi uključuju prekidače i osigurače koji automatski isključuju strujni krug u slučaju prevelikih struja, čime se sprječava oštećenje unutarnjih komponenti izmjenjivača. Unutar izmjenjivača se također nalaze i termalni senzori koji nadziru radnu temperaturu izmjenjivača.

Diferencijalna zaštita odnosno RCD uređaji se priključuju na AC stranu fotonaponske elektrane, a detektiraju razlike između ulazne i izlazne struje te prekidaju strujni krug u slučaju otkrivanja zemljospojnog kvara, čime se smanjuje rizik od električnog udara.

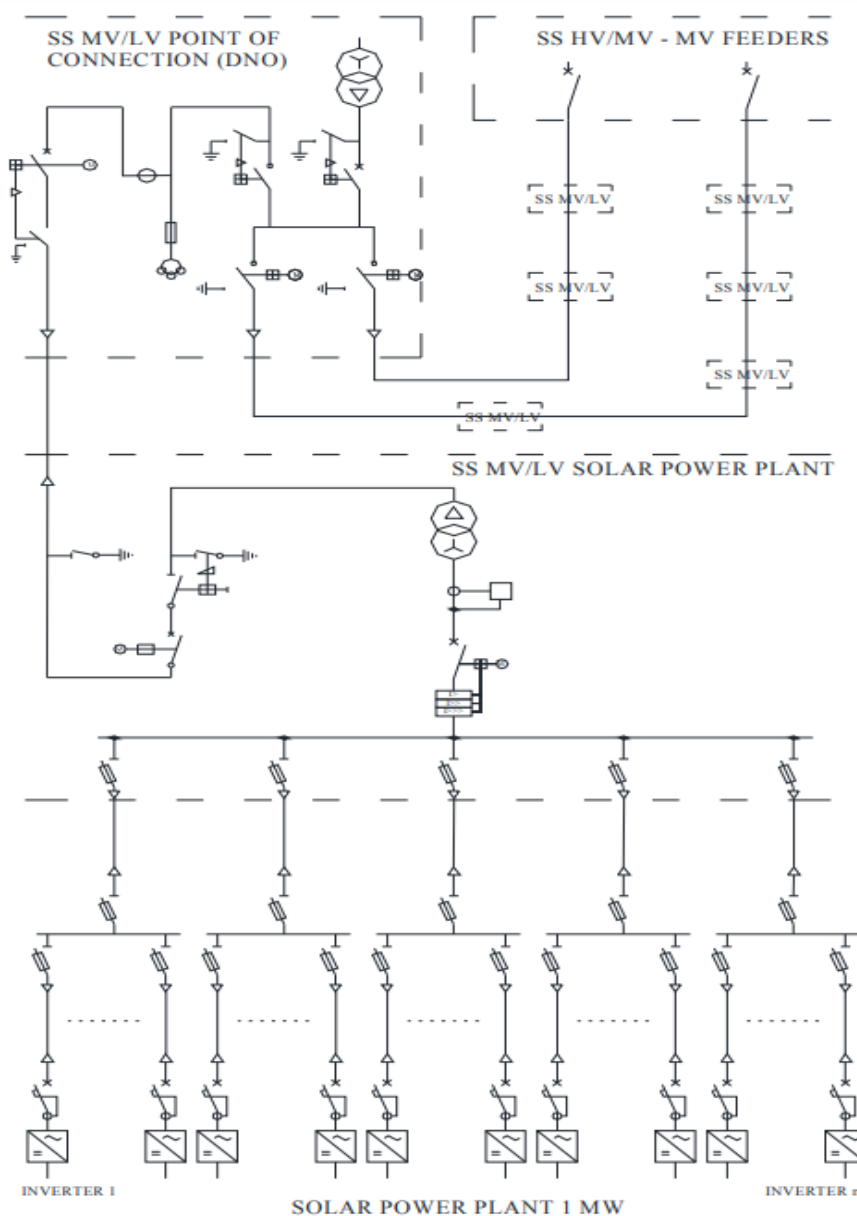
Uređajima frekvencijske zaštite nadzire se frekvencija mreže, dakle djeluju na izmjeničnoj strani fotonaponske elektrane, a ako frekvencija padne izvan predviđenih granica isključuju sustav čime se štiti oprema od kritičnih neprirodnih radnih uvjeta.

Sinkronizaciju i paralelni rad fotonaponske elektrane s mrežom osiguravaju uređaji za sinkronizaciju i paralelni rad kako bi se izbjegla nesinkronizirana isporuka električne energije koja može dovesti do neželjenih nestabilnosti u mreži.

Nadzor i upravljanje kao komponenta zaštite u fotonaponskoj elektrani su ključni za osiguranje sigurnosti, učinkovitosti i pouzdanosti sustava. Ovi sustavi omogućuju kontinuirano praćenje, analizu i optimizaciju rada fotonaponske elektrane te brzu intervenciju u slučaju problema.

Uzemljenje srednjenaponske fotonaponske elektrane je ključan element za osiguravanje sigurnosti i pravilnog rada sustava. Pravilno uzemljenje omogućuje sigurno odvođenje viškova napona u zemlju, štiti opremu od prenapona i osigurava sigurnost za osoblje koje radi na održavanju sustava. Uzemljenje fotonaponskih elektrana regulirano je različitim standardima i smjernicama, kao što su IEC 60364-7-712 i lokalni propisi. Oni definiraju minimalne zahtjeve za uzemljenje.

Transformatori su ključni elementi u fotonaponskim elektranama koji omogućuju transformaciju niskog napona s izlaza invertera na srednjenaponski nivo koji je prikladan za distribucijsku mrežu, a zaštitne mjere transformatora uključuju diferencijalnu zaštitu, zaštitu od preopterećenja, zaštitu od pregrijavanja, zaštitu od prenapona te zemljospojnu zaštitu.



Slika 4.7.: Fotonaponska elektrana koja se sastoji od više pretvaračkih jedinica priključenih na srednjenaponsku mrežu

Ključan aspekt zaštite fotonaponskih elektrana je selektivna koordinacija zaštitnih uređaja, koja osigurava da samo dio sustava zahvaćen kvarom bude isključen, dok ostatak sustava nastavlja s radom. Ova strategija minimizira prekide u proizvodnji i povećava ukupnu pouzdanost sustava.

Kombinacija svih zaštitnih mjera osigurava sigurnost i stabilnost fotonaponske elektrane, štiti opremu i osoblje te osigurava pouzdanost i kvalitetu električne energije isporučene u elektroenergetski sustav.

## 5. NEINTEGRIRANE FOTONAPONSKE ELEKTRANE U HRVATSKOJ

Neintegrirane fotonaponske elektrane u Hrvatskoj predstavljaju značajan doprinos u proizvodnji obnovljive energije, smještene izvan postojećih građevinskih objekata i postavljene na otvorenim površinama. Ove elektrane su ključne za povećanje kapaciteta solarne energije i smanjenje emisije stakleničkih plinova.

Neintegrirane fotonaponske elektrane instalirane su na većim površinama, kao što su poljoprivredna ili industrijska zemljišta, čime se maksimizira iskorištenje sunčeve energije. Ove elektrane mogu imati znatno veće kapacitete u usporedbi s integriranim elektranama i igraju ključnu ulogu u povećanju energetske neovisnosti Hrvatske. HEP kontinuirano radi na razvoju i proširenju ovih kapaciteta kako bi se povećao udio solarne energije u ukupnoj proizvodnji električne energije u zemlji.

Samostojeće solarne elektrane, postavljene na tlu, razlikuju se od integriranih verzija koje su ugrađene u građevinske objekte. Ovi neintegrirani sustavi omogućuju povećanje kapaciteta proizvodnje električne energije na mjestima gdje integracija s postojećim strukturama nije izvediva ili je preskupa. Zahvaljujući svojoj prilagodljivosti i efikasnosti, neintegrirane solarne elektrane postaju ključne za postizanje održivih energetskih ciljeva.

Jedna od glavnih prednosti neintegriranih fotonaponskih sustava je jednostavnost postavljanja solarnih panela na nosače ili konstrukciju na tlu. Ovakav način instalacije omogućuje precizno usmjeravanje panela prema suncu tijekom dana, što povećava proizvodnju energije. Njihova prilagodljivost čini ih idealnim rješenjem za područja s promjenjivim uvjetima sunčeve svjetlosti ili za terene različitih nagiba.

Neintegrirane fotonaponske elektrane igraju ključnu ulogu u tranziciji prema održivom energetskom modelu. Njihova efikasnost, ekonomska isplativost i fleksibilnost postavljanja čine ih čestim izborom za različite sektore i terene. Ovi sustavi dokazuju da inovacije u obnovljivim izvorima energije mogu oblikovati budućnost energetskog sektora [13].

Na području Republike Hrvatske postoji osam HEP-ovih neintegriranih fotonaponskih elektrana koje su u pogonu, a one su Sunčana elektrana Kaštelir, Sunčana elektrana Kaštelir 2, Sunčana elektrana Vis, Sunčana elektrana Marići, Sunčana elektrana Kosore Jug (Vrlika), Sunčana elektrana Stankovci, Sunčana elektrana Obrovac te Sunčana elektrana Donja Dubrava. U probnom radu se nalazi Sunčana elektrana Jambrek. Neintegrirane fotonaponske elektrane koje su u procesu gradnje su Sunčana elektrana Radosavci, Sunčana elektrana Črnkovci, Sunčana elektrana Dugopolje te Sunčana elektrana Lipik [14].

Površinski najveća neintegrirana sunčana elektrana, a koja je priključena na mrežu srednjega napona je Sunčana elektrana Obrovac s priključnom snagom elektrane od 7,35 MW i instaliranom snagom od 8,7 MW. Sunčana elektrana Obrovac prostire se na površini od 117.137 m<sup>2</sup>. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije iznosi oko 11,3 milijuna kWh, a može zadovoljiti potrebe više od 3500 kućanstava.



*Slika 5.1.: Sunčana elektrana Obrovac [7]*

Sunčana elektrana Donja Dubrava, koja je izgrađena uz hidroelektranu Donja Dubrava je najveća sunčana elektrana prema instaliranoj odnosno priključnoj snazi. Elektrana je maksimalne priključne snage 9,9 MW odnosno 12,35 MW instalirane snage. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije iznosi 14,8 milijuna kWh, a tijekom 30 godina rada će se izbjeći emisija od 167 tisuća tona ugljikovog dioksida.





*Slika 5.2.: Sunčana elektrana Donja Dubrava [14]*

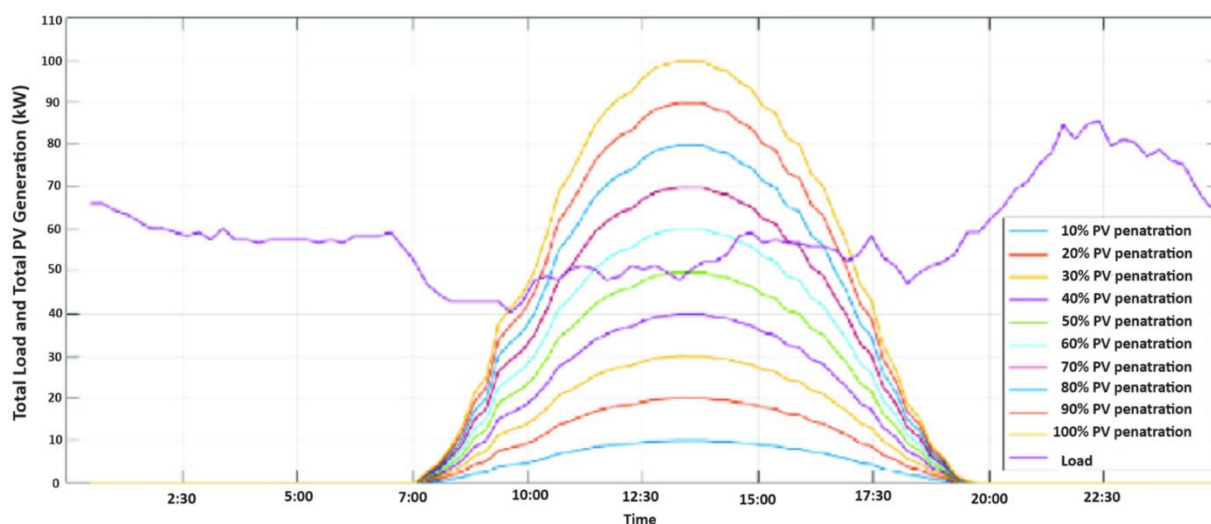
Prema instaliranoj snazi neintegriranih sunčanih elektrana, od najveće slijede Sunčana elektrana Donja Dubrava od 9,9 MW, Sunčana elektrana Obrovac od 7,35 MW, Sunčana elektrana Vis od 3,5 MW, Sunčana elektrana Stankovci od 2,5 MW, Sunčana elektrana Kaštelir 2 od 2 MW te Sunčane elektrane Kaštelir, Marići i Kosore Jug od 1 MW. Sunčana elektrana Jambrek, koja je u probnom radu ima priključnu snagu 4,99 MW.

Danas je u solarnim elektranama na području Republike Hrvatske instalirano 482,65 MW, što iznosi oko 319 GWh godišnje proizvodnje električne energije.

Ciljevi do 2030. godine koje Republika Hrvatska planira su definitivno značajno povećati kapacitet obnovljivih izvora energije, uključujući fotonaponske elektrane. Prema strategiji HEP-a, cilj je doseći 700 MW instalirane snage iz sunčanih i vjetroelektrana. Ovo povećanje kapaciteta je dio šireg plana za povećanje energetske održivosti i smanjenje emisija stakleničkih plinova.

## 6. NADOMJESNE KRIVULJE OPTEREĆENJA I PROIZVODNJE

Nadomjesne krivulje opterećenja i proizvodnje prikazuju raspodjelu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana u odnosu na potrošnju električne energije kroz određeni period, koji je obično tijekom jednog dana. Ove krivulje su ključne kako bi se razumjela promjena potrošnje energije u određenom sustavu i kako ona utječe na stabilnost mreže. Nadomjesne karakteristike su ključne za učinkovito upravljanje i integraciju fotonaponskih elektrana na srednjenaponsku mrežu. Nadomjesna krivulja opterećenja predstavlja varijacije potrošnje električne energije korisnika mreže tijekom dana, dok nadomjesna krivulja proizvodnje prikazuje varijacije proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana tijekom dana, pri čemu se uzimaju u obzir faktori poput sunčevog zračenja, oblačnosti te godišnjeg doba.



Slika 6.1.: Nadomjesna dnevna krivulja opterećenja i ukupna dnevna proizvodnja snage iz fotonaponske elektrane

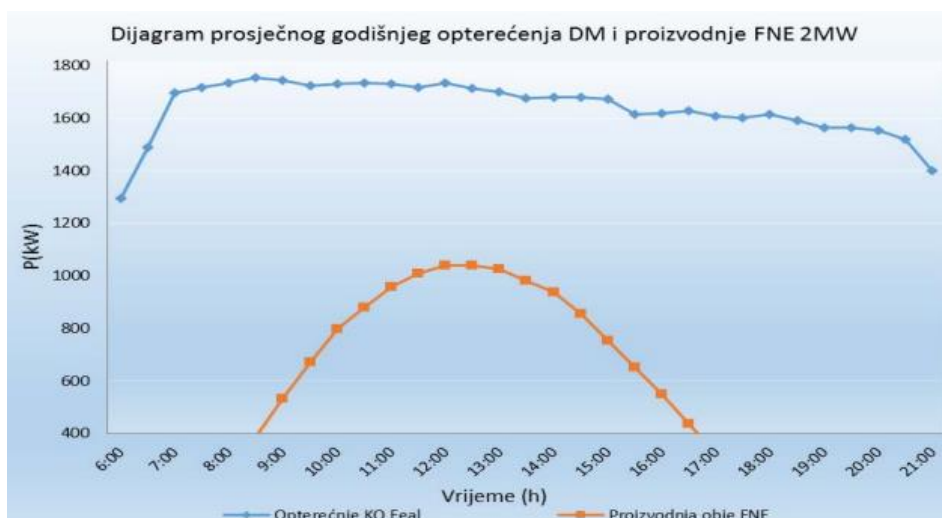
Kada se kupci priključe na električnu mrežu, oni stvaraju potražnju za električnom energijom. Korištenjem električne energije, kupci stvaraju stvarnu potrošnju električne energije. Potražnja za električnom energijom je nešto očekivano ili planirano, dok je potrošnja ono što je stvarno ostvareno. Opterećenje je obilježeno električnom snagom u nekom trenutku i energijom predanom u nekom razdoblju, a razdoblje promatranja promjena se uobičajeno svodi na razdoblje od 15 minuta ili 1 sat. Krivulja opterećenja je jedna od značajki potrošnje kupca. Prema literaturi [15] za sve kupce koji su priključeni na niskonaponsku mrežu, uključujući kućanstva i poduzetništva, a s priključnom snagom manjom od 30 kW, za opremu na OMM nije propisano brojilo s mjerenjem snage i pohranom mjernih podataka o krivulji potrošnje. Umjesto utvrđivanja krivulje



opterećenja odgovarajućim brojiлом, predviđaju se mogućnosti korištenja tzv. krivulje nadomještenih mjerenja tijekom opterećenja. Stoga je jedan od pristupa za prikazivanje dnevnog profila potrošnje kupaca, bez korištenja stvarnih mjernih podataka zapravo dodjeljivanje odgovarajućih nadomjesnih krivulja potrošnje ili opterećenja skupinama kupaca sličnih potrošačkih obrazaca. Karakteristična vrijednost u dnevnoj krivulji opterećenja, kojoj je jedinica mjere u prikazu kW ili MW, je vršna snaga. S obzirom na dinamiku potrošnje električne energije, o dnevnoj krivulji potrošnje možemo govoriti kada se snaga promatra tijekom dana, a tada je jedinica u kojoj se određuje dnevna krivulja potrošnje kWh/h ili MWh/h.

Uobičajeno je primjenjivati nadomjesne krivulje opterećenja za obračun energije uravnoteženja na razini godišnje potrošnje što je s gledišta kupaca kategorije kućanstvo nedvojbeno jedino ispravno, a oni prevladavaju među kupcima bez mjerenja snage. Glavna svrha primjene nadomjesnih krivulja opterećenja je utvrđivanje krivulja opterećenja svih kupaca tijekom obračunskog razdoblja na ekonomičan način. Nadomjesne krivulje opterećenja za karakteristične skupine kupaca (NKO-KSK) koriste se prema Pravilima primjene nadomjesnih krivulja opterećenja.

Korištenje nadomjesnih krivulja opterećenja pri priključenju fotonaponskih elektrana na srednjenaponsku mrežu omogućuje mrežnim operaterima da precizno predviđaju i upravljaju promjenama u tijeku opterećenja mreže. Kod priključenja fotonaponskih elektrana na srednjenaponsku mrežu, nadomjesne krivulje opterećenja se koriste za procjenu utjecaja nove proizvodnje na postojeće obrasce potrošnje. Primjena nadomjesnih krivulja opterećenja omogućuje precizno planiranje i upravljanje mrežom, a time i osiguravaju stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava. Korištenjem krivulja operateri mogu učinkovito integrirati obnovljive izvore energije i optimizirati rad mreže na ekonomski isplativ način.



Slika 6.2.: Nadomjesna krivulja opterećenja i proizvodnje fotonaponske elektrane [16]

NKO-KSK mora biti vjerodostojna za karakterističnu skupinu kupaca no moguća su veća ili manja odstupanja za pojedinog kupca.

Prema literaturi [15] operator distribucijskog sustava je nadležan i odgovoran za utvrđivanje KSK, oblikovanje normiranih NKO za KSK, razvrstavanje obračunskih mjernih mjesta kupca (OMM) bez mjerenja snage u KSK i pridjeljivanje normirane NKO, izradu pravila primjene NKO te praćenje vjerodostojnosti NKO svih KSK.

