

Geoinformacijski model slobodnog kapaciteta i dostupne fleksibilnosti elektroenergetske mreže

Vozab, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:247623>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 125

**GEOINFORMACIJSKI MODEL SLOBODNOG KAPACITETA I
DOSTUPNE FLEKSIBILNOSTI ELEKTROENERGETSKE
MREŽE**

Lucija Vozab

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 125

**GEOINFORMACIJSKI MODEL SLOBODNOG KAPACITETA I
DOSTUPNE FLEKSIBILNOSTI ELEKTROENERGETSKE
MREŽE**

Lucija Vozab

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 125

Pristupnica: **Lucija Vozab (0036514687)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder

Zadatak: **Geoinformacijski model slobodnog kapaciteta i dostupne fleksibilnosti elektroenergetske mreže**

Opis zadatka:

Kroz diplomski rad biti će izrađen model za podršku operatoru distribucijskog i/ili prijenosnog sustava pri planiranju mreže, ali i investitorima u distribuiranu proizvodnju u prepoznavanju lokacija za instalaciju novih niskougličnih postrojenja. Nova postrojenja fotonaponskih elektrana, električnih vozila i dizalica topline stvaraju izazove za operatore distribucijskog sustava, i lokacijski i snagom, te zbog niske dogledljivosti mreže njihovo priključivanje na sustav može biti i vremenski i tehnički kompleksno. S druge strane investitori nemaju znanje o distribucijskoj mreži, dostupnim kapacitetima pa samim time i iznosu cjelokupne investicije koju će morati uložiti prilikom stvaranja uvjeta u mreži. Dodatno, distribucijske mreže su karakterizirane tehničkim i topološkim karakteristikama koje analize čine kompleksnijima u odnosu na slične analize u prijenosnim mrežama. U diplomskom radu biti će razvijen model, temeljen na geoinformacijskom sustavu, koji će temeljem dostupnim podacima i stanju i topologiji mreže vizualizirati trenutno dostupni slobodni kapacitet za instalaciju novih niskougličnih kapaciteta, ali i procijeniti potencijalno dostupnu fleksibilnost na promatranom dijelu mreže.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 125

**GEOINFORMACIJSKI MODEL
SLOBODNOG KAPACITETA I DOSTUPNE
FLEKSIBILNOSTI ELEKTROENERGETSKE
MREŽE**

Lucija Vozab

Zagreb, rujan 2024.

DIPLOMSKI
ZADATAK br. 125

Pristupnica: **Lucija Vozab (0036514687)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder

Zadatak: **Geoinformacijski model slobodnog kapaciteta i dostupne fleksibilnosti elektroenergetske mreže**

Opis zadatka:

Kroz diplomski rad biti će izrađen model za podršku operatoru distribucijskog i/ili prijenosnog sustava pri planiranju mreže, ali i investitorima u distribuiranu proizvodnju u prepoznavanju lokacija za instalaciju novih niskougličnih postrojenja. Nova postrojenja fotonaponskih elektrana, električnih vozila i dizalica topline stvaraju izazove za operatore distribucijskog sustava, i lokacijski i snagom, te zbog niske dogledljivosti mreže njihovo priključivanje na sustav može biti i vremenski i tehnički kompleksno. S druge strane investitori nemaju znanje o distribucijskoj mreži, dostupnim kapacitetima pa samim time i iznosu cjelokupne investicije koju će morati uložiti prilikom stvaranja uvjeta u mreži. Dodatno, distribucijske mreže su karakterizirane tehničkim i topološkim karakteristikama koje analize čine kompleksnijima u odnosu na slične analize u prijenosnim mrežama. U diplomskom radu biti će razvijen model, temeljen na geoinformacijskom sustavu, koji će temeljem dostupnim podacima i stanju i topologiji mreže vizualizirati trenutno dostupni slobodni kapacitet za instalaciju novih niskougličnih kapaciteta, ali i procijeniti potencijalno dostupnu fleksibilnost na promatranom dijelu mreže.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima koji su mi bili velika podrška za vrijeme studiranja, posebno se zahvaljujem profesoru Tomislavu Capuderu te gospodinu Hrvoju Keki na korisnim savjetima i naputcima. Također se zahvaljujem djelatnicima HEP-a koji su mi ustupili potrebne podatke bez kojih ovaj diplomski rad ne bi postojao u ovom obliku.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Fleksibilnost elektroenergetske mreže	3
3. Ograničena osmotrivost u distribucijskoj mreži	7
3.1. Napredne mreže	8
3.2. Aktivni korisnici	10
4. Pravila priključenja distribuiranih izvora električne energije na mrežu	13
4.1. Hrvatski Zakon o tržištu električne energije	14
5. Kapacitet mreže za prihvata	16
6. Općenito o otoku Šolti	20
6.1. Elektroenergetska infrastruktura	20
7. Metodologija rada	23
7.1. Prikupljanje i obrada podataka	23
8. Proračun dostupnog kapaciteta mreže za prihvata	30
8.1. Dostupni kapacitet mreže za prihvata potrošnje	32
8.2. Dostupni kapacitet mreže za prihvata proizvodnje	35
8.3. Analiza opterećenja TS sukladno naponskom ograničenju	37
9. Zaključak	45
Literatura	46
Sažetak	49
Summary	49
Skraćenice	51

1. Uvod

Trenutna elektroenergetska mreža, koja je tradicionalno bila dimenzionirana za najgori mogući scenarij („fit and forget“ pristup), konstruirana je s primarnim ciljem prijenosa električne energije iz velikih proizvodnih postrojenja do krajnjih potrošača. Ovaj tradicionalni model implicira pasivnu ulogu potrošača u kontekstu elektroenergetskog sustava. No, s rastućom energetsom tranzicijom, potrošači postaju sve aktivniji, sudjelujući u proizvodnji i upravljanju električnom energijom putem raznih tehnologija, kao što su fotonaponske elektrane, toplinske pumpe, baterije za pohranu energije i slično. Ovaj pomak u ulozi potrošača stvara potrebu za upravljanjem decentraliziranim izvorima energije, dvosmjernim tokovima snage i implementacijom odgovarajuće infrastrukture i zaštitnih uređaja. Tranzicija elektroenergetskog sustava označava sveobuhvatan proces prelaska s tradicionalnih, uglavnom fosilnih izvora energije, na obnovljive izvore energije (u daljnjem tekstu: OIE) i integraciju pametnih tehnologija. Ovaj proces ima globalne razmjere i ključnu ulogu u ostvarenju ciljeva održivog razvoja te smanjenju emisija stakleničkih plinova.

Brojni čimbenici potiču tranziciju elektroenergetskog sustava. Tehnološki napredak, kao i postupno smanjenje troškova OIE, posebno fotonaponskih elektrana i vjetroelektrana, čine ih ekonomski konkurentnima u odnosu na tradicionalne izvore poput ugljena ili nafte. Osim toga, rastuća svijest o klimatskim promjenama i potreba za smanjenjem emisija CO₂ dodatno potiču prelazak na čistu energiju. Važno je naglasiti da tranzicija elektroenergetskog sustava nije samo pitanje tehnologije, već i regulatornog okvira, ekonomije, društvenih promjena i promjena u ponašanju potrošača. Uspješna tranzicija zahtijeva suradnju svih dionika, uključujući vladu, industriju, akademsku zajednicu i potrošače. [1]

Europski zeleni plan (eng. Green Deal) [2] je strateški paket politika čiji cilj je učiniti Europu prvim klimatski neutralnim kontinentom do 2050. godine. Fit for 55" [3] paket, predstavljen 2021. godine, je ključni dio Europskog zelenog plana, usmjeren na smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 55% do 2030. godine u odnosu na razine iz 1990. godine. Ovaj zakonodavni paket obuhvaća različite sektore i politike, uključujući energetiku, promet, industriju i poljoprivredu. Ključne mjere uključuju proširenje sustava trgovine emisijama, postavljanje ambicioznijih ciljeva za udio OIE i energetske

učinkovitost te poboljšanje tržišnog okvira za električnu energiju. U 2021. godini, skoro 22% proizvedene električne energije proizvedeno je iz OIE; trenutni cilj je postići da najmanje 42.5% ukupne proizvedene energije u EU potječe iz OIE. Paket predstavlja ključan korak prema klimatskoj neutralnosti EU do 2050. godine, usmjeren na održiv razvoj i smanjenje emisija.