Pravilima primjene nadomjesnih krivulja opterećenja propisane su sljedeće KSK i njima pripadajuće NKO [17]:

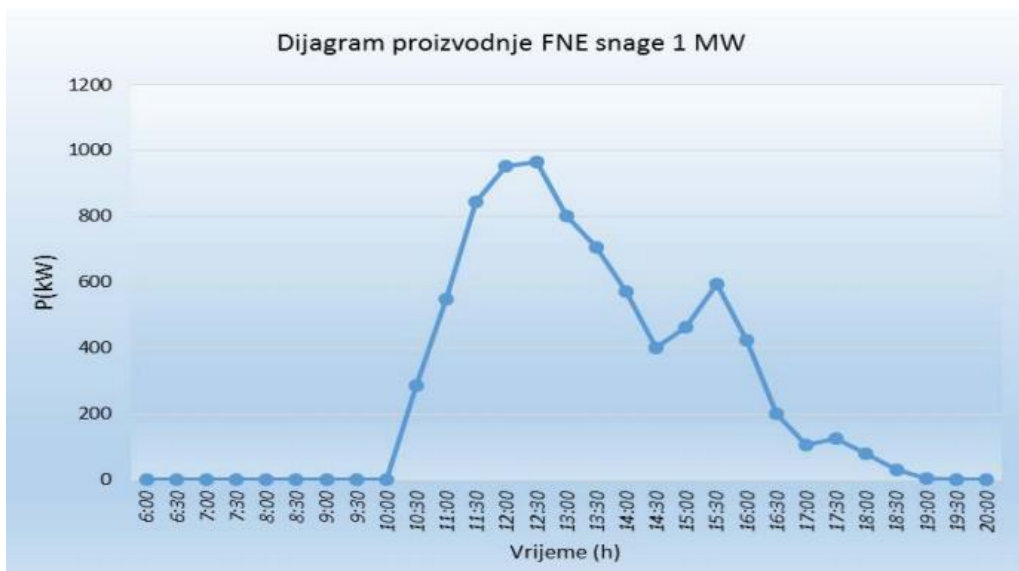
- Poduzetništvo P1 (prikjučna snaga  $\leq 13$  kW)
- Poduzetništvo P2 (priključna snaga  $> 13$  kW)
- Poduzetništvo – javna rasvjeta JR0
- Kućanstva K0

Prema Pravilima primjene nadomjesnih krivulja opterećenja [17], za svaku karakterističnu skupinu kupaca, za jednu kalendarsku godinu, NKO se normira na godišnju potrošnju obračunskog mjernog mjesta u iznosu od 1000 kWh.

Nadomjesne krivulje proizvodnje fotonaponskih elektrana se koriste za modeliranje i predviđanje proizvodnje električne energije u situacijama kada nije moguće kontinuirano mjeriti stvarnu proizvodnju. Te krivulje pomažu u optimizaciji elektroenergetskog sustava, posebno kada je riječ o integraciji obnovljivih izvora energije kao što su fotonaponske elektrane. Analiza nadomjesnih krivulja pomaže u procjeni učinkovitosti fotonaponskih sustava.

Nadomjesna krivulja proizvodnje predstavlja vremenski raspored stvarne i očekivane proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava. Za elektrane prikjučene na srednjenaponsku mrežu su posebno važne jer pomažu u održavanju stabilnosti mreže i osiguravanju kvalitete napajanja.

Tehnički parametri na kojima se temelji nadomjesna krivulja proizvodnje su sunčevo zračenje, tehničke karakteristike fotonaponskog sustava te specifičnosti srednjenaponske mreže. Intenzitet sunčevog zračenja varira ovisno o dobu dana, sezoni i vremenskim uvjetima, efikasnost fotonaponskih panela uz kut nagiba, orijentaciju i performanse pretvarača su ključni faktori tehničkih karakteristika koji utječu na proizvodnju električne energije, a stabilnost napona i kapacitet mreže su ključne specifičnosti srednjenaponske mreže.



Slika 6.3.: Nadomjesna krivulja proizvodnje fotonaponske elektrane [16]

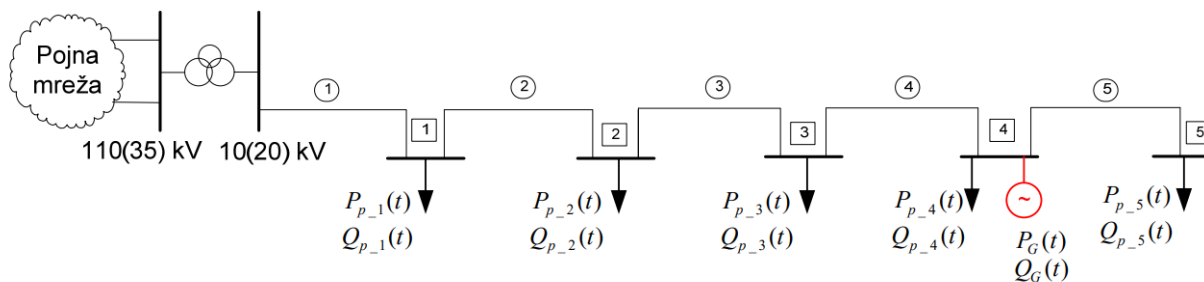
Nadomjesne krivulje proizvodnje su ključan alat za učinkovito upravljanje i optimizaciju fotonaponskih sustava, a njihovo korištenje omogućuje bolje planiranje, optimizaciju rada i održavanje stabilnosti mreže. Uz razvoj tehnologije, preciznost i korisnost ovih krivulja će biti veća.

## 7. UTJECAJ FOTONAPONSKIH ELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

Prema izvještaju IEA navodi se kako obnovljivi izvori energije čine oko 32 % globalne proizvodnje električne energije, gdje se uključuje hidroenergija, vjetroenergija, solarna energija, biomasa i geotermalna energija, od čega oko 10 % proizvedene električne energije potječe konkretno iz fotonaponskih elektrana [18]. Fotonaponske elektrane doprinose oko 3 % ukupnoj globalnoj proizvodnji električne energije. Prema IRENA-i, Republika Hrvatska je 2023. godine imala instalirani kapacitet od 3980 MW iz obnovljivih izvora energije, od čega je oko 460 MW bilo iz fotonaponskih elektrana [19]. Instalirana snaga fotonaponskih sustava udvostručuje se u svijetu svake dvije godine, uz prosječni godišnji porast od 48 % [8].

Priključenje fotonaponske elektrane na sredjenaponsku mrežu može imati značajan utjecaj na pogonske prilike u mreži, a ti utjecaji uključuju promjene u naponskim prilikama i gubicima snage, promjene u tokovima snaga, utjecaj na gubitke radne energije u mreži, utjecaj na raspoloživost opskrbe električnom energijom, utjecaj na kratkospojne prilike i zaštitu te utjecaj na emisiju viših harmonika [8].

Primjer distribucijske mreže prikazan je na slici 7.1.

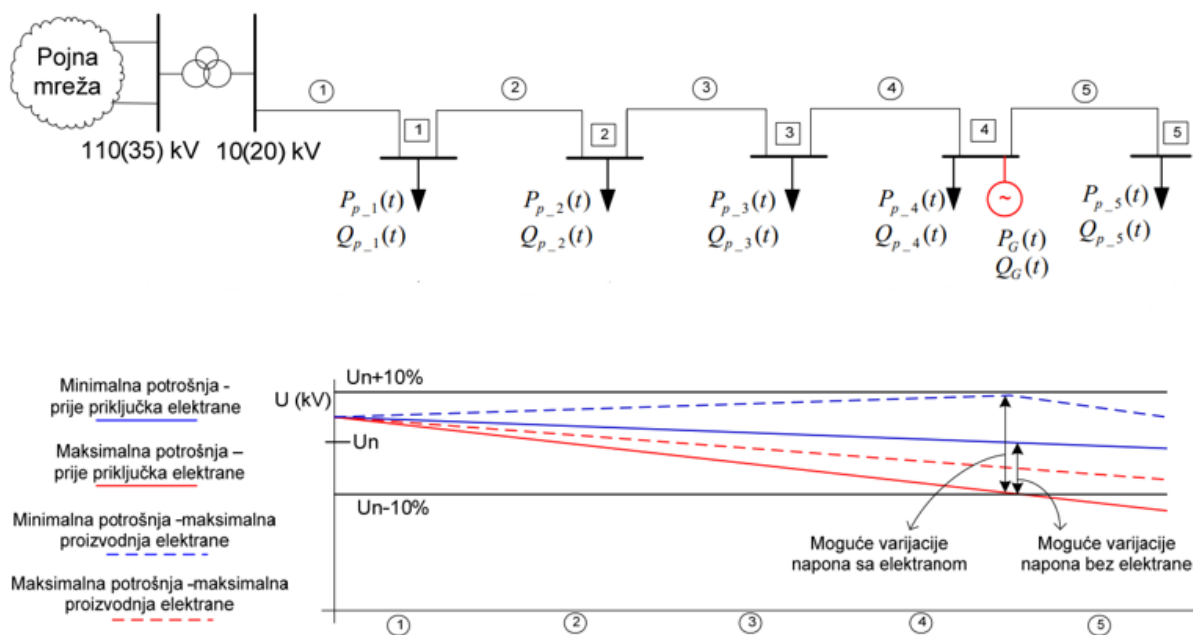


Slika 7.1.: Distribucijska mreža [8]

### 7.1. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na naponske prilike u mreži

Prema literaturi [8] priključenje fotonaponske elektrane značajno utječe na naponske prilike u mreži. U pasivnoj distribucijskoj mreži, prije priključenja elektrane, tokovi snaga ovise isključivo o potrošnji i gubicima, što u konačnici rezultira smanjenjem snaga i porastom padova napona od pojne točke prema kraju izvoda. Kao posljedica priključenja elektrane mreža postaje

aktivna jer proizvedena radna i jalova snaga teku prema pojnoj točki, a to mijenja tokove snage i strujno opterećenje, time dolazi do porasta napona, posebno u blizini priključne točke elektrane, jer tokovi radne snage teku u suprotnom smjeru. Porast napona može biti od značaja, osobito na slabo opterećenim dugim zračnim vodovima. Uz porast napona do maksimalnog opterećenja bez proizvodnje električne energije iz elektrane, postoji i situacija pada napona koji odgovara minimalnom opterećenju uz nazivnu snagu elektrane (prikazano na slici 7.2.).



Slika 7.2.: Naponske prilike u granama aktivne distribucijske mreže [8]

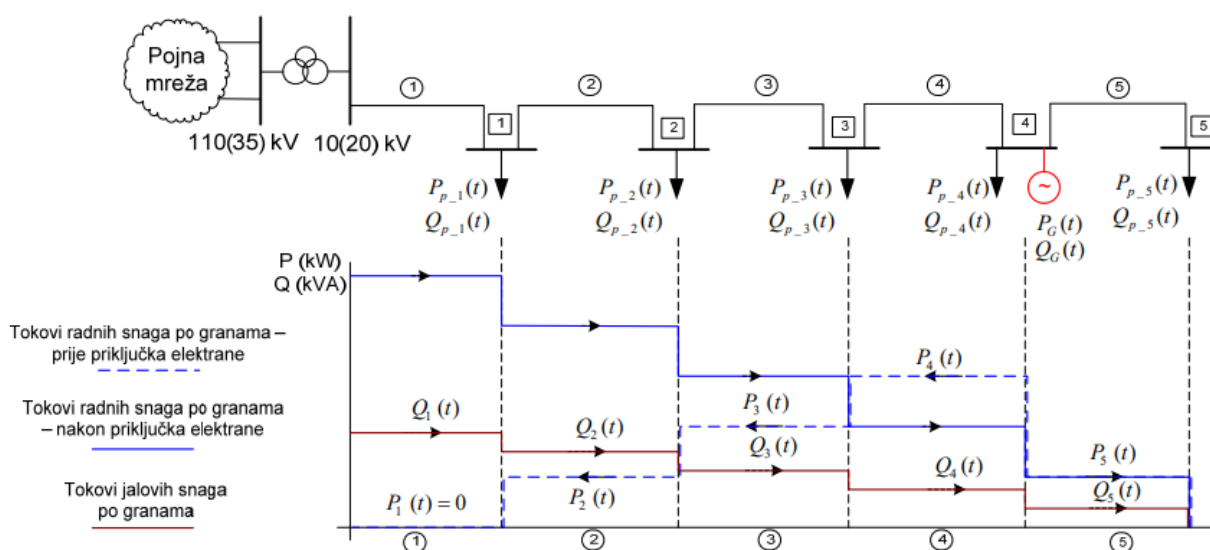
Proračunom tokova snaga nužno je provjeriti promjene napona za slučaj kada elektrane rade punim kapacitetom pri minimalnim ili maksimalnim dnevnim opterećenjem mreže. Kritična situacija javlja se kada je distribucijska mreža minimalno opterećena, a elektrana radi punom snagom. U tom slučaju sva energija proizvedena iz fotonaponske elektrane šalje se u trafostanicu na koju je elektrana priključena.

Zaključno, varijabilnost proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava izaziva fluktuacije napona koje mogu, naravno neželjeno destabilizirati mrežu. Visoka proizvodnja tijekom sunčanih dana može uzrokovati porast napona, dok smanjena proizvodnja zbog lošijeg vremena može dovesti do pada napona. Razina harmonika u mreži zbog upotrebe invertera dodatno destabiliziraju kvalitetu napona.

## 7.2. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na gubitke snage u mreži

Priključenje fotonaponske elektrane na mrežu može značajno utjecati na gubitke snage. U distribucijskoj mreži bez elektrane, tokovi snaga su rezultat potrošnje i gubitaka, a padovi napona se povećavaju s udaljenošću od pojne točke i ovise o razini opterećenja.

Priključenjem fotonaponske elektrane na neki čvor u mreži, taj dio mreže postaje aktivan, elektrana proizvodi radnu i jalovu snagu, koja ako nema potrošnje, ima smjer prema pojnoj točki. Superpozicijom tokova snaga u granama (potrošnja) i tokova snaga proizvodnje dolazi do značajnih promjena tokova snage do mjesta priključka elektrane, a bez promjena iza mjesta priključka. Navedeno je prikazano slikom 7.3.. Time se povećava strujno opterećenje mreže u područjima bližim priključku elektrane, a ono može uzrokovati dodatne gubitke snage u mreži, također u područjima bliže elektrani [8].



Slika 7.3.: Tokovi snaga u granama aktivne distribucijske mreže [8]

Priključenje fotonaponske elektrane mijenja tokove snaga u mreži i može dovesti do povećanja gubitaka u nekim dijelovima mreže, no s druge strane priključenje elektrane može rezultirati i smanjenjem ukupnih gubitaka u mreži zbog lokalne proizvodnje energije čime se smanjuje potreba za prijenosom energije na velike daljine. Ako proizvodnja elektrane odgovara razini potrošnje na određenom dijelu mreže, tokovi radne snage se smanjuju, a to dovodi do smanjenja gubitaka snage. No, ako je proizvodnja radne snage elektrane veća od potrošnje na tom području mreže, može doći do obrnutog efekta, odnosno povećanja ukupnih tokova radne snage kroz mrežu.

### **7.3. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na kratkospojne prilike u mreži**

Fotonaponske elektrane povezane su na mrežu preko pretvarača koji transformiraju istosmjernu struju solarnih panela u izmjeničnu struju koja se prenosi u mrežu. Ti pretvarači su elektronički uređaji koji imaju ugrađene zaštitne mehanizme koji ograničavaju količinu struje koju mogu isporučiti. Zbog toga, fotonaponske elektrane ne mogu značajno povećati snagu kratkog spoja u mreži, a u slučaju kratkog spoja, pretvarač će ograničiti struju na svoje maksimalne nominalne vrijednosti i neće dopustiti prolazak većih struja. To znači da tijekom kratkog spoja fotonaponska elektrana ne doprinosi povećanju struje iznad normalno predviđenih vrijednosti [8]. U stvarnosti je istina da fotonaponske elektrane povećavaju struju kratkog spoja, ali malo. One su za vrijeme trajanja kratkog spoja strujni izvori koji šalju cca 120 % nazivne struje na mjesto kvara. Povećanje kratkospojne snage može zahtijevati dodatne zaštitne mjere kako bi se zaštitila oprema i osigurala sigurnost mreže.

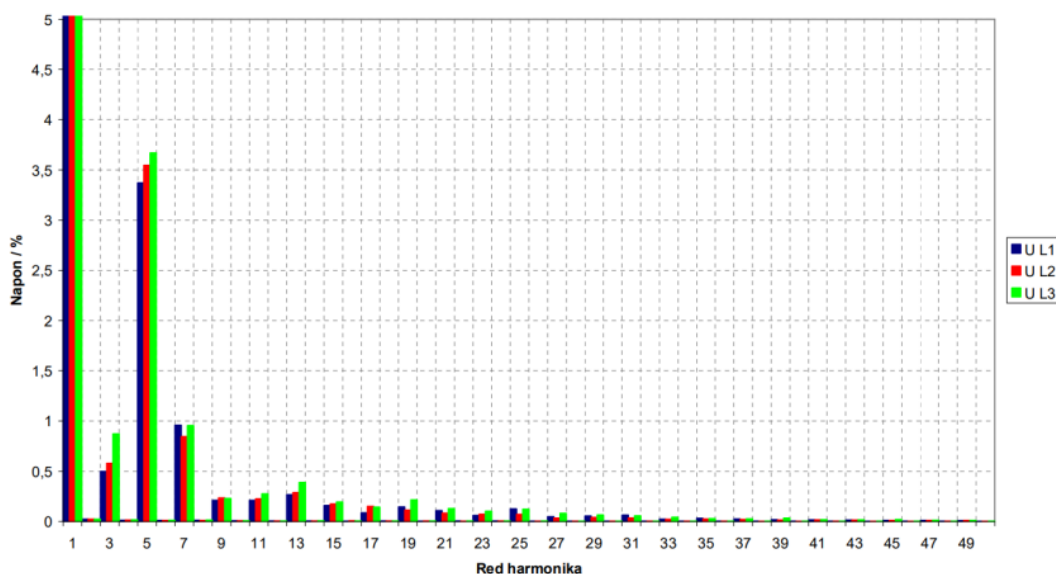
Prilikom spajanja fotonaponske elektrane na mrežu, na mjestu i u okolici priključenja elektrane se povećava razina kratkospojne struje zbog dodatnog izvora energije koji povećava ukupnu snagu tijekom kratkog spoja. Problem bi mogao nastati kod zaštitnih uređaja koji možda neće biti optimizirani za nove uvjete s višim razinama struja kratkog spoja. Stoga je potrebna prilagodba zaštitnih releja i ostalih zaštitnih uređaja kako bi se osigurala pravodobna i precizna reakcija na kratkospojne prilike u mreži.

Zaštita distribucijske mreže od utjecaja kvarova unutar postrojenja fotonaponskih elektrana realizira se odgovarajućim podešenjem zaštite koja djeluje na prekidač za odvajanje u spojnom polju. Preko istog prekidača se vrši i odvajanje elektrane od mreže za potrebe osiguranja beznaponskog stanja na izvodu. Za zaštitu same elektrane i priključnog voda najčešće je dovoljno podesiti postojeću nadstrujnu zaštitu, kojom se štiti pripadni dio izvoda [8].

### **7.4. Utjecaj priključenja fotonaponske elektrane na emisije viših harmonika u mreži**

Fotonaponske elektrane su povezane s distribucijskom mrežom putem pretvarača u kojemu se, prilikom procesa pretvaranja istosmjerne struje proizvedene iz fotonaponskih panela u izmjeničnu struju koja se isporučuje u mrežu, mogu generirati harmonička izobličenja struje ili napona. Harmonička izobličenja zapravo generiraju poluvodički elementi unutar pretvarača, a to može značajno utjecati na kvalitetu električne energije. Ispravljači koji generiraju neželjene više harmonike, koji obično imaju negativan utjecaj na elektroenergetski sustav i kvalitetu električne energije, su također sami osjetljivi na njih i mogu se neispravno ponašati pri prekomjernom

izlaganju višim harmonicima. Stoga je važno provjeriti razinu emisije viših harmonika i usporediti ih s dozvoljenim granicama koje obično definiraju mrežna pravila.



Slika 7.4.: Harmonijska analiza napona na mjestu priključka elektrane na mrežu [20]

Prema slici 7.4. uočljivo je kako su izraženi 3., 5. i 7. harmonik, pri čemu je 5. harmonik dominantan, a ostali harmonici nemaju značajan utjecaj na naponski profil. Mnogi električni uređaji, a među njima i pretvarači rade na nelinearnim principima, a to znači da ne generiraju samo osnovnu frekvenciju, već i višestruke osnovne frekvencije (harmonike). Zbog navedene nelinearnosti, prvi ili osnovni harmonik je prisutan kao osnovna frekvencija, dok ostali neparni dominantni harmonici nastaju kao posljedica nelinearnih karakteristika tih uređaja. Ovaj naponski profil je specifičan za analizirani primjer fotonaponskog priključka i ne može se smatrati kao karakterističan primjer za sve fotonaponske elektrane.



## **8. UTJECAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA PRIMJERU STVARNE SREDNJENAPONSKE MREŽE – NEPLAN**

Integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetske mreže postaje sve važnija u kontekstu globalne tranzicije prema održivim energetske sustavima. Fotonaponske elektrane, koje koriste sunčevu energiju za proizvodnju električne energije, igraju ključnu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova i ovisnosti o fosilnim gorivima. Međutim, njihov utjecaj na distribucijske mreže zahtjeva detaljnu analizu, posebno u srednjenaponskim mrežama gdje su prisutni različiti potrošači i varijabilni uvjeti rada.

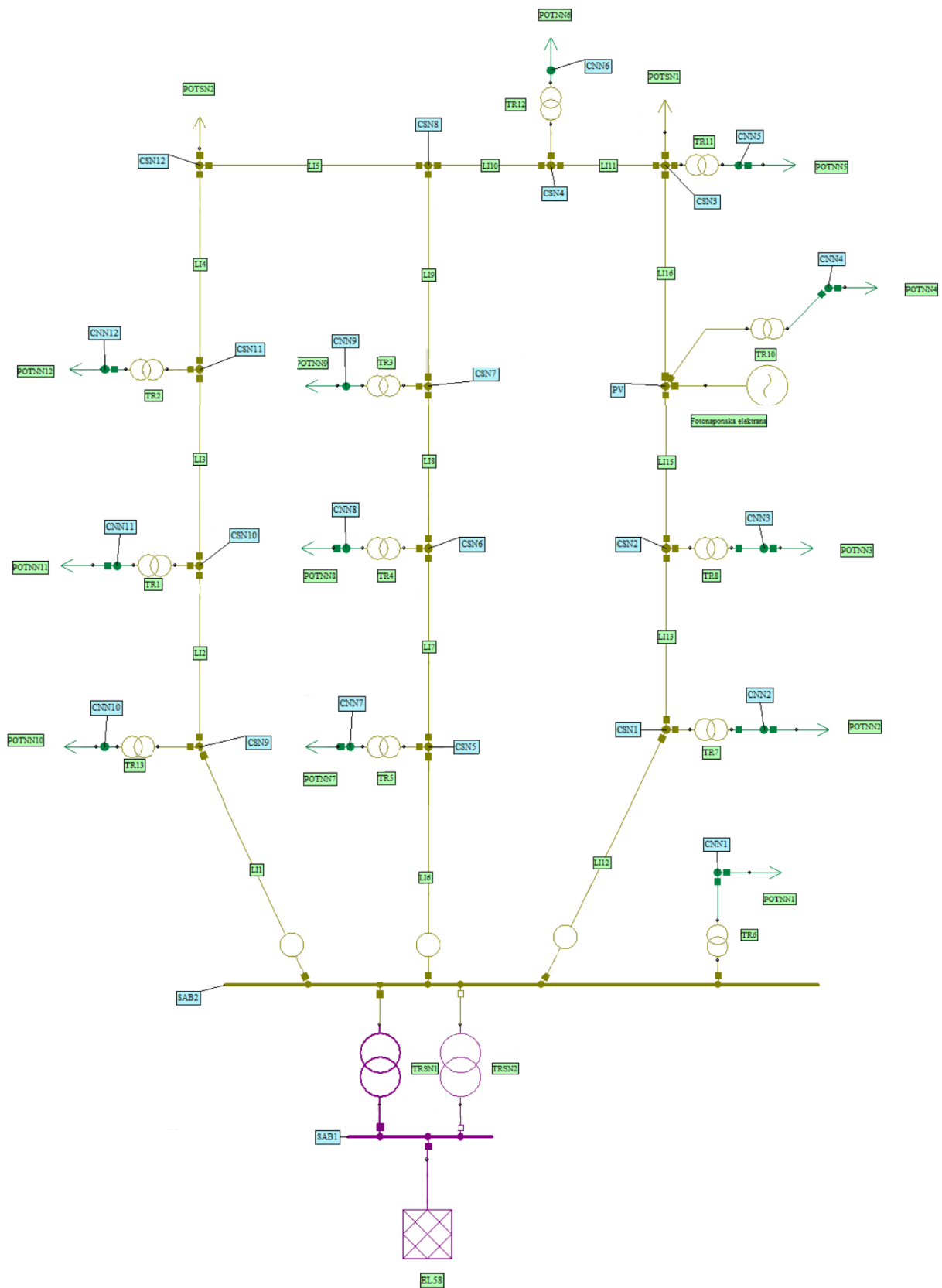
U ovom poglavlju rada analizirana je realna srednjenaponska mreža kroz dva primjera, sa priključenom fotonaponskom elektranom i bez priključene fotonaponske elektrane. Primjenom nadomjesnih krivulja opterećenja, koje predstavljaju tipična i dnevna opterećenja potrošača, te krivulje proizvodnje fotonaponske elektrane, istražiti će se kako prisutnost fotonaponske elektrane utječe na ključne parametre u mreži.

Analiza će biti provedena za karakterističan dan u godini, kada se mogu očekivati reprezentativni uvjeti za rad mreže. Realizacija je izvršena kroz softverski paket NEPLAN, koji omogućuje detaljnu simulaciju i analizu rada elektroenergetskih sustava. Ovaj alat pruža mogućnost modeliranja dinamičkih uvjeta u mreži, što je ključno za precizno razumijevanje utjecaja fotonaponske elektrane na rad srednjenaponske mreže.

Srednjenaponska mreža obuhvaća više različitih tipova potrošača na srednjem i niskom naponu. Fotonaponska elektrana instalirane snage 5 MW priključena je na jedan od čvorova srednjenaponske mreže. U mrežu su uvrštene krivulje opterećenja za različite potrošače kao i krivulja proizvodnje fotonaponske elektrane. Analiza mreže uključuje rad pod različitim režimima opterećenja tokom dana, s obzirom na promjene u potrošnji električne energije od strane potrošača i u proizvodnji električne energije fotonaponske elektrane.

Očekuje se da će rezultati ovog rada pružiti kvalitetni uvid u rad mreže sa priključenim obnovljivim izvorima energije.

Na slici 8.1. prikazana je srednjenaponska mreža sa priključenom fotonaponskom elektranom na čvor PV.



Slika 8.1.: Priključenje fotonaponske elektrane na sredjenaponsku mrežu

## 8.1. Ulazne vrijednosti simulacije

Za uspješnu analizu i simulaciju elektroenergetskog sustava u programu NEPLAN, ključno je precizno definiranje ulaznih podataka koji predstavljaju fizičke i tehničke karakteristike mreže. Ovi podaci omogućuju modeliranje stvarnih uvjeta rada srednjenaponske mreže i precizno predviđanje reakcija sustava na različite operativne scenarije.

Dužine i impedancije vodova predstavljaju osnovne parametre svakog elektroenergetskog sustava. Dužine vodova definiraju udaljenosti između pojedinih čvorova ili distribucijskih točaka unutar mreže, dok impedancije vodova odražavaju otpor i reaktanciju koji utječu na prijenos električne energije kroz mrežu. Ovi podaci ključni su za proračun tokova snaga, naponskih prilika i gubitaka snage unutar mreže, a vidljivi su u tablici 8.1.

Tablica 8.1.: Ulazne vrijednosti vodova

Element	Duljina [km]	Otpor [Ohm/km]	Reaktancija [Ohm/km]	Ir max [A]
LI1	1,5	0,2222	0,2085	150
LI2	2	0,5252	0,4927	100
LI3	0,8	0,2707	0,2539	100
LI4	3,7	0,3394	0,3184	100
LI5	1	0,808	0,758	100
LI6	1	0,351	0,2346	100
LI7	2,6	0,3757	0,3525	100
LI8	0,8	0,4095	0,2737	100
LI9	1	1,414	1,327	100
LI10	2,2	0,808	0,758	150
LI11	2,7	1,212	1,137	150
LI12	1	0,0727	0,0358	150
LI13	1	0,8484	0,7959	150
LI15	1,4	1,616	1,516	150
LI16	1,5	0,6464	0,6064	150

Instalirana (vršna) snaga tereta po čvorovima u MW predstavlja maksimalnu potrošnju električne energije na određenoj točki mreže. Ovaj podatak je presudan za analizu opterećenja mreže, jer omogućuje simulaciju najzahtjevnijih uvjeta rada, te identifikaciju kritičnih točaka unutar sustava. Precizna distribucija tereta po čvorovima također pomaže u optimizaciji upravljanja mrežom i osiguravanju stabilne opskrbe električnom energijom. Ulazne vrijednosti tereta vidljivi su u tablici 8.2.

Tablica 8.2.: Ulazne vrijednosti potrošača

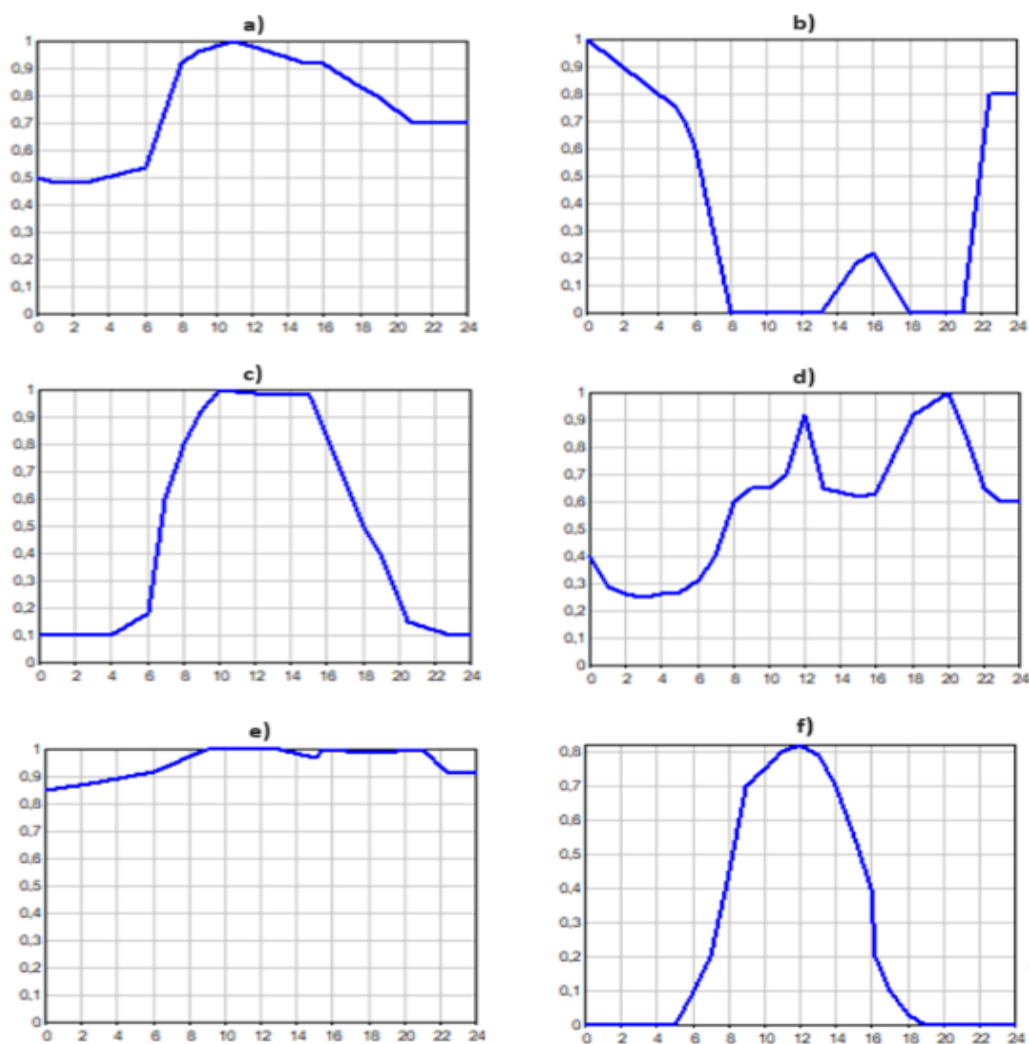
Element	Instalirana snaga [MW]	Tip
POTNN1	1,49	Komercijalni
POTNN2	0,1	Grijanje
POTNN3	1,2	Industrija
POTNN4	0,4	Kućanstva
POTNN5	0,13	Industrija
POTNN6	0,65	Kućanstva
POTNN7	0,4	Industrija
POTNN8	0,27	Industrija
POTNN9	0,36	Industrija
POTNN10	0,8	Komercijalni
POTNN11	0,14	Grijanje
POTNN12	0,15	Kućanstva
POTSN1	2	Velika industrija
POTSN2	3	Velika industrija

Upravo pravilna definicija ovih ulaznih parametara omogućuje realističnu simulaciju i analizu elektroenergetskog sustava, što je ključno za donošenje informiranih odluka u vezi s planiranjem, proširenjem i optimizacijom mreže.

Na slici 8.2. prikazane su krivulje opterećenja različitih potrošača koji su priključeni na model srednjenaponske mreže kao što su industrija, grijanje, komercijalna upotreba, kućanstva, velike industrije i krivulja proizvodnje fotonaponske elektrane. Krivulje opterećenja su uvrštene u simulaciju kako bi rezultati bili što točniji, budući da time imamo realnu situaciju potrošnje u mreži kroz vremenski interval od 24 sata.

## 8.2. Krivulje opterećenja i proizvodnje

Krivulje opterećenja i proizvodnje ključni su alati za analizu rada elektroenergetskih mreža, posebno u kontekstu integracije obnovljivih izvora energije. Krivulje opterećenja predstavljaju promjene u potrošnji električne energije tijekom dana, omogućujući detaljan uvid u dinamiku potrošnje različitih korisnika unutar mreže. S druge strane, krivulje proizvodnje fotonaponskih elektrana prikazuju varijacije u proizvodnji električne energije, koja ovisi o sunčevom zračenju i vremenskim uvjetima. Kombiniranjem ovih krivulja moguće je simulirati stvarne uvjete rada mreže, što je ključno za optimizaciju i održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Na slici 8.2. prikazane su krivulje opterećenja različitih potrošača koji su priključeni na model srednjenaponske mreže kao što su industrija, grijanje, komercijalna upotreba, kućanstva, velike industrije i krivulja proizvodnje fotonaponske elektrane.



Slika 8.2.: Krivulje opterećenja: a) industrija, b) grijanje, c) komercijalna upotreba, d) kućanstva, e) velike industrije, i krivulja proizvodnje f) fotonaponske elektrane – ulazne vrijednosti

Krivulje opterećenja potrošača u modelu srednjenaponske mreže značajno se razlikuju ovisno o vrsti potrošača i njihovim specifičnim zahtjevima za električnom energijom. Svaka vrsta potrošača ima jedinstven profil potrošnje, što utječe na ukupno opterećenje mreže tijekom dana.

Industrijski potrošači obično imaju stabilniji i kontinuiraniji profil opterećenja tijekom radnog dana, s vrhuncem potrošnje u radnim satima od jutra do kasnog poslijepodneva. Ovi potrošači često koriste veliku količinu električne energije za pogon strojeva, rasvjetu, grijanje i hlađenje u industrijskim pogonima. U radu industrijski potrošači prema shemi predstavljaju potrošače 3, 5, 7, 8 i 9.

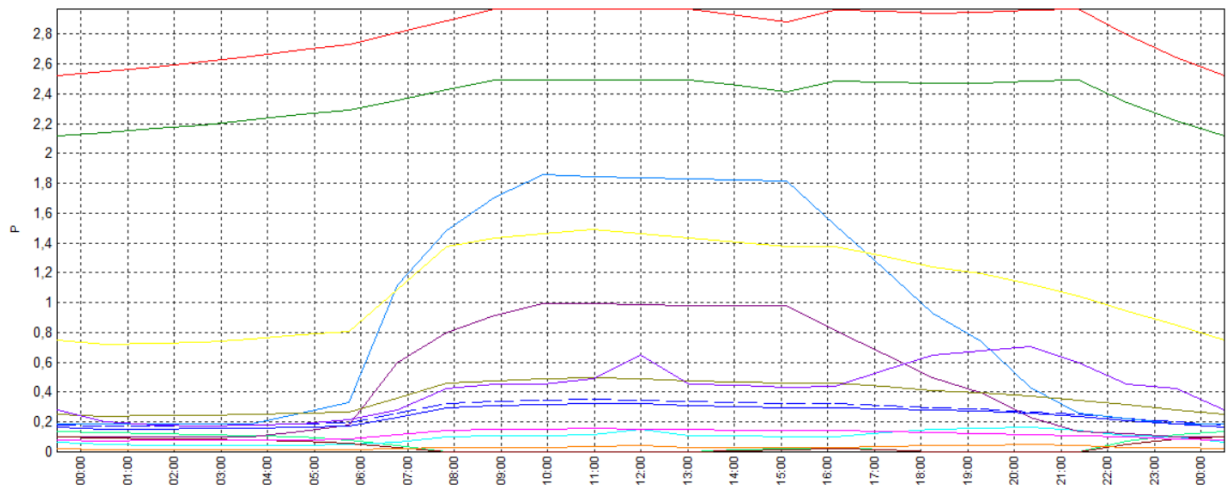
Potrošači koji koriste električnu energiju za grijanje pokazuju sezonsku i dnevnu varijabilnost u opterećenju. Krivulja opterećenja za grijanje ima tendenciju rasta u zimskim mjesecima i može pokazivati vrhunce rano ujutro i navečer, kada su temperature najniže i kada korisnici uključuju sustave grijanja. U radu prema shemi predstavljaju mjesta potrošnje 2 i 11.

Komercijalni potrošači, poput trgovina, ureda i malih poduzeća, imaju izražen profil opterećenja tijekom radnog vremena, obično od jutra do kasnog poslijepodneva ili ranih večernjih sati. Njihova potrošnja energije povezana je s rasvjetom, klimatizacijom, uredskom opremom i drugim uređajima potrebnim za svakodnevno poslovanje. Krivulja opterećenja za komercijalnu upotrebu može pokazivati padove tijekom vikenda ili praznika kada su poslovni prostori manje aktivni. U radu komercijalni potrošači prema shemi predstavljaju mjesta potrošnje 1 i 10.

Krivulje opterećenja za kućanstva pokazuju značajne dnevne varijacije, s vrhuncima potrošnje ujutro, kada se stanovnici pripremaju za dan, i navečer, kada se vraćaju kući. Ova vrsta potrošača koristi električnu energiju za rasvjetu, kućanske aparate, klimatizaciju, kuhanje i zabavu. Potrošnja u kućanstvima često raste tijekom hladnijih mjeseci zbog grijanja i tijekom ljetnih mjeseci zbog hlađenja. U radu kućanstva prema shemi predstavljaju mjesta potrošnje 4, 6 i 12.

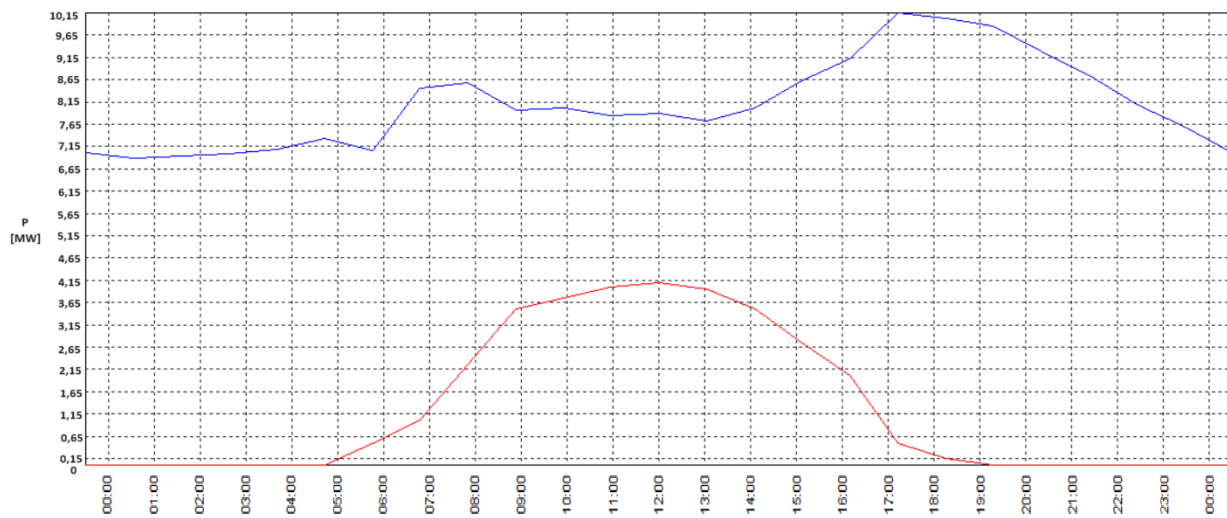
Velike industrije, poput teške proizvodnje, rafinerija ili velikih pogona, imaju izuzetno visoku potrošnju električne energije s konstantnim i visokim opterećenjem tijekom cijelog radnog dana, pa čak i noću, ovisno o smjenama i kontinuiranim procesima. Njihove krivulje opterećenja mogu pokazivati malo varijacija, s visokim osnovnim opterećenjem koje neznatno varira tijekom radnog ciklusa. U radu su velike industrije priključene na čvorove srednjega napona, prema shemi na mjesta potrošnje 1 i 2.