Aktivni kupac je krajnji kupac koji koristi, skladišti ili prodaje vlastitu energiju te sudjeluje u pružanju fleksibilnosti, bez da su te aktivnosti njegova primarna djelatnost. Umjesto samo potrošnje električne energije, aktivni kupci sada sudjeluju u proizvodnji, skladištenju i čak dijeljenju električne energije putem raznih tehnologija kao što su fotonaponske elektrane, napredna brojila, električna vozila, virtualne elektrane, mikromreže, baterije za pohranu energije i pametni kućanski uređaji. Njihova interakcija s elektroenergetskim sustavom mijenja tokove snaga te time stvara nova pogonska stanja u elektroenergetskoj mreži. Aktivni kupci mogu prilagođavati svoje potrošačke obrasce prema trenutnoj dostupnosti i cijeni električne energije te čak sudjelovati u programima za odziv potrošnje (eng. Demand Response).

Cilj ovog rada je izraditi model temeljen na geoinformacijskom sustavu koji će vizualizirati trenutno dostupni kapacitet za instalaciju novih niskougljičnih postrojenja, koristeći stvarne podatke dobivene mjerenjima koje pruža HEP – Operator distribucijskog sustava (u daljnjem tekstu: HEP ODS). Model će se temeljiti na analizi potrošnje električne energije od strane korisnika, uzimajući u obzir i promjenjivosti proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana. Ovaj model omogućit će analizu rada elektroenergetske mreže u uvjetima povećane integracije fotonaponskih elektrana.

2. Fleksibilnost elektroenergetske mreže

Daljnje povećanje udjela OIE u strukturi energetske izvora smatra se jednim od najvažnijih koraka prema dekarbonizaciji energetske sektora, uz povećanje učinkovitosti i sigurnosti opskrbe. Varijabilni obnovljivi izvori energije imaju zajedničke karakteristike [4]:

- dostupnost primarnog izvora energije (npr. vjetar, sunce, protok vode) izrazito varira
- teško je predvidjeti koliko energije će biti proizvedeno
- izlazna snaga električne energije ograničena je primarnim izvorom energije
- ovisni su o lokalnim uvjetima

Stoga, proizvodnja električne energije iz ovih izvora vrlo je varijabilna i u velikoj mjeri ne može se kontrolirati (osim mogućnosti ograničavanja u nekim slučajevima, međutim to je nepoželjno zbog gubitka potencijalno besplatne i čiste energije).

Ipak, što je veći udio OIE u mreži, potrebno je više rezervi za osiguravanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje. Naime, visoke razine proizvedene električne energije koje su spojene na mrežu preko elektroničkih pretvarača, kao što su vjetar i solarna energija, smanjuju rotacijske rezerve i inerciju sustava, što čini uravnoteženje sustava izazovnijim. Nadalje, varijabilna priroda OIE dovodi do naglih porasta ili padova proizvodnje koji se moraju kompenzirati fleksibilnijim resursima, npr. sinkronim strojevima. Međutim, zbog povećanja proizvodnje električne energije po nižoj cijeni iz OIE, većina konvencionalnih elektrana mora smanjiti ili potpuno zaustaviti svoju proizvodnju. Time se stvara izazov za elektroenergetski sustav jer upravo konvencionalne elektrane predstavljaju glavni izvor fleksibilnosti. Dakle, smanjenje proizvodnje električne energije iz konvencionalnih elektrana otežava održavanje stabilnosti elektroenergetskog sustava.