Na slici 8.3. vidljive su krivulje opterećenja svih potrošača, a krivulja proizvodnje fotonaponske elektrane vidljiva je na slici 8.4. prema simulaciji kroz vremenski interval od 24 sata.



Slika 8.3.: Krivulje opterećenja za sve potrošače za karakterističan dan u godini

Krivulja proizvodnje fotonaponske elektrane pokazuje varijacije u proizvodnji električne energije ovisno o intenzitetu sunčevog zračenja. Proizvodnja započinje ujutro kada sunce izlazi, dostiže vrhunac sredinom dana kada je sunčevo zračenje najjače, i postepeno opada prema večeri, kada sunce zalazi. Ova krivulja značajno varira ovisno o vremenskim uvjetima, godišnjem dobu i geografskom položaju elektrane.



Slika 8.4.: Krivulje proizvodnje fotonaponske elektrane i aktivne mreže za karakterističan dan

### 8.3. Analiza tokova snaga

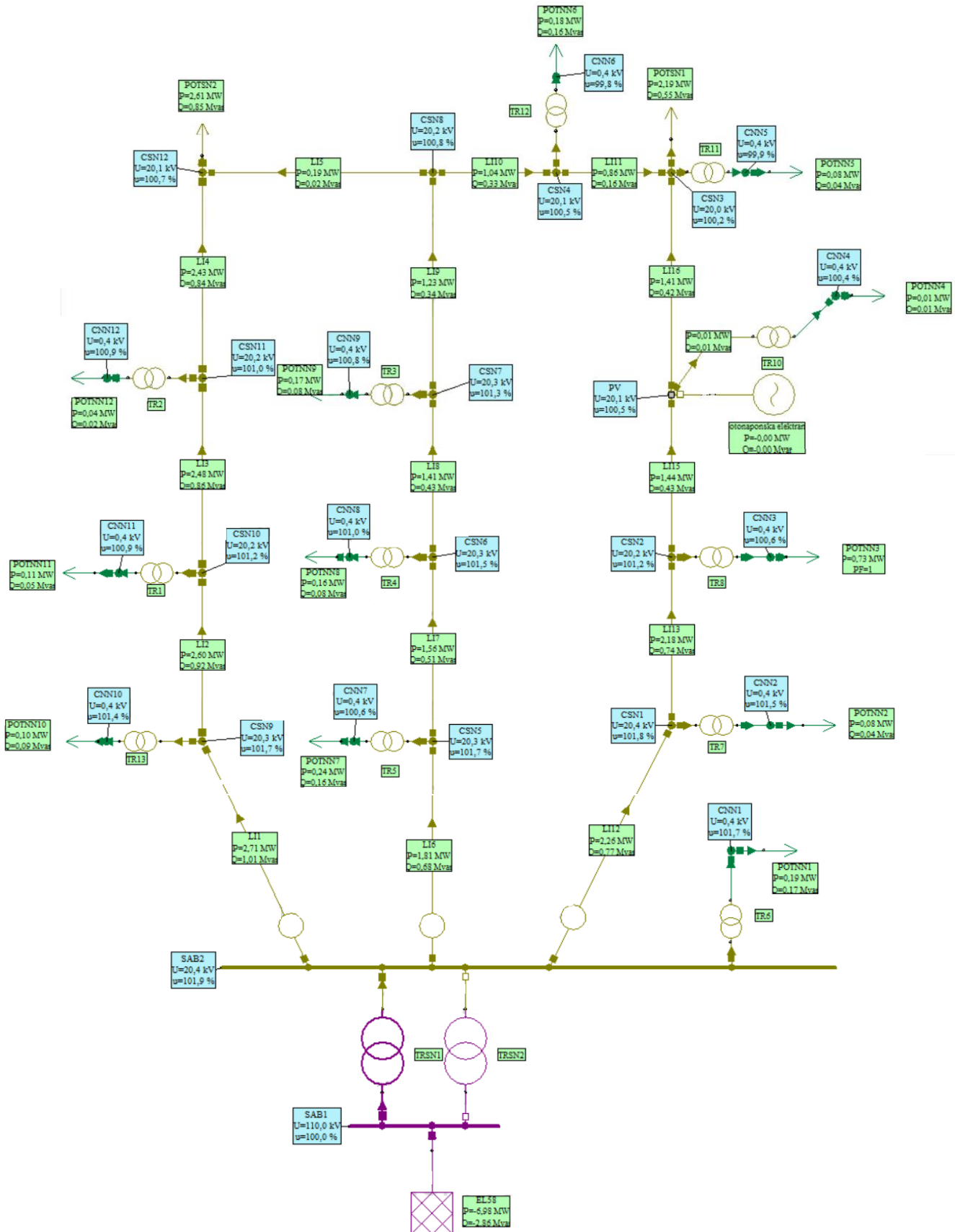
Usporedba tokova snaga u elektroenergetskoj mreži ključna je za razumijevanje utjecaja različitih čimbenika na stabilnost i učinkovitost distribucijskog sustava. U ovom radu analizirat će se tokovi snaga u srednjenaponskoj mreži u pet različitih vremenskih intervala, u 3, 9, 12, 15 i 20 sati kako bi se prikazale promjene u raspodjeli snage tijekom dana. Usporedit će se stanja mreže s priključenom fotonaponskom elektranom i bez nje, što će omogućiti detaljan uvid u utjecaj proizvodnje obnovljive energije na strujnu opterećenost elemenata mreže, naponski profil čvorova i ukupnu stabilnost sustava. Ovakva analiza pruža važne informacije za optimizaciju rada mreže i osiguravanje pouzdane opskrbe električnom energijom, osobito u kontekstu sve veće integracije obnovljivih izvora energije.

Ovim pristupom možemo primijetiti različite uvjete opterećenja. U 3 sata ujutro, kada je opterećenje u mreži minimalno zbog niske aktivnosti potrošača, analiza nam omogućuje uvid u stanje mreže s niskom potrošnjom i bez utjecaja fotonaponske elektrane. U 9 sati moguće je analizirati kako fotonaponska elektrana djeluje tijekom jutarnjeg porasta opterećenja, kada su mnogi potrošači aktivni. U 12 sati, kada je proizvodnja fotonaponske elektrane na vrhuncu, vidljiv je maksimalni utjecaj na mrežu. U 15 sati, nakon vrhunca dnevne proizvodnje fotonaponske elektrane, može se pratiti stabilnost mreže dok proizvodnja još uvijek ostaje značajna, ali s početkom pada. Konačno, analiza u 20 sati prikazuje stanje kada proizvodnja fotonaponske elektrane pada, ali je opterećenje kućanstava visoko, što stvara dodatni pritisak na mrežu.

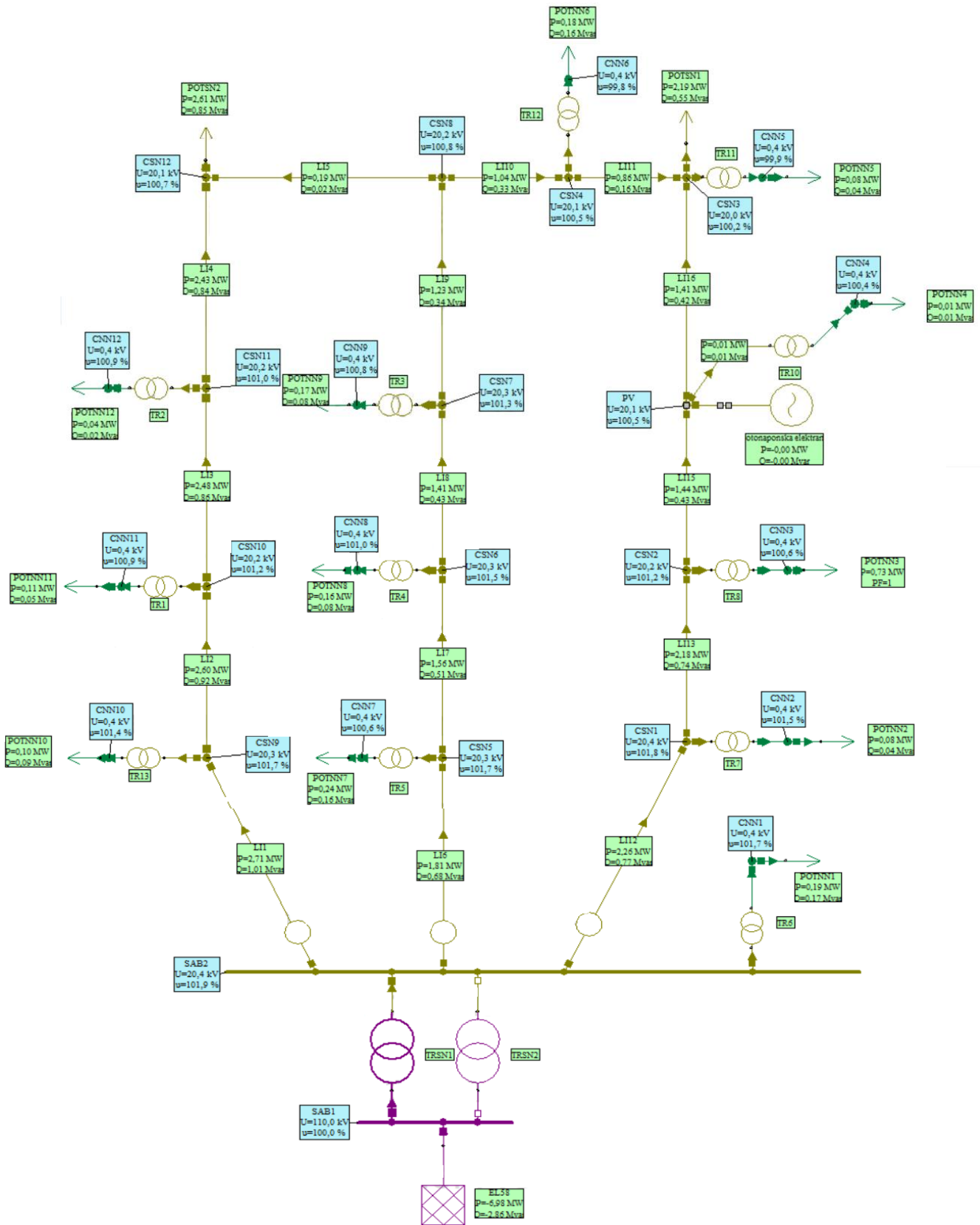
Ovaj pristup omogućava prikaz dinamičkog ponašanja mreže tijekom različitih dijelova dana, što je ključno za razumijevanje kako integracija fotonaponske elektrane utječe na stabilnost i učinkovitost mreže u realnim uvjetima.

Analiziranje pet različitih vremenskih intervala omogućuje temeljitu analizu bez preopterećenja podacima, što čini rezultate preglednijima i lakšima za interpretaciju.





Slika 8.5.: Tokovi snaga za slučaj u 3 sata bez priključene elektrane



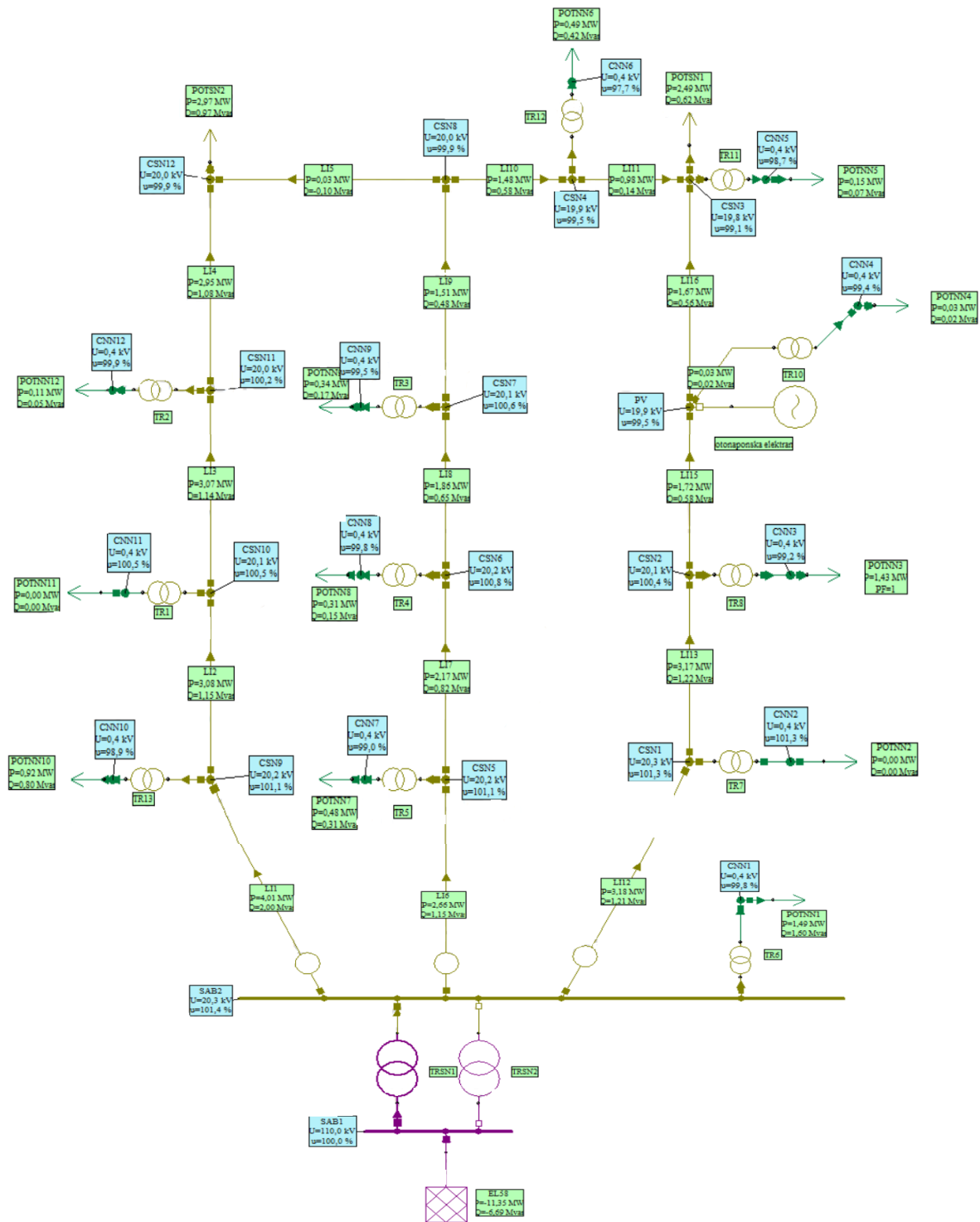
Slika 8.6.: Tokovi snaga za slučaj u 3 sata sa priključenom elektranom

U ovom scenariju analizirano je stanje tokova snaga u sredjenaponskoj mreži u 3 sata ujutro, uspoređujući situacije s priključenom fotonaponskom elektranom od 5 MW i bez nje. Ovaj vremenski interval odabran je jer predstavlja period minimalne potrošnje u mreži, kada su aktivnosti potrošača svedene na najnižu razinu, a proizvodnja fotonaponske elektrane je zanemariva zbog noćnog razdoblja.

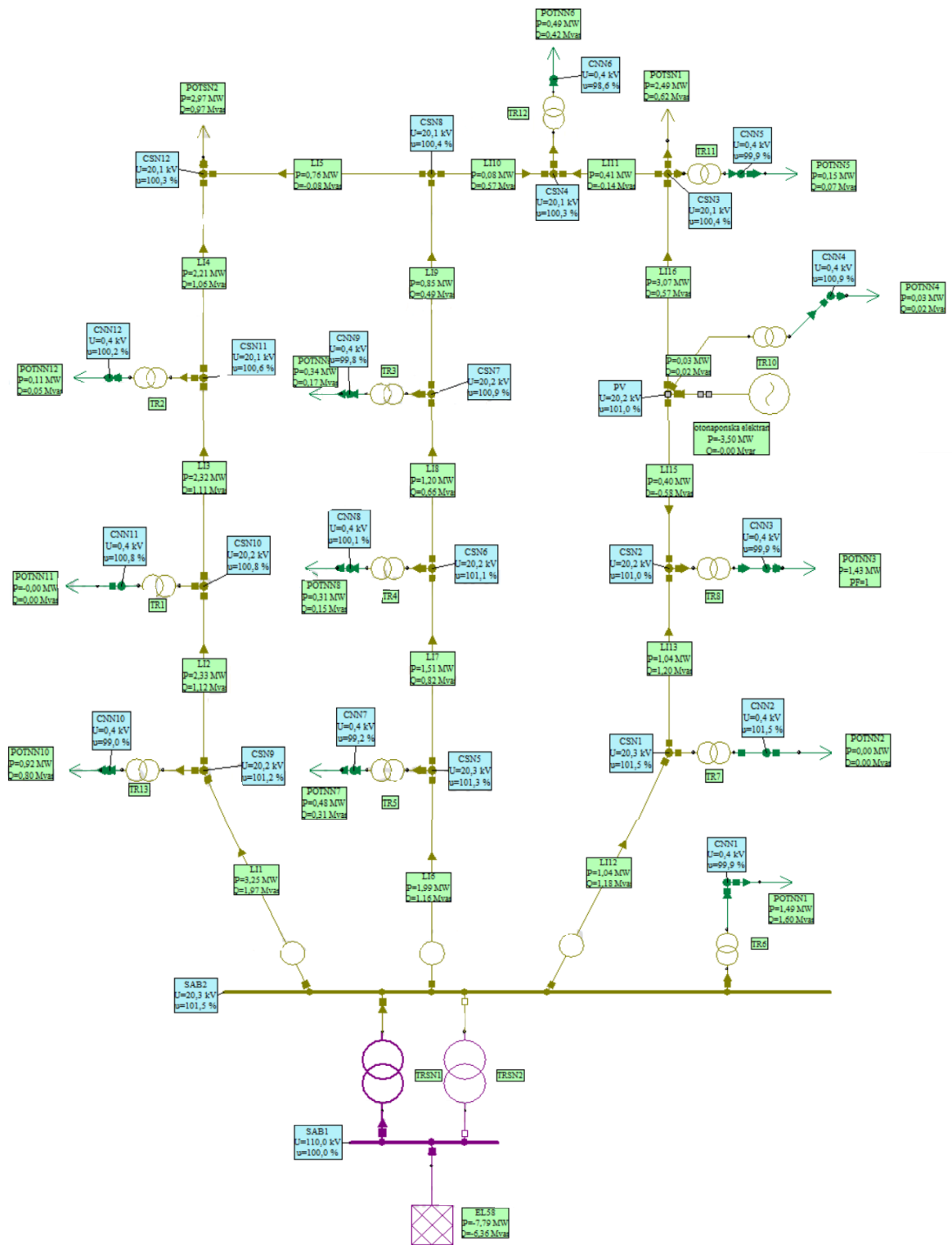
U 3 sata ujutro, potrošnja u mreži je značajno smanjena jer većina poslovnih objekata i industrijskih pogona ne radi, a kućanstva su u periodu minimalne aktivnosti. Bez prisutnosti fotonaponske elektrane, mreža se u potpunosti oslanja na druge izvore električne energije, pri čemu tokovi snaga ostaju relativno stabilni i usmjereni od glavnih izvora prema preostalim aktivnim potrošačima. Naponski profil čvorova u mreži u ovom slučaju pokazuje blage padove, ali bez značajnih oscilacija s obzirom na nisku razinu opterećenja. Struje u mreži su također minimalne, a gubici energije su relativno niski zbog smanjene potrošnje.

Kada se fotonaponska elektrana priključi na mrežu u 3 sata ujutro, njezin doprinos je minimalan ili nepostojeći, s obzirom na to da nema proizvodnje zbog noći. U ovom scenariju, fotonaponska elektrana praktički nema utjecaja na tokove snaga, naponski profil ili gubitke u mreži. Mreža i dalje ostaje ovisna o drugim izvorima energije, a ukupna slika sustava ostaje ista onoj bez fotonaponske elektrane.

Usporedbom ova dva scenarija u 3 sata ujutro, jasno je da prisutnost fotonaponske elektrane ne donosi značajne promjene u stanju mreže zbog nedostatka proizvodnje energije u tom periodu. Niski zahtjevi za električnom energijom i stabilnost mreže ne utječu na to je li fotonaponska elektrana priključena ili nije, što sugerira da njena integracija u mrežu ima minimalni utjecaj tijekom noćnih sati.



Slika 8.7.: Tokovi snaga za slučaj u 9 sati bez priključene elektrane



Slika 8.8.: Tokovi snaga za slučaj u 9 sati sa priključenom elektranom

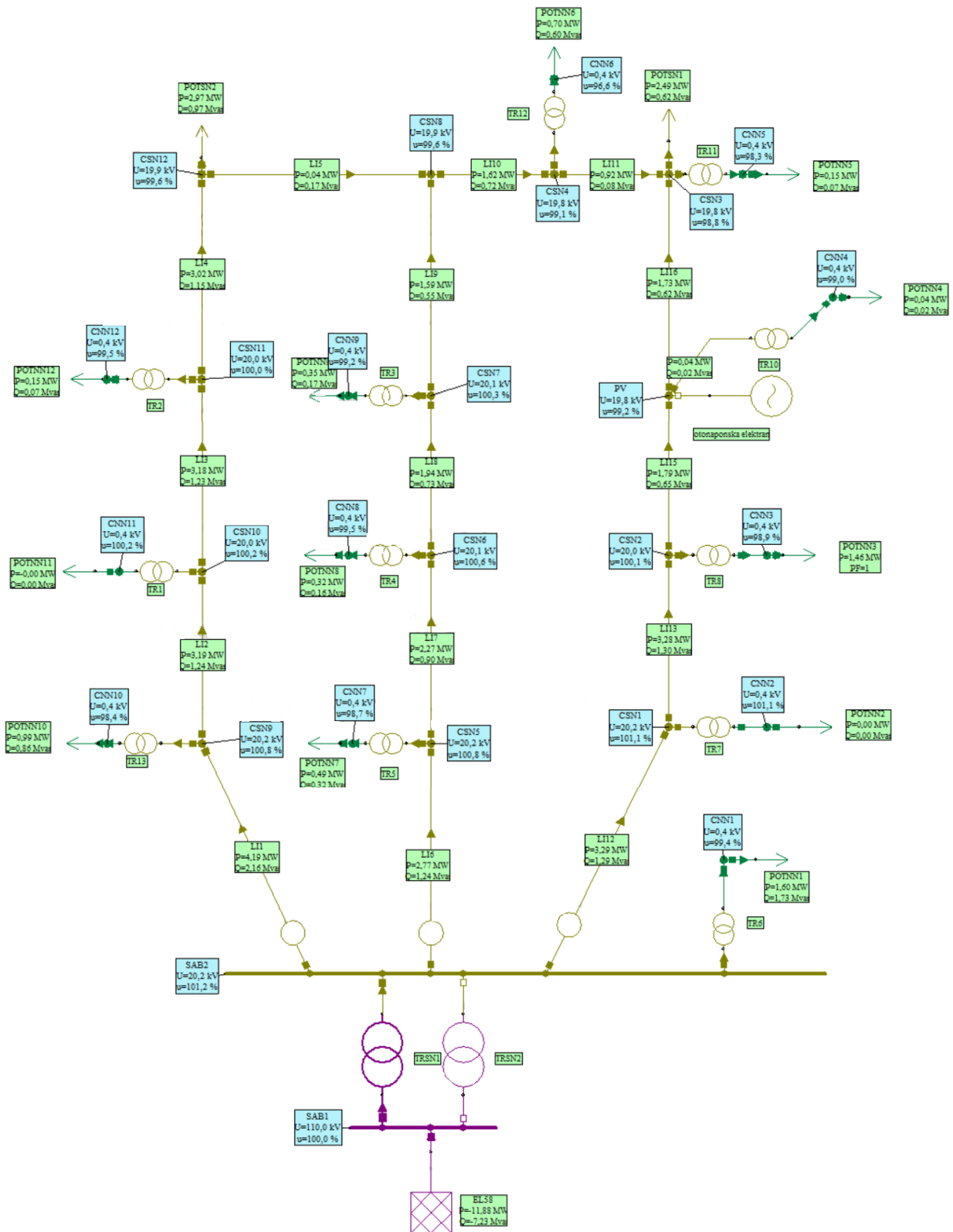
U ovom scenariju analizirano je stanje tokova snaga u srednjenaponskoj mreži u 9 sati, uspoređujući situacije s priključenom fotonaponskom elektranom od 5 MW i bez nje. Ovaj vremenski interval odabran je zbog specifične dinamike potrošnje koja se javlja u jutarnjim satima, kada većina potrošača započinje svoju dnevnu aktivnost.

U 9 sati, potrošnja u mreži počinje rasti kako se poslovni objekti, industrijski pogoni i kućanstva aktiviraju. Bez prisutnosti fotonaponske elektrane mreža se u potpunosti oslanja na tradicionalne izvore električne energije, kao što su termoelektrane, hidroelektrane ili prijenos iz drugih dijelova elektroenergetskog sustava. U tom slučaju, tokovi snaga u mreži usmjereni su od glavnih izvora prema potrošačima, pri čemu dolazi do opterećenja vodova i transformatora unutar mreže.

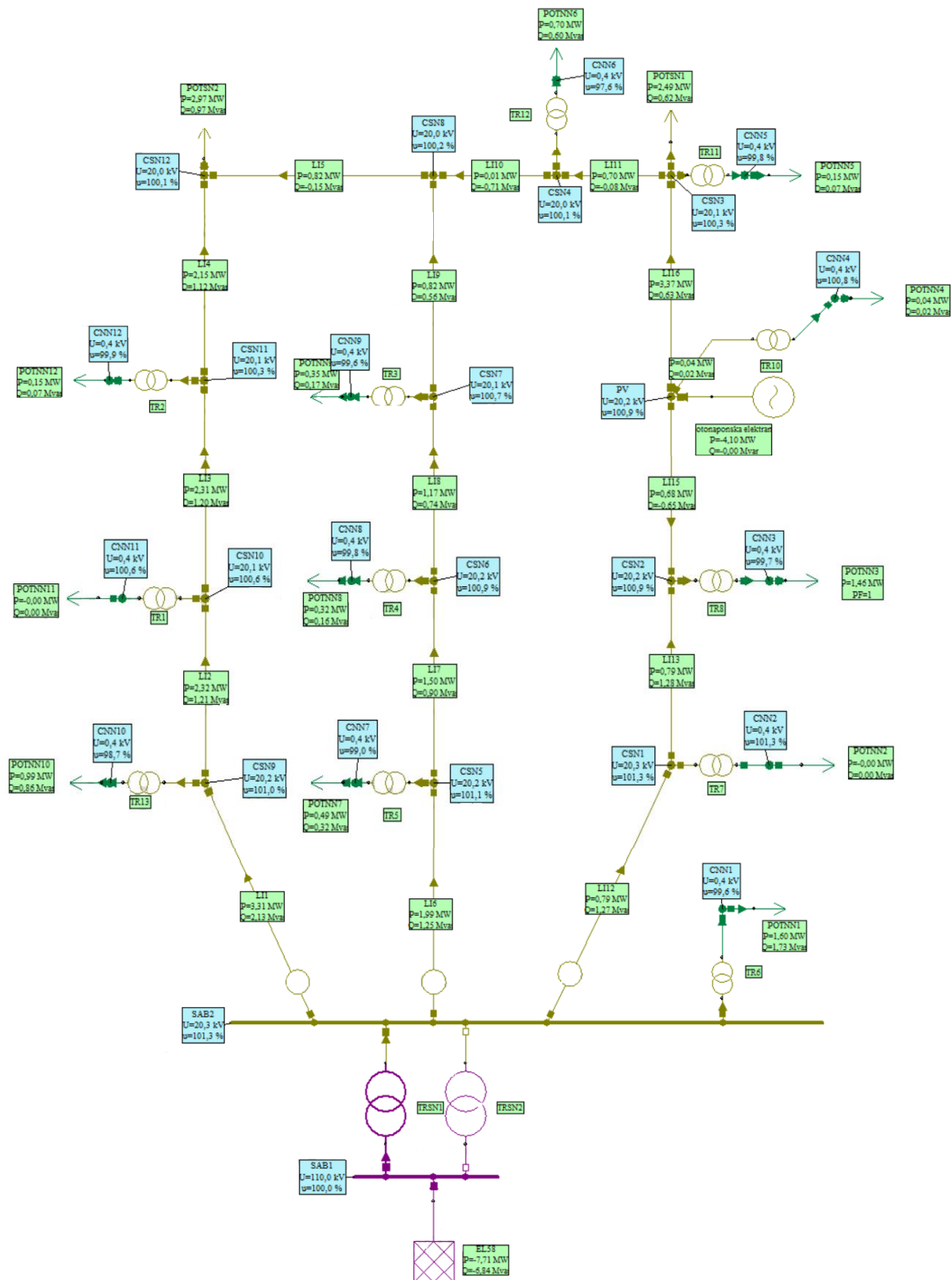
Naponski profil čvorova u mreži može pokazivati padove napona na udaljenijim čvorovima zbog povećane potrošnje, osobito u industrijskim zonama koje imaju visoke zahtjeve za električnom energijom. Struje u mreži u ovom slučaju su veće jer nedostaje dodatni izvor napajanja u vidu fotonaponske elektrane.

Kada se fotonaponska elektrana priključi na mrežu, počinje doprinosti ukupnoj raspoloživoj snazi, iako proizvodnja iz fotonaponske elektrane u ovom trenutku dana nije na svom maksimumu, s obzirom na položaj sunca. Unatoč tome, fotonaponska elektrana počinje djelomično preuzimati opterećenje koje bi inače dolazilo od tradicionalnih izvora energije. Ovaj scenarij može dovesti do smanjenja opterećenja na pojedinim vodovima i transformatorima, a naponski profil čvorova može biti stabilniji, s manje padova napona na krajnjim točkama mreže. Osim toga, prisutnost fotonaponske elektrane može smanjiti struje kroz mrežu, budući da se dio energije generira i koristi lokalno, što također doprinosi smanjenju gubitaka energije u sustavu.

Usporedbom ova dva scenarija u 9 sati, jasno se vidi kako prisutnost fotonaponske elektrane pozitivno utječe na tokove snaga u mreži. Smanjuje se opterećenje na kritičnim komponentama mreže, poboljšava se naponski profil čvorova te se smanjuju gubici energije. Ova analiza pokazuje kako integracija fotonaponske elektrane, čak i u jutarnjim satima kada je njena proizvodnja niža, može doprinijeti stabilnosti i učinkovitosti srednjenaponske mreže.



Slika 8.9.: Tokovi snaga za slučaj u 12 sati bez priključene elektrane



Slika 8.10.: Tokovi snaga za slučaj u 12 sati sa priključenom elektranom



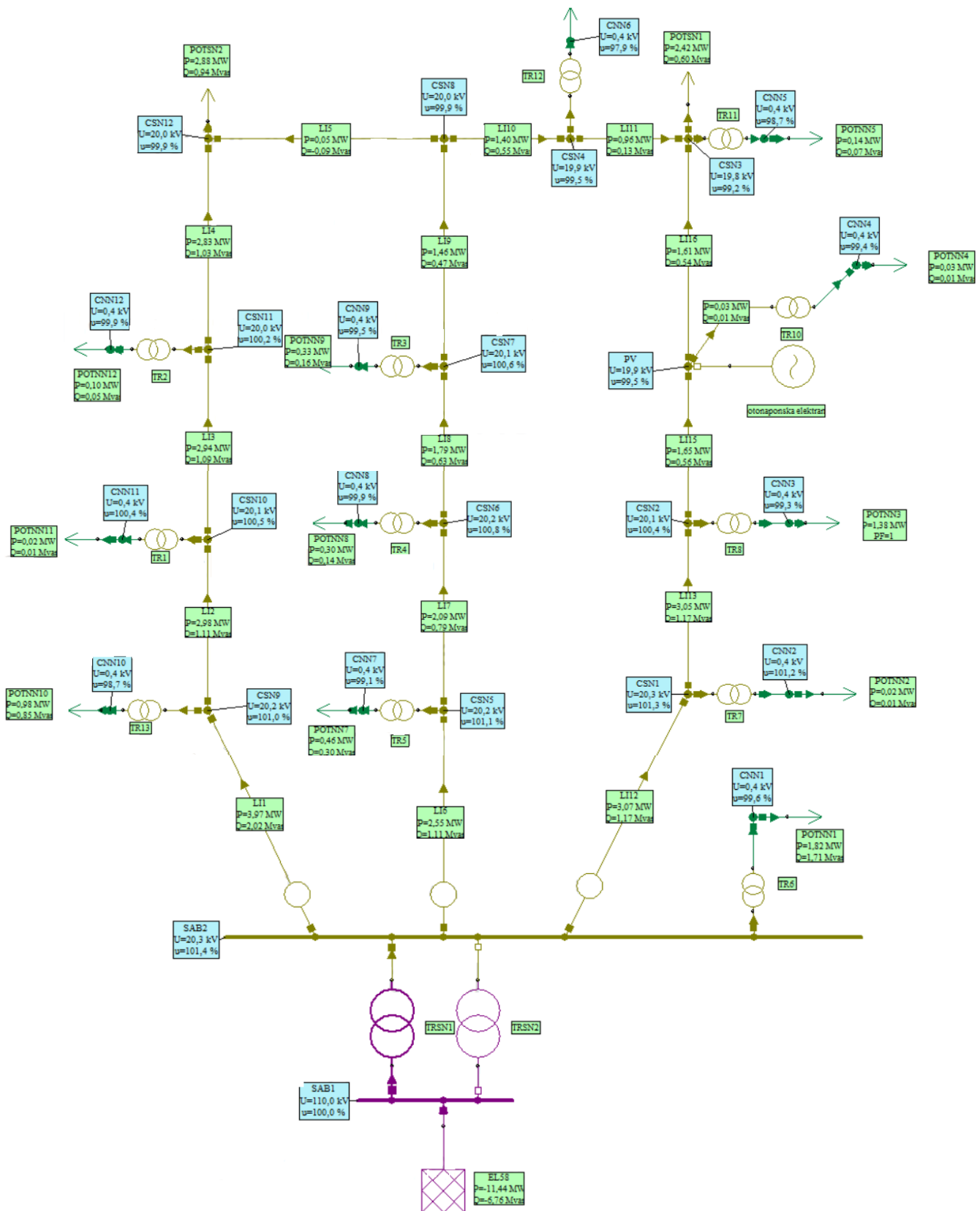
U analizi tokova snaga u 12 sati, fokusiramo se na stanje mreže u trenutku kada je proizvodnja fotonaponske elektrane blizu svog maksimuma zbog visokog položaja sunca. Ovaj trenutak je ključan za razumijevanje kako visoka proizvodnja fotonaponske elektrane utječe na tokove snaga, naponski profil i opterećenje elemenata mreže, te kako se stanje mijenja u odnosu na situaciju bez priključene fotonaponske elektrane.

U 12 sati, potrošnja u mreži može biti značajna, osobito u komercijalnim i industrijskim područjima, gdje su aktivnosti na vrhuncu. Bez priključene fotonaponske elektrane, mreža se u potpunosti oslanja na konvencionalne izvore energije. Glavni izvori napajanja preuzimaju cjelokupno opterećenje mreže, što rezultira visokim tokovima snaga prema potrošačima. U ovom slučaju, mogu se pojaviti povećani padovi napona, osobito u udaljenim dijelovima mreže ili na čvorovima s visokim opterećenjem. Vodovi i transformatori unutar mreže mogu biti izloženi velikim opterećenjima, što može povećati gubitke energije i smanjiti ukupnu učinkovitost sustava.

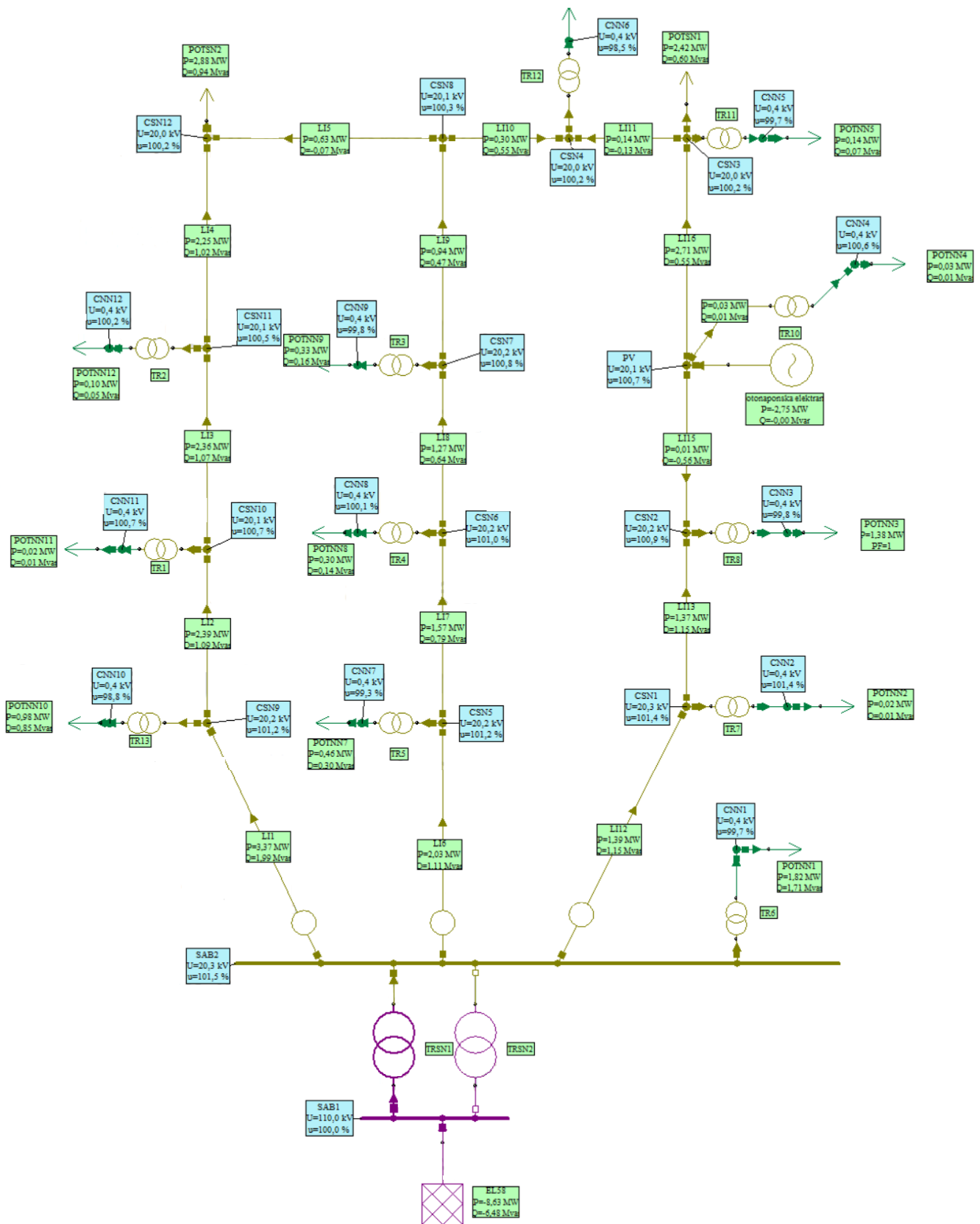
Kada se fotonaponska elektrana priključi na mrežu, njena proizvodnja električne energije doseže svoj vrhunac, zahvaljujući optimalnim uvjetima sunčevog zračenja. U ovom trenutku, fotonaponska elektrana može značajno doprinijeti pokrivanju potreba za električnom energijom u mreži, smanjujući potrebu za energijom iz konvencionalnih izvora.

S fotonaponskom elektranom koja proizvodi veliku količinu energije, tokovi snaga u mreži se mijenjaju. Dio opterećenja koji bi inače bio opskrbljen iz udaljenijih izvora sada preuzima lokalno proizvedena energija iz fotonaponske elektrane. Ovaj lokalni izvor energije može smanjiti strujna opterećenja na vodovima i transformatorima, jer se smanjuje potreba za prijenosom energije izvan područja koje opskrbljuje fotonaponske elektrane. Naponski profil čvorova može se značajno poboljšati, s manjim padovima napona, budući da se energija proizvodi i distribuira bliže mjestu potrošnje. Ovo može također rezultirati smanjenjem gubitaka energije unutar mreže, jer manja struja prolazi kroz vodove i transformatore.

Usporedba tokova snaga u 12 sati sa i bez priključene fotonaponske elektrane jasno pokazuje značajan utjecaj koji fotonaponske elektrane mogu imati na mrežu u trenucima visoke proizvodnje. S priključenom fotonaponskom elektranom, mreža postaje manje opterećena, što se očituje kroz smanjenje struja u vodovima i transformatorima te poboljšanje naponskih profila. Ovo rezultira smanjenjem gubitaka energije i povećanjem ukupne učinkovitosti mreže. Bez fotonaponske elektrane, mreža mora zadovoljiti sve potrebe za električnom energijom iz konvencionalnih izvora, što dovodi do većeg opterećenja i potencijalno većih padova napona. Prisustvo fotonaponske elektrane u 12 sati pokazuje kako obnovljivi izvori energije mogu značajno rasteretiti distribucijski sustav, poboljšati stabilnost napona i smanjiti operativne troškove putem smanjenih gubitaka energije.