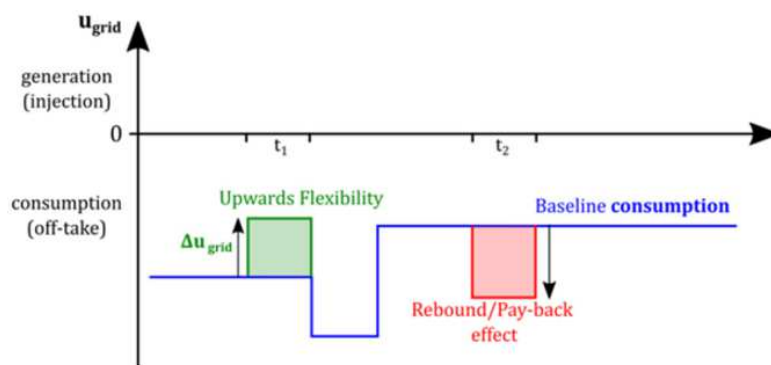
Uz tradicionalne resurse, tj. fleksibilnost na strani proizvodnje, druge opcije za povećanje fleksibilnosti elektroenergetske mreže uključuju:

- skladištenje (npr. sustavi hidroakumulacije i baterijski spremnici velikog kapaciteta)

- modernizacija mreže (npr. implementacija FACTS uređaja, naprednih mreža i On-load Tap Changers transformatora)
- fleksibilnost na strani potrošnje (npr. upravljivi potrošači).

Sustavi hidroakumulacije su najzastupljeniji i tradicionalni oblik skladištenja energije širom svijeta. Međutim, oni zahtijevaju specifične geografske značajke (npr. donji i gornji rezervoar vode), vodne resurse i skupu infrastrukturu, što dovodi do visokih kapitalnih troškova i značajnog vremena izgradnje. Isto tako, povećava se interes za primjenu baterija velikog kapaciteta u energetici. Međutim, visoki početni investicijski troškovi i dalje su prepreka njihovu širenju na tržištu. Također, nadogradnje mreže su kapitalno intenzivne i karakterizirane dugim vremenom realizacije (do 10 godina). Kao rezultat toga, modernizacija mreže, elektrane za pokrivanje vršne proizvodnje i fleksibilnost na strani potrošnje često predstavljaju jeftinije alternative. Uz navedeno, nesigurnost povezana s očekivanom budućom potrošnjom i rastom OIE stvara potrebu za korištenjem različitih izvora fleksibilnosti kao alternative širenju i nadogradnji mreže. U tom smislu, upravljanje potrošnjom pokazalo se kao učinkovito rješenje za smanjenje vršnog opterećenja i odgađanje troškova proširenja ili jačanja mrežne infrastrukture. [4]

Fleksibilni tereti, koji mogu prilagoditi svoju potrošnju električne energije na temelju vanjskih, poslanih signala, općenito se dijeli u dvije glavne kategorije: prebacive terete (eng. shiftable loads) i terete koji se mogu ograničiti (eng. curtailable loads) [4]. Tereti se definiraju kao prebacivi kada se dio potrošnje električne energije može pomaknuti u vremenu (ranije i/ili kasnije), u usporedbi s osnovnim ponašanjem (na slici 1 je plavom linijom prikazano osnovno ponašanje, zeleni pravokutnik predstavlja smanjenu potrošnju u vremenu t_1 , te crveni pravokutnik predstavlja povećanu tj. pomaknutu potrošnju u vremenu t_2). Tereti su ograničivi kada se potrošnja električne energije može smanjiti ili povećati (u trenutku pružanja fleksibilnosti) bez utjecaja na raniju ili kasniju potrošnju električne energije tog tereta (prikaz ograničivog tereta sličan je kao prikaz prebacivog tereta sa slike 1; mijenja svoje osnovno ponašanje – postoji zeleni pravokutnik koji predstavlja promjenu potrošnje električne energije u određenom vremenskom periodu, no ne postoji crveni pravokutnik u kasnijem vremenskom periodu).