Slika 8.11: Tokovi snaga za slučaj u 15 sati bez priključene elektrane



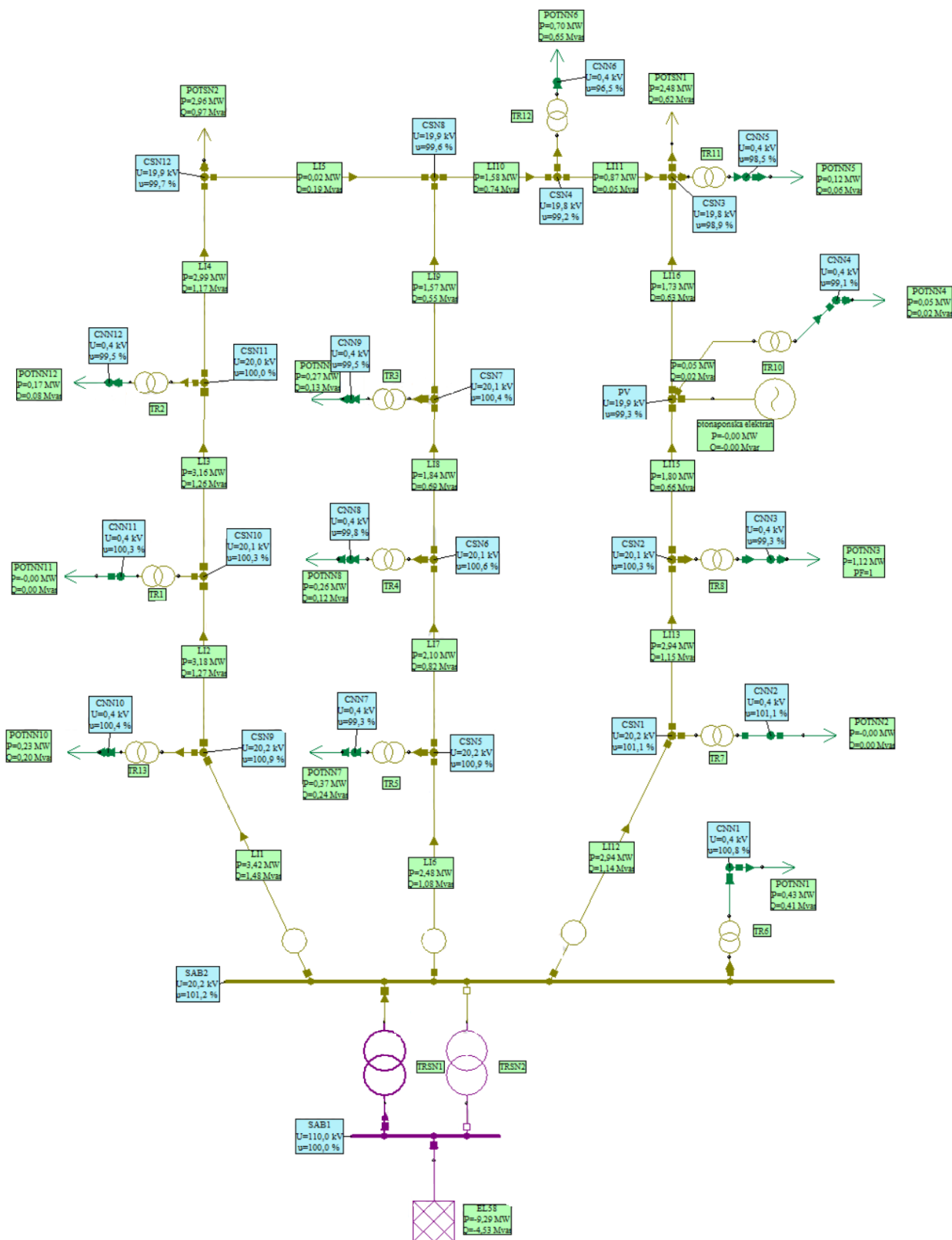
Slika 8.12.: Tokovi snaga za slučaj u 15 sati sa priključenom elektranom

U 15 sati popodne analizirano je stanje tokova snaga u srednjenaponskoj mreži, uspoređujući situacije s priključenom fotonaponskom elektranom i bez nje. Ovaj vremenski interval odabran je jer predstavlja period kada se opterećenje u mreži počinje povećavati nakon dnevnog vrhunca, dok proizvodnja iz fotonaponske elektrane postupno opada, ali je još uvijek značajna.

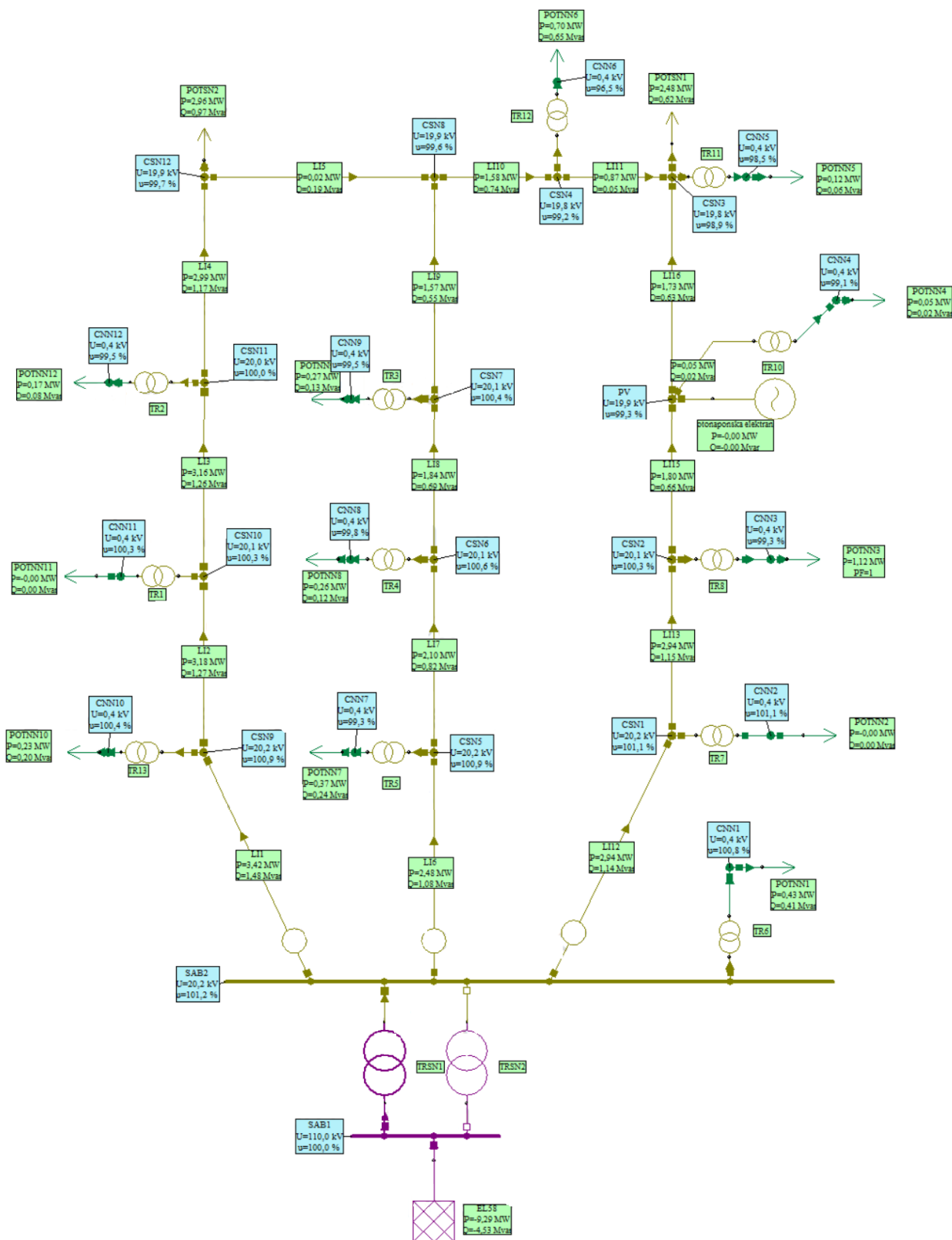
U 15 sati, potrošnja u mreži se kreće prema popodnevnom vrhuncu, jer se aktivnosti potrošača pojačavaju, osobito u kućanstvima i komercijalnim sektorima. Bez prisutnosti fotonaponske elektrane, mreža se oslanja na tradicionalne izvore energije, što rezultira povećanjem opterećenja na vodovima i transformatorima kako bi se zadovoljila rastuća potrošnja. Naponski profil čvorova u mreži može pokazivati umjerene padove napona na udaljenijim čvorovima zbog povećane potrošnje, a struje u mreži su povećane zbog veće potražnje.

Kada se fotonaponska elektrana priključi na mrežu u 15 sati, ona još uvijek doprinosi značajnim količinama energije, preuzimajući dio opterećenja koje bi inače dolazilo iz tradicionalnih izvora. To može smanjiti opterećenje na pojedinim vodovima i transformatorima, stabilizirati naponski profil i smanjiti gubitke energije u mreži. Prisutnost fotonaponske elektrane također može smanjiti struje kroz mrežu, budući da se dio energije generira i koristi lokalno.

Usporedbom ova dva scenarija u 15 sati, jasno se vidi kako prisutnost fotonaponske elektrane pozitivno utječe na tokove snaga u mreži. Smanjuje se opterećenje na kritičnim komponentama mreže, poboljšava se naponski profil čvorova i smanjuju se gubici energije. Ova analiza pokazuje kako integracija fotonaponske elektrane u mrežu tijekom popodnevnih sati, kada je njena proizvodnja još uvijek značajna, može značajno doprinijeti stabilnosti i učinkovitosti srednjenaponske mreže.



Slika 8.13.: Tokovi snaga za slučaj u 20 sati bez priključene elektrane



Slika 8.14.: Tokovi snaga za slučaj u 20 sati sa priključenom elektranom

Analiza tokova snaga u mreži u 20 sati predstavlja zanimljiv slučaj, jer u tom trenutku proizvodnja fotonaponske elektrane pada na nulu zbog zalaska sunca. Ovaj scenarij pruža uvid u stanje mreže u večernjim satima, kada potrošnja često dostiže vrhunac, a fotonaponske elektrane više ne doprinosi opskrbi mreže. Usporedba tokova snaga sa i bez priključene fotonaponske elektrane u ovom slučaju fokusira se na učinke koje odsutnost proizvodnje iz fotonaponske elektrane ima na mrežu.

U 20 sati, većina kućanstava, komercijalnih objekata i industrija su aktivni, te potrošnja električne energije često doseže jedan od dnevnih vrhunaca. Bez fotonaponske elektrane, mreža se oslanja isključivo na konvencionalne izvore električne energije, kao što su termoelektrane, hidroelektrane i prijenos energije iz drugih dijelova elektroenergetskog sustava. U ovoj situaciji, tokovi snaga usmjereni su od centraliziranih izvora prema potrošačima, što može dovesti do visokih opterećenja na vodovima i transformatorima, osobito u udaljenim dijelovima mreže. Naponski profili mogu pokazivati značajne padove, osobito u krajnjim čvorovima mreže, gdje je udaljenost od izvora energije najveća. U tom slučaju, struje u mreži mogu biti veće, što dovodi do povećanih gubitaka energije i manjeg stupnja učinkovitosti mreže.

U ovom scenariju, iako je fotonaponska elektrana tehnički priključena na mrežu, njena proizvodnja u 20 sati je jednaka nuli, jer nema sunčevog zračenja. To znači da fotonaponska elektrana ne doprinosi opskrbi električnom energijom u tom trenutku, a mreža se suočava s istim izazovima kao i u slučaju bez fotonaponske elektrane.

Tokovi snaga u mreži su gotovo identični onima u scenariju bez fotonaponske elektrane, s energijom koja se prenosi iz centraliziranih izvora prema potrošačima. Udaljeniji dijelovi mreže i dalje su opterećeni, s mogućim padovima napona u čvorovima koji su najudaljeniji od glavnih izvora napajanja. Struje u vodovima su visoke, a gubici energije mogu biti značajni zbog velikih udaljenosti koje struja mora preći.

Usporedba tokova snaga u 20 sati sa i bez priključene fotonaponske elektrane, u situaciji kada je proizvodnja fotonaponske elektrane jednaka nuli, pokazuje da prisutnost fotonaponske elektrane nema značajan utjecaj na tokove snaga u mreži u ovom trenutku. S obzirom na to da fotonaponska elektrana ne proizvodi energiju, mreža se oslanja isključivo na konvencionalne izvore energije, a distribucijski sustav mora podnijeti puno opterećenje potrošnje. Ovaj scenarij naglašava važnost diversifikacije izvora energije i planiranja mreže kako bi se osigurao stabilan rad i tijekom perioda kada obnovljivi izvori poput fotonaponskih elektrana nisu dostupni. Također, ukazuje na potrebu za dodatnim izvorima fleksibilnosti, poput baterijskih sustava ili drugih obnovljivih izvora, koji mogu nadomjestiti manjak proizvodnje iz fotonaponskih elektrana u večernjim satima.

Na temelju prikazane tablice 8.3. za karakteristične vodove (LI12, LI13, LI15, LI16), možemo analizirati kako prisutnost fotonaponske elektrane utječe na tokove snage u različitim vremenskim trenucima.

Tablica 8.3.: Analiza promjene tokova djelatne i jalove snage u karakterističnim vodovima mreže

Element	Tokovi snage [MW] - 3h	Tokovi snage [MW] - 3h	Tokovi snage [MW] - 9h	Tokovi snage [MW] - 9h	Tokovi snage [MW] - 12h	Tokovi snage [MW] - 12h	Tokovi snage [MW] - 15h	Tokovi snage [MW] - 15h	Tokovi snage [MW] - 20h	Tokovi snage [MW] - 20h
	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE
LI12	2,26	2,26	3,18	1,04	3,29	0,79	3,07	1,39	2,94	2,94
LI13	2,18	2,18	3,17	1,04	3,28	0,79	3,05	1,37	2,94	2,94
LI15	1,44	1,44	1,72	-0,4	1,79	-0,68	1,65	-0,01	1,8	1,8
LI16	1,41	1,41	1,67	0,57	1,73	0,63	1,61	2,71	1,73	1,73

Element	Tokovi snage [Mvar] - 3h	Tokovi snage [Mvar] - 3h	Tokovi snage [Mvar] - 9h	Tokovi snage [Mvar] - 9h	Tokovi snage [Mvar] - 12h	Tokovi snage [Mvar] - 12h	Tokovi snage [Mvar] - 15h	Tokovi snage [Mvar] - 15h	Tokovi snage [Mvar] - 20h	Tokovi snage [Mvar] - 20h
	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE
LI12	0,77	0,77	1,21	1,18	1,29	1,27	1,17	1,15	1,14	1,14
LI13	0,74	0,74	1,22	1,2	1,3	1,28	1,17	1,15	1,15	1,15
LI15	0,43	0,43	0,58	-0,58	0,65	-0,65	0,56	-0,56	0,66	0,66
LI16	0,42	0,42	0,56	0,57	0,62	0,63	0,54	0,55	0,63	0,63

Na temelju rezultata prikazanih u tablici za karakteristične vodove LI12, LI13, LI15, i LI16, može se primijetiti kako prisutnost fotonaponske elektrane od 5 MW utječe na tokove snage u različitim vremenskim trenucima, u 3h, 9h, 12h, 15h i 20h. Ovi rezultati omogućuju razumijevanje dinamike mreže s i bez integracije fotonaponske elektrane, posebno u kritičnim trenucima dana kada su proizvodnja energije i potrošnja na vrhuncu.

Vodovi LI12 i LI13, koji su u blizini pojne stanice, pokazuju slične tokove snage tijekom cijelog dana. Bez fotonaponske elektrane, tokovi djelatne i jalove snage rastu tijekom dana, s vrhuncem u 12h kada je potrošnja najveća. Prisutnost fotonaponske elektrane značajno mijenja dinamiku. U 9h, 12h i 15h dolazi do značajnog smanjenja tokova snage, jer fotonaponska elektrana preuzima dio tereta. Posebno je vidljiv pad u 12h, kada je proizvodnja iz fotonaponske elektrane najviša, smanjujući opterećenje na ove vodove. Ova stabilizacija mreže pokazuje pozitivne učinke fotonaponske elektrane na ukupnu energetska učinkovitost i pouzdanost mreže.

Vod LI15, koji je prvi vod do fotonaponske elektrane, pokazuje najsnažnije promjene pod utjecajem fotonaponske elektrane. U jutarnjim satima, tokovi snage su relativno niski, no u 9h i 12h dolazi do velikih razlika. Bez fotonaponske elektrane, tokovi snage rastu s povećanjem potrošnje, ali s priključenjem fotonaponske elektrane, dolazi do značajnih promjena, osobito u 12h. To ukazuje na smjer energije prema mreži. Ovaj fenomen je karakterističan za fotonaponske sustave koji su blizu maksimalne proizvodnje. Takvi povratni tokovi mogu izazvati dodatne izazove u upravljanju mrežom, zahtijevajući adekvatnu opremu za regulaciju i distribuciju energije.



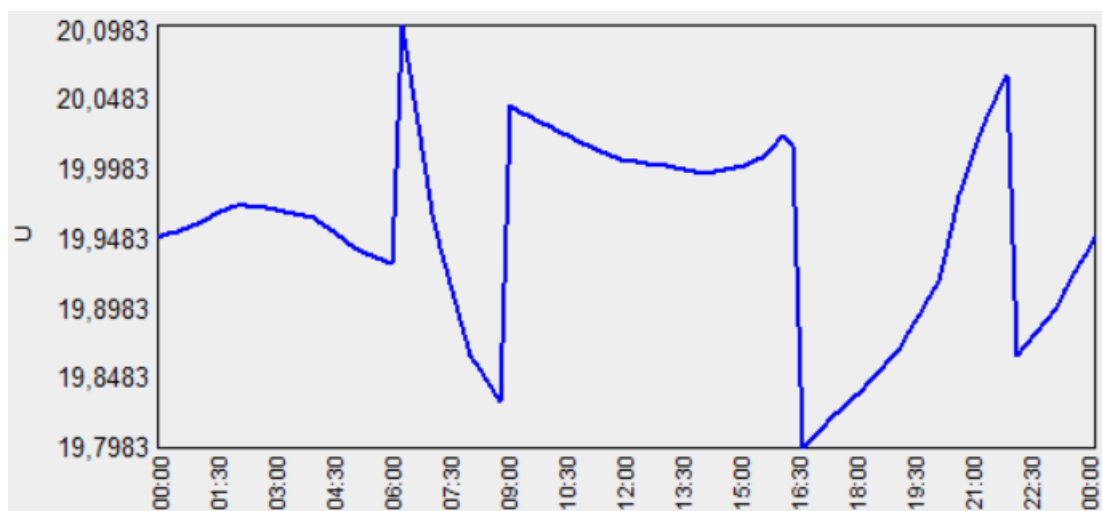
LI16 pokazuje slične trendove kao LI15, ali s manjim ekstremima. Bez fotonaponske elektrane, tokovi snage prate standardnu krivulju dnevnog opterećenja, dok priključenje fotonaponske elektrane smanjuje tokove snage u svim promatranim intervalima. U ovom vodu, iako je fotonaponska elektrana smanjila tokove snage, nisu zabilježene vrijednosti promjene smjera toka snage kao kod LI15, što ukazuje na uravnoteženiji profil mreže. Ovo sugerira da se energija iz fotonaponske elektrane u ovom slučaju lokalno koristi bez potrebe za povratkom u mrežu.

Rezultati pokazuju da fotonaponska elektrana značajno smanjuje opterećenje na vodovima koji su najbliži elektrani, posebno u satima kada je proizvodnja visoka. Najveće promjene primijećene su u vodu LI15, gdje dolazi do promjene smjera toka snage u vodu. S druge strane, vodovi LI12 i LI13 pokazuju stabilniji profil napona i tokova snage s i bez fotonaponske elektrane, ali sa značajnim smanjenjem opterećenja kada je fotonaponska elektrana aktivna. Ove analize ukazuju na potrebu za pažljivim planiranjem i optimizacijom mreže kako bi se maksimizirale prednosti integracije obnovljivih izvora energije, uz minimiziranje potencijalnih izazova kao što su povratni tokovi i fluktuacije napona.