Slika 1. Prikaz potrošnje prebacivog tereta kroz vrijeme [4]

Industrijski procesi (poput proizvodnje robe, rudarstva, eksploatacije kamenoloma itd.) imaju značajan potencijal za upravljanje potrošnjom upravo zbog toga što cijeli industrijski sektor potroši 37% ukupne proizvedene energije u svijetu [5]. Industrijski procesi smatraju se prebacivim teretima (za razliku od ograničivih) zbog efekta nadoknade koji se ne može izostaviti. Kućanski tereti mogu se općenito podijeliti na termičke potrošače i ne-termičke potrošače. Termički uređaji, poput klima uređaja, bojlera i hladnjaka, nude značajnu fleksibilnost u upravljanju potrošnjom energije, tj. spadaju u kategoriju prebacivih tereta. Također, uređaji poput perilice rublja, sušilice ili perilice posuđa imaju značajan potencijal za prebacivanje (europski potrošači u prosjeku prihvaćaju prebacivanje od 6 sati za te uređaje [6]). Ne-termički uređaji uključuju, primjerice, rasvjetu, potrošačku elektroniku i kuhanje, koji su usko povezani s aktivnostima i komforom korisnika. Među navedenim teretima, većina (npr. kuhanje, potrošačka elektronika) nije fleksibilna (ili bi mogla biti, ali u kategoriji ograničenja tereta). Kako je već objašnjeno, ograničenje tereta odnosi se na smanjenje tereta bez utjecaja na profil potrošnje nakon događaja ograničenja. Rasvjeta je tipičan primjer tereta koji se može ograničiti bez povratnog efekta. To uključuje kućnu rasvjetu (u manjoj mjeri), rasvjetu u komercijalnim zgradama ili industrijama (u većoj mjeri) te čak i javnu vanjsku rasvjetu. [4]

Dakle, upravljanje potrošnjom, tj. prilagođavanje obrazaca potrošnje prema potrebi elektroenergetskog sustava, omogućuje aktivno sudjelovanje krajnjih korisnika u stabilizaciji elektroenergetske mreže. Kada korisnici prilagođavaju svoju potrošnju, (npr. pomicanjem potrošnje na razdoblja kada je proizvodnja iz obnovljivih izvora viša, ili smanjenjem potrošnje u vrijeme kada je proizvodnja niska), oni pomažu u uravnoteživanju

ponude i potražnje. Ova prilagodba pomaže u smanjenju opterećenja na mreži i poboljšava njezinu učinkovitost, pouzdanost i sigurnost.

Također, bitno je spomenuti da se predviđa da će električna vozila (u daljnjem tekstu: EV) činiti 55% godišnje prodaje vozila do 2040. godine, što znači da će do tada 33% ukupnog broja automobila na cestama diljem svijeta biti električna. Procijenjuje se da će ovaj rast električnih vozila povećati potrošnju električne energije krajnjih korisnika za oko 11%-16% [7].

Iako široka primjena EV-ova postavlja nove izazove za elektroenergetski sustav (povećanje opterećenja mreže te velike fluktuacije u opterećenju, nadogradnja infrastrukture, upravljanje naponom i frekvencijom itd.), ona također otvara nove mogućnosti. Povećanje broja EV dovodi do većeg kapaciteta za pohranu energije, što znači veću fleksibilnost u mreži. Prilagođavanjem ciklusa punjenja EV-ova prema uvjetima u mreži, pametne strategije punjenja EV-ova mogu pružiti širok raspon usluga na različitim razinama mreže:

- pomoćne usluge na razini operatora prijenosnog sustava (u daljnjem tekstu: OPS),
- kontrolu napona i upravljanje lokalnim zagušenjima na razini operatora distribucijskog sustava (u daljnjem tekstu: ODS),
- uravnoteženje portfelja za energetske kompanije
- povećanje vlastite potrošnje lokalno proizvedene električne energije te pružanje rezervnog napajanja tijekom nestanka struje na razini krajnjih korisnika [8]

Dva ključna aspekta koja se moraju uzeti u obzir kod fleksibilnosti EV-ova su vrijeme i lokacija. Naime, EV-ovi mogu biti na cesti kada sustav treba njihov