#### 8.4. Analiza naponskog profila

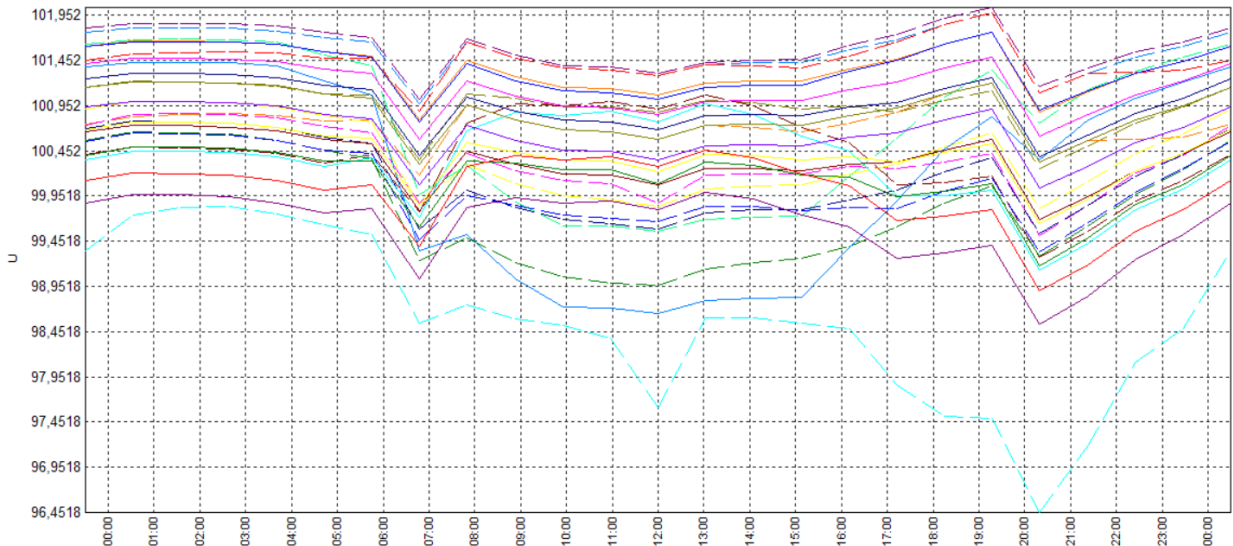
Krivulja padova napona na čvoru elektrane pruža ključne informacije o dinamičnom ponašanju naponskog profila u mreži u kojoj je priključena fotonaponska elektrana. Ova krivulja prikazuje kako se napon mijenja tijekom dana, ovisno o proizvodnji elektrane i opterećenju mreže. Analiza ove krivulje omogućuje bolje razumijevanje stabilnosti naponskog profila te identifikaciju potencijalnih problema u mreži.

Padovi napona na čvoru elektrane ovise o nekoliko ključnih faktora, a to su proizvodnja fotonaponske elektrane, opterećenje mreže i topologija mreže. Kada je proizvodnja visoka, fotonaponska elektrana doprinosi održavanju naponskog profila i smanjuje padove napona u mreži. S druge strane, kada je proizvodnja niska ili nema proizvodnje, noću, padovi napona mogu biti izraženiji. Tijekom perioda visoke potrošnje, mreža može biti znatno opterećena, što povećava padove napona. Ovaj efekt može biti posebno izražen na udaljenijim čvorovima od glavnih izvora napajanja. Padovi napona ovise i o impedancijama vodova i konfiguraciji mreže. Duži vodovi s većom impedancijom uzrokovat će veće padove napona.



Slika 8.15.: Krivulja napona čvora PV na koji je priključena fotonaponska elektrana

Krivulja padova napona na čvoru elektrane pokazuje varijacije napona na tom čvoru u različitim vremenskim intervalima. Obično se očekuje da će napon biti viši tijekom razdoblja kada je proizvodnja fotonaponske elektrane maksimalna, a opterećenje mreže relativno nisko. Nasuprot tome, tijekom razdoblja visoke potrošnje i niske proizvodnje iz fotonaponske elektrane (ili noćnih sati kada proizvodnja iznosi nula), dolazi do izraženijih padova napona.



Slika 8.16.: Krivulje promjene napona u svim elementima mreže

Tablica 8.4.: Analiza promjene napona u svim čvorovima mreže

Element	Promjena napona [%] 9h	Promjena napona [%] 9h	Promjena napona [%] 12h	Promjena napona [%] 12h	Promjena napona [%] 20h	Promjena napona [%] 20h
	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE
CNN1	99,70 %	99,90%	99,40%	99,60%	100,80%	100,80%
CNN2	101,30%	101,50%	101,10%	101,30%	101,10%	101,10%
CNN3	99,20%	99,80%	98,90%	99,70%	99,30%	99,30%
CNN4	99,40%	100,90%	99,00%	100,80%	99,10%	99,10%
CNN5	98,70%	99,90%	98,30%	99,80%	98,50%	98,50%
CNN6	97,70%	98,60%	96,60%	97,60%	96,50%	96,50%
CNN7	99,00%	99,20%	98,70%	99,00%	99,30%	99,30%
CNN8	99,80%	100,10%	99,50%	99,80%	99,80%	99,80%
CNN9	99,50%	99,80%	99,20%	99,60%	99,50%	99,50%
CNN10	98,90%	99,00%	98,40%	98,70%	100,40%	100,40%
CNN11	100,50%	100,80%	100,20%	100,60%	100,30%	100,30%
CNN12	99,90%	100,20%	99,50%	99,90%	99,50%	99,50%
CSN1	101,30%	101,50%	101,10%	101,30%	101,10%	101,10%
CSN2	100,40%	101,00%	100,10%	100,90%	100,30%	100,30%
PV	99,50%	101,00%	99,20%	100,90%	99,30%	99,30%
CSN3	99,10%	100,40%	98,80%	100,30%	98,90%	98,90%
CSN4	99,50%	100,30%	99,10%	100,10%	99,20%	99,20%
CSN5	101,10%	101,30%	100,80%	101,10%	100,90%	100,90%
CSN6	100,80%	101,10%	100,60%	100,90%	100,60%	100,60%
CSN7	100,60%	100,90%	100,30%	100,70%	100,40%	100,40%
CSN8	99,90%	100,40%	99,60%	100,20%	99,60%	99,60%
CSN9	101,10%	101,20%	100,80%	101,00%	100,90%	100,90%
CSN10	100,50%	100,80%	100,20%	100,60%	100,30%	100,30%
CSN11	100,20%	100,60%	100,00%	100,30%	100,00%	100,00%
CSN12	99,90%	100,30%	99,60%	100,10%	99,70%	99,70%

Naponi svih čvorova su unutar  $\pm 10\%$  u skladu sa normom HRN EN 50160.

Analiza promjene napona na čvorovima CNN2, CNN6, CSN1 i CSN3 u tri vremenska trenutka (9, 12 i 20 sati) otkriva značajne promjene u naponskom profilu mreže, posebno u odnosu na priključenje fotonaponske elektrane. Žutom bojom istaknuti su porasti napona, narančastom bojom padovi napona, dok su crvenom bojom istaknute maksimalne i minimalne vrijednosti padova odnosno porasta. Plavom bojom označen je čvor na koji je priključena fotonaponska elektrana.

Čvor CNN2, smješten blizu fotonaponske elektrane i aktivne mreže na niskom naponu, pokazuje najveće poraste napona tijekom svih analiza. Najveći porast zabilježen je u 9 sati kada je fotonaponska elektrana priključena, pri čemu napon raste na 101,5 % nominalne vrijednosti. Ovaj porast sugerira da ubrizgavanje snage iz fotonaponske elektrane u čvor CNN2, koji se nalazi u neposrednoj blizini izvora i aktivne mreže, stvara dodatni napon uslijed smanjene potrošnje u tom trenutku.

Suprotno tome, čvor CNN6, koji se nalazi u sredini mreže na niskom naponu, bilježi najveće padove napona kroz sve tri analize. Najizraženiji pad napona javlja se u 20 sati, kada napon opada na 96,5 % nominalne vrijednosti. Ovaj pad može biti posljedica slabije podrške napona iz mreže u tom dijelu, uz istovremeni izostanak proizvodnje iz fotonaponske elektrane u večernjim satima.

Na srednjem naponu, čvor CSN1, koji je prvi do aktivne mreže i dva čvora udaljen od fotonaponske elektrane, pokazuje najveći porast napona u 9 sati, s maksimalnim porastom na 101,5 % kada je fotonaponska elektrana priključena. Ovaj rezultat ukazuje na to da se višak proizvedene energije iz elektrane prenosi prema aktivnoj mreži, podižući napon u čvoru CSN1.

Čvor CSN3, smješten odmah nakon fotonaponske elektrane gledano od strane aktivne mreže, pokazuje značajne padove napona u 20 sati, kako sa, tako i bez priključene fotonaponske elektrane. Pad napona na ovom čvoru može se pripisati smanjenoj opskrbi energijom u trenucima kada fotonaponska elektrana ne proizvodi snagu, a lokalno opterećenje ostaje visoko, što rezultira nedostatkom napona.

Ovi rezultati jasno pokazuju kako fotonaponska elektrana, ovisno o svojoj proizvodnji i vremenskom trenutku, može značajno utjecati na naponski profil u različitim dijelovima mreže, stvarajući poraste ili padove napona, što je ključno za analizu stabilnosti i učinkovitosti elektroenergetskog sustava.

## 8.5. Analiza struja kratkog spoja

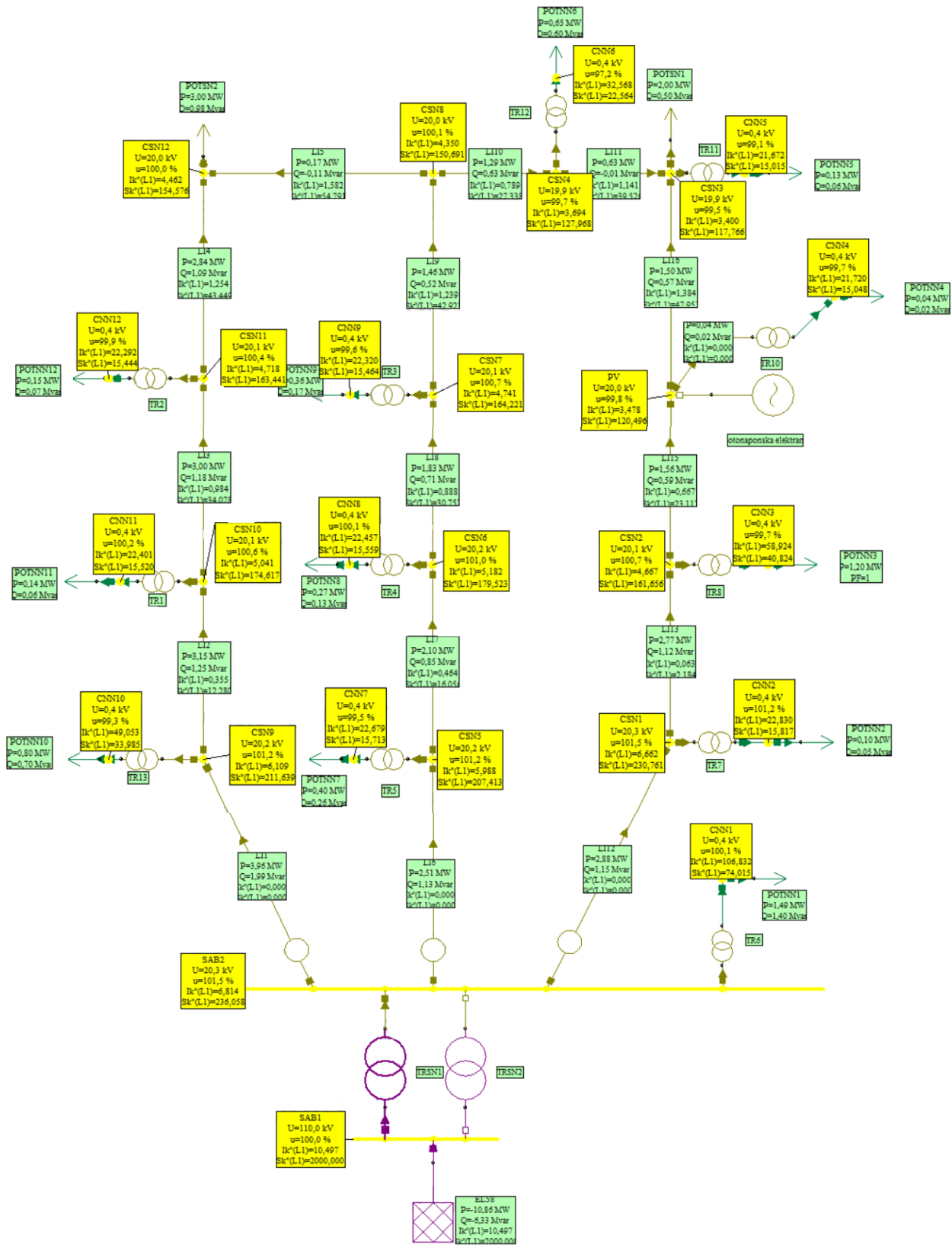
Tropolni kratki spoj predstavlja kritičan scenarij u analizi elektroenergetskih sustava, jer omogućuje procjenu utjecaja različitih elemenata mreže na sigurnost i stabilnost u slučaju ozbiljnog kvara. U ovom slučaju, analiza tropolnog kratkog spoja provedena je na svim čvorovima srednjenaponske i niskonaponske mreže, s ciljem razumijevanja kako prisutnost ove elektrane utječe na struju kratkog spoja u mreži.

U scenariju bez priključenja fotonaponske elektrane, mreža funkcionira kao tradicionalni elektroenergetski sustav s konvencionalnim izvorima energije (npr. termoelektrane, hidroelektrane). Nakon identifikacije mjesta kratkog spoja, proračunavaju se struje kratkog spoja koje nastaju zbog iznenadnog spajanja faznih vodiča. Te struje su u ovom slučaju generirane isključivo iz konvencionalnih izvora energije u mreži. Struje kratkog spoja mogu biti vrlo visoke, uzrokujući toplinska i mehanička opterećenja na opremi, uključujući transformatore, vodove i rasklopna postrojenja. Ove struje također stvaraju značajan pad napona u mreži, što može utjecati na stabilnost i kvalitetu opskrbe električnom energijom. Uspostavljeni zaštitni uređaji, kao što su automatski prekidači i releji, moraju biti pravilno podešeni da bi isključili struju kratkog spoja prije nego što dođe do oštećenja opreme.

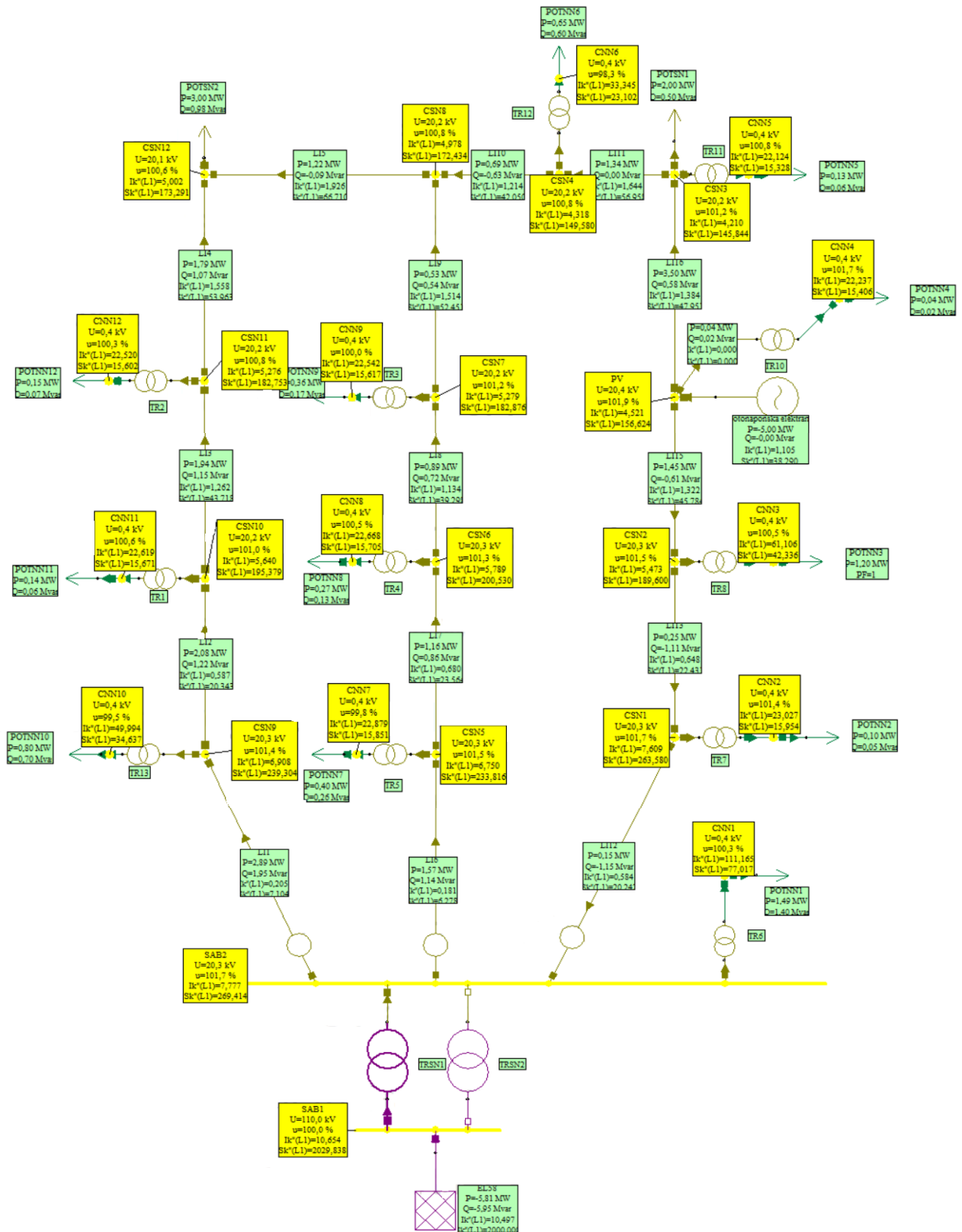
Na slici 8.17. prikazan je tropolni kratki spoj u svim čvorovima mreže i sabirnicama bez priključene fotonaponske elektrane na srednjenaponsku mrežu.

Kada je u mrežu integrirana fotonaponska elektrana, dolazi do određenih promjena u dinamici struja kratkog spoja. Fotonaponske elektrane su povezane s mrežom putem izmjenjivača, koji mogu ograničiti struje kratkog spoja. Stoga, u slučaju trofaznog kratkog spoja, fotonaponska elektrana ne doprinosi značajno strujama kratkog spoja jer je njihova sposobnost generiranja prekomjernih struja ograničena na razinu nominalne snage izmjenjivača. Iako fotonaponska elektrana ne doprinosi značajno strujama kratkog spoja, mrežni operateri moraju uzeti u obzir specifičnosti invertera pri podešavanju zaštitnih releja i osigurati da su svi zaštitni uređaji pravilno konfigurirani za rad.

Na slici 8.18. prikazan je tropolni kratki spoj u svim čvorovima mreže i sabirnicama sa priključenom fotonaponskom elektranom na srednjenaponsku distribucijsku mrežu.



Slika 8.17.: 3PKS u mreži bez priključene fotonaponske elektrane



Slika 8.18.: 3PKS u mreži sa priključenom fotonaponskom elektranom

S obzirom na to da je fotonaponska elektrana spojena na čvor PV, analiza utjecaja fotonaponske elektrane na mrežu može se detaljnije fokusirati na promjene u ovom čvoru i njegovom okruženju.

Tablica 8.5.: Analiza struja i snaga kratkog spoja u svim čvorovima mreže

Element	Struja kratkog spoja [kA]	Struja kratkog spoja [kA]	Snaga kratkog spoja [MVA]	Snaga kratkog spoja [MVA]
	BEZ FNE	SA FNE	BEZ FNE	SA FNE
CNN1	106,83	111,165	74,015	77,017
CNN2	22,83	23,027	15,817	15,954
CNN3	58,924	61,106	40,824	42,336
CNN4	21,72	22,237	15,048	15,406
CNN5	21,672	22,124	15,015	15,328
CNN6	32,568	33,345	22,564	23,102
CNN7	22,679	22,879	15,713	15,851
CNN8	22,457	22,668	15,559	15,705
CNN9	22,32	22,542	15,464	15,617
CNN10	49,053	49,994	33,985	34,637
CNN11	22,401	22,619	15,52	15,671
CNN12	22,292	22,52	15,444	15,602
CSN1	6,662	7,609	230,761	263,58
CSN2	4,667	5,473	161,656	189,6
PV	3,478	4,521	120,496	156,624
CSN3	3,4	4,21	117,766	145,844
CSN4	3,694	4,318	127,968	149,58
CSN5	5,988	6,75	207,413	233,816
CSN6	5,182	5,789	179,523	200,53
CSN7	4,741	5,279	164,221	182,876
CSN8	4,35	4,978	150,691	172,434
CSN9	6,109	6,908	211,639	239,304
CSN10	5,041	5,64	174,617	195,379
CSN11	4,718	5,276	163,441	182,753
CSN12	4,462	5,002	154,576	173,291
SAB1	10,497	10,654	2000	2029,838
SAB2	6,814	7,777	236,058	269,414

Prema tablici 8.5. vidljivo je da povezivanje fotonaponske elektrane na čvor PV povećava struju i snagu kratkog spoja. Struja kratkog spoja raste za približno 1,043 kA, što predstavlja porast od oko 30 %. Slično tome, snaga kratkog spoja se povećava za 36,128 MVA.

Fotonaponska elektrana utječe i na susjedne čvorove, poput CSN2 i CSN3. U čvoru CSN2 dolazi do povećanja struje trolejnog kratkog spoja za 0,806 kA odnosno za 17 %, a u čvoru CSN3 dolazi do povećanja od 0,81 kA odnosno 24 %. Ovo je očekivano jer fotonaponska elektrana dodaje dodatnu snagu u mrežu, što rezultira višim strujama u slučaju kratkog spoja.



Ako su zaštitna i prekidna oprema u čvoru PV i susjednim čvorovima (poput CSN2 i CSN3) dimenzionirane za niže vrijednosti kratkog spoja, bit će potrebno izvršiti nadogradnju. Konkretno, za čvor PV treba osigurati da prekidači i osigurači mogu podnijeti povećane struje i snage.

Povećane vrijednosti kratkog spoja u čvorovima PV, CSN2, i CSN3 ukazuju na veću snagu koju sustav mora apsorbirati u slučaju kvara. Ovo može imati utjecaj na stabilnost sustava i zahtijevati dodatne analize stabilnosti i selektivnosti zaštite.

Najveće promjene u povećanju struje kratkog spoja desile su se na čvoru PV, od čak 30 %, dok su najmanje promjene na srednjenaponskom čvoru CSN7 od 11 %, a na niskonaponskom čvoru CNN2 od samo 0,8 %.

Prema rezultatima iz tablice 8.5., najveće struje trolnog kratkog spoja javljaju se u niskonaponskoj mreži u čvoru CNN1 (narančasto), a u srednjenaponskoj mreži u čvoru CSN1 (narančasto). Najmanje struje trolnog kratkog spoja se pak javljaju u niskonaponskoj mreži u čvoru CNN5 (žuto), a u srednjenaponskoj mreži u čvoru CSN3 (žuto).

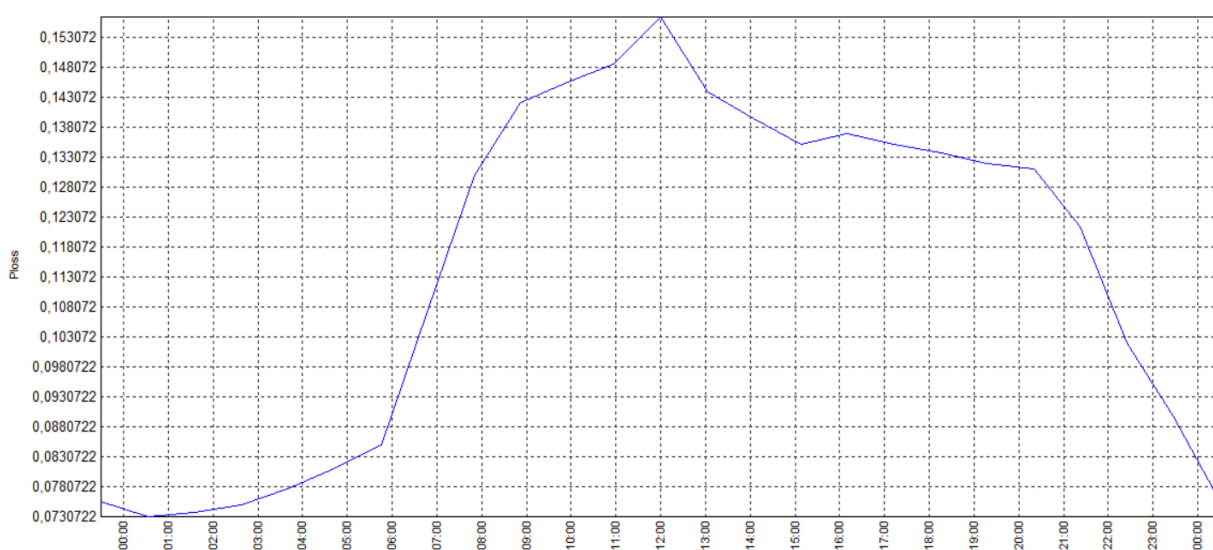
Porast snage kratkog spoja može također utjecati na kvalitetu električne energije, posebno u smislu povećanih harmonika koje mogu uzrokovati dodatne smetnje. Ovdje bi bilo korisno analizirati emisije viših harmonika i njihov utjecaj na mrežu.

Fotonaponske elektrane su spojene na mrežu putem izmjenjivača. Oni su dizajnirani da ograniče struju kratkog spoja na relativno niske vrijednosti kako bi zaštitili opremu i mrežu. To je jedan od razloga zašto struje kratkog spoja mogu biti niske u blizini fotonaponske elektrane.

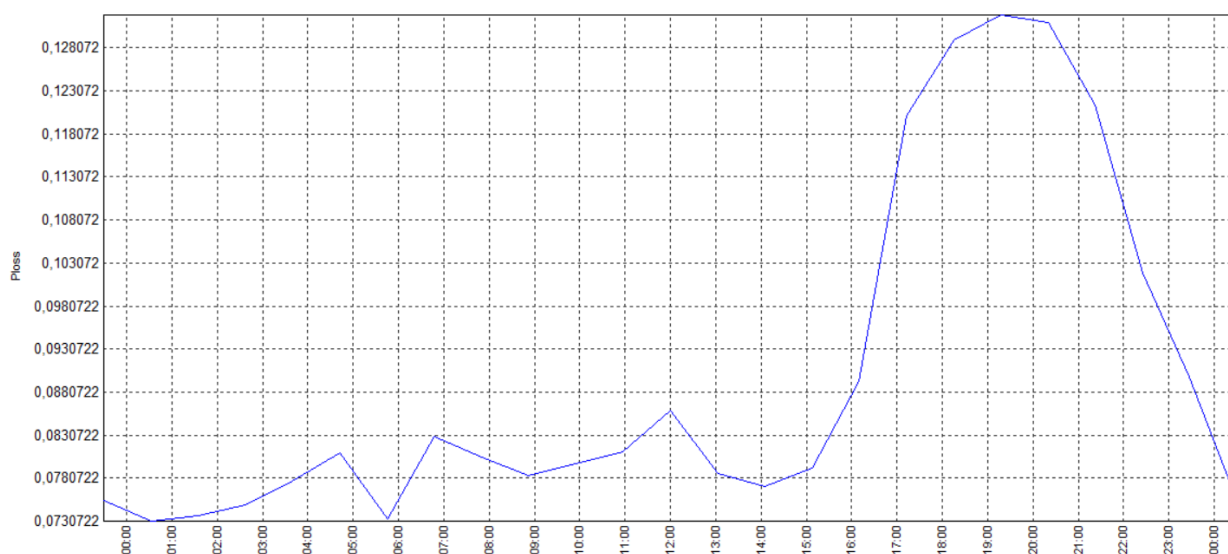
## 8.6. Analiza gubitaka snage u mreži

Analiza gubitaka snage u elektroenergetskoj mreži je ključni aspekt u procjeni učinkovitosti i ekonomičnosti rada mreže. Gubici snage predstavljaju količinu energije koja se gubi u prijenosu električne energije od proizvodnih jedinica do krajnjih potrošača, i oni su neizbježni zbog prirodnih karakteristika električnih vodova i opreme.

Za svaki vod, transformator i ostale elemente u mreži, izračunava se gubitak snage na temelju otpora i struje koja prolazi kroz te elemente. Ukupni gubici snage u mreži dobivaju se zbrajanjem pojedinačnih gubitaka svih elemenata.



Slika 8.19.: Krivulja gubitaka snage bez priključene elektrane



Slika 8.20.: Krivulja gubitaka snage u mreži sa priključenom elektranom

U analizi krivulje gubitaka snage ključni aspekti su porast i pad gubitaka snage. Tijekom večernjih sati, kada proizvodnja iz fotonaponske elektrane opada, a potrošnja energije raste, krivulja će pokazati porast gubitaka snage zbog povećane potrebe za energijom iz udaljenijih izvora. Krivulja će pokazati pad gubitaka snage tijekom dana kada je proizvodnja iz fotonaponske elektrane visoka, osobito u podne. To je rezultat smanjenja opterećenja na glavnoj mreži i manjeg prijenosa energije preko dugih vodova.

Krivulja analize gubitaka snage u mreži pruža vizualni uvid u dinamiku i učinkovitost mreže, omogućujući bolje razumijevanje kada i gdje dolazi do najvećih gubitaka te kako različiti faktori utječu na ove gubitke tijekom vremena.

## 9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj priključenja fotonaponskih elektrana na pogon srednjenaponske mreže, s posebnim naglaskom na tehničke izazove i mogućnosti koje se javljaju u elektroenergetskom sustavu. Kroz teorijsku razradu, a zatim i praktičnu analizu na primjeru stvarne srednjenaponske mreže, prikazani su ključni aspekti i rezultati istraživanja.

Povećanje udjela obnovljivih izvora energije poput fotonaponskih elektrana simbolizira prelazak s tradicionalnih oblika proizvodnje energije na one koji su usmjereni prema smanjenju štetnog utjecaja na okoliš. Ovaj prijelaz, iako tehnički zahtjevan, predstavlja i društveni iskorak prema odgovornijem korištenju resursa i dugoročnom očuvanju planeta.

S obzirom na relativno male instalirane snage fotonaponskih elektrana, njihovo priključenje se najčešće provodi na distribucijsku mrežu srednjeg ili niskog napona. Priključenjem ovih elektrana na mrežu očekuju se uglavnom pozitivni utjecaji na pogonske uvjete, posebno na naponski profil i smanjenje gubitaka djelatne snage. Međutim, često je povećanje napona u točki priključka glavni faktor koji ograničava priključivanje fotonaponskih elektrana veće snage na distribucijsku mrežu. U slučaju kvara, fotonaponske elektrane doprinose povećanju struje kratkog spoja, no u velikom broju slučajeva je to povećanje toliko malo da neće tražiti zamjenu opreme. Potencijalne probleme mogu uzrokovati povećanja emisija viših harmonika koja nastaju radom pretvarača. Proizvodnja energije iz fotonaponskih sustava ograničena je na dnevno razdoblje, kada su opterećenja također najveća, što može značajno smanjiti vršna dnevna opterećenja i pozitivno utjecati na stabilnost mreže.

U širem kontekstu, integracija fotonaponskih elektrana u elektroenergetski sustav nije samo tehničko pitanje, već i odraz dubljih promjena u našem odnosu prema energiji i okolišu. Svaka nova tehnologija koja se uvodi u energetske sustav nosi sa sobom izazov usklađivanja s postojećim strukturama, ali istovremeno otvara i put prema održivijoj budućnosti.

U konačnici, uspješna integracija fotonaponskih sustava u elektroenergetski sustav nije samo tehnička nužnost, već i filozofski izbor. Ona zahtijeva promišljanje o tome kako ćemo balansirati između rasta energetske potrošnje i potrebe za očuvanjem okoliša, kako ćemo koristiti tehnologiju ne samo za postizanje efikasnosti, već i za ostvarenje etičkih ciljeva prema budućim generacijama.

Na taj način, priključivanje fotonaponskih elektrana na srednjenaponsku mrežu postaje dio šireg procesa transformacije energetske sustava, koji nije samo tehnički, već i duboko humanistički poduhvat, usmjeren ka održivom razvoju i boljem svijetu za sve.

## LITERATURA

- [1] Goić, R.; Jakus, D.; Penović, I.: „Distribucija električne energije“, interna skripta, Split, 2008.
- [2] Razvoj SN mreže za razdoblje narednih 20 godina za Distribucijsko područje Elektroistra Pula, HEP-ODS d.o.o., listopad 2014.
- [3] Mrežna pravila distribucijskog sustava, NN 74/2018, 2018.
- [4] Metodologija i kriteriji planiranja razvoja distribucijske mreže, HEP-ODS d.o.o., listopad 2013.
- [5] Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu, HEP-ODS d.o.o., veljača 2018.
- [6] Lukičević, P.; Šinković, D.: „Projekt fotonaponske elektrane“, INOVAPRO, Zagreb, 2021.
- [7] „Sunčana elektrana Obrovac“, <https://www.hep.hr/hep-kod-obrovca-pustio-u-rad-najvecu-suncanu-elektranu-u-hrvatskoj/3738>, s interneta, 20.07.2024.
- [8] Goić, R.; Krstulović Opara, J.; Penović, I., i drugi: „Priključak velikih fotonaponskih elektrana na distribucijsku mrežu“, HO CRIED, 8. savjetovanje, Umag, 2010.
- [9] CIAK: „Elaborat zaštite okoliša za postupak ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš za zahvat SOLARNA ELEKTRANA ŠESTANOVAC“, C.I.A.K. d.o.o., Zagreb, kolovoz 2019.
- [10] Balint, D.; Bodor, A.; Došen, D. i drugi.: „Obnovljivi izvori energije i energetska učinkovitost za ruralna područja“, MTA KRTK, Pečuh, 2018.
- [11] EKO-MONITORING: „Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš IZGRADNJA SUNČANE ELEKTRANE SOLEKTRA IX SNAGE 999 kW U OPĆINI GORNJI MIHALJEVAC“, Solektra d.o.o., Varaždin, 2020.
- [12] Guidelines for Grid-connected Small Scale Solar PV Systems, April 2014.
- [13] „Neintegrirane solarne elektrane“, <https://duplico.com/hr/blog/sto-su-neintegrirane-solarne-elektrane>, s interneta 20.07.2024.
- [14] „Neintegrirane sunčane elektrane u Hrvatskoj“, <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/neintegrirane-sunceve-elektrane/3422>, s interneta, 20.07.2024.
- [15] „Nadomjesne krivulje opterećenja“, <https://www.hep.hr/ods/opskrbljivaci/nko-nadomjesne-krivulje-opterecenja/svrha-nko/67>, s interneta, 24.07.2024.
- [16] Bakula, M.; Ramljak, I.; Slišković, I.: „Priključak fotonaponskih elektrana „PRANČIOK“ i FEAL na distribucijsku SN mrežu“, BH K CIGRE, 12. savjetovanje, Neum, 2015.

- [17] Pravila primjene nadomjesnih krivulja opterećenja, HEP-ODS d.o.o.
- [18] „Svjetska proizvodnja energije iz OIE“, <https://www.iea.org/>, s interneta, 05.08.2024.
- [19] Renewable Capacity Statistics 2024, IRENA – International Renewable Energy Agency
- [20] Grašo, J.; Cvitanović, M.; Čović, A.: „Utjecaj sunčane elektrane „Solarni krov Špansko - Zagreb“ na distribucijsku mrežu“, HO CRIED, 1. savjetovanje, Šibenik, 2008.
- [21] „Sklapanje ugovora“, <https://www.hrote.hr/sklapanje-ugovora>, s interneta, 20.07.2024.
- [22] Karavidović, D.; Marijanić, T.: „Nadomjesna krivulja opterećenja i postupci njene uporabe kod uspostave tržišta električne energije“, HO CRIED, SO6-02, Šibenik, 2008.
- [23] Grosanu D, Cazacu E; Saracin, C; Stanculescu, M; Petrescu, L.: „Passive Reactive Power Control for Grid-Connected Solar Parks: A Case-Study“, Bucharest, Romania, March 2023.
- [24] „Neplan“, <https://neplan.ch/>, s interneta, 08.08.2024.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

EES	Elektroenergetski sustav
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SKS	Samonosivi kabelski snop
VN	Visoki napon
SN	Srednji napon
NN	Niski napon
TS	Transformatorska stanica
HEP-ODS	Hrvatska elektroprivreda - Operator distribucijskog sustava
OPIP	Operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu
EPZ	Elaborat podešenja zaštite
EUEM	Elaborat utjecaja na elektroenergetsku mrežu
EOTRP	Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja
DC	Istosmjerna struja
AC	Izmjenična struja
OMM	Obračunsko mjerno mjesto
HROTE	Hrvatski operator tržišta električne energije
HERA	Hrvatska energetska regulatorna agencija
SAIDI	trajanje dugih neplaniranih prekida napajanja uzrokovanih ispadima na SN mreži
SAIFI	broj dugih neplaniranih prekida napajanja uzrokovanih ispadima na SN mreži
FN	Fotonapon
VPP	Virtualne elektrane
SPD	Surge Protection Decives - prenaponski zaštitni uređaj
RCD	Residual Current Devices – uređaji zaštite diferencijalne struje
NKO-KSK	Nadomjesne krivulje opterećenja za karakteristične skupine kupaca
IEA	Međunarodna agencija za energiju
IRENA	Internacionalna agencija za obnovljivu energiju

# SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLLESKOM JEZIKU

## **Sažetak:**

Ovaj diplomski rad analizira utjecaj priključenja fotonaponskih elektrana na pogon srednjenaponske mreže, s posebnim naglaskom na tehničke izazove i mogućnosti u distribucijskom sustavu.

U uvodnom dijelu predstavljena je distribucijska mreža, s fokusom na srednjenaponske mreže i kriterije njihovog planiranja u Hrvatskoj. Zatim je detaljno razmotren proces priključenja obnovljivih izvora energije na srednjenaponsku mrežu, uključujući mrežna pravila i postupak puštanja fotonaponskih elektrana u rad.

Nadalje, rad pruža uvid u osnovne komponente i princip rada fotonaponskih elektrana, kao i uvažavanje sigurnosnih aspekata i zaštite tih sustava. Poseban naglasak stavljen je na neintegrirane fotonaponske elektrane u Hrvatskoj, te na razvoj nadomjesnih krivulja opterećenja i proizvodnje.

Središnji dio rada usmjeren je na analizu utjecaja priključenja fotonaponskih elektrana na elektroenergetski sustav, uključujući promjene naponskog profila, gubitaka snage, kratkospojne struje i emisije viših harmonika. Kroz primjer na stvarnoj srednjenaponskoj mreži analizirane su krivulje opterećenja i proizvodnje, tokovi snaga, naponski profil, struje kratkog spoja i gubici snage za karakterističan dan u godini.

Zaključno, rad naglašava važnost temeljitog planiranja i analize pri integraciji fotonaponskih elektrana u srednjenaponske mreže, s ciljem osiguranja stabilnosti i kvalitete elektroenergetskog sustava.

## **Ključne riječi:**

Obnovljivi izvori energije, elektroenergetski sustav, fotonaponska elektrana, srednjenaponska mreža, fotonaponska ćelija, fotonaponski modul, izmjenjivač, mrežna pravila, neintegrirane fotonaponske elektrane, nadomjesna krivulja opterećenja, nadomjesna krivulja proizvodnje, naponski profil, gubici snage, kratki spoj, kvaliteta električne energije.



**Abstract:**

This thesis analyzes the impact of connecting photovoltaic power plants to the operation of medium-voltage networks, with a particular focus on the technical challenges and opportunities within the distribution system. The introductory section presents the distribution network, emphasizing medium-voltage networks and the criteria for their planning in Croatia. The process of connecting renewable energy sources to the medium-voltage network is then examined in detail, including grid regulations and the procedure for commissioning photovoltaic power plants.

Furthermore, the thesis provides an overview of the basic components and operating principles of photovoltaic power plants, as well as the consideration of safety aspects and protection of these systems. Special attention is given to non-integrated photovoltaic power plants in Croatia and the development of substitute load and production curves.

The central part of the thesis focuses on analyzing the impact of connecting photovoltaic power plants to the power system, including changes in voltage profiles, power losses, short-circuit currents, and harmonic emissions. Through an example of a real medium-voltage network, load and production curves, power flows, voltage profiles, short-circuit currents, and power losses for a characteristic day of the year are analyzed.

In conclusion, the thesis emphasizes the importance of thorough planning and analysis when integrating photovoltaic power plants into medium-voltage networks to ensure the stability and quality of the power system.

**Key words:**

Renewable energy sources, power system, photovoltaic power plant, medium-voltage network, photovoltaic cell, photovoltaic module, inverter, grid regulations, non-integrated photovoltaic power plants, substitute load curve, substitute production curve, voltage profile, power losses, short circuit, power quality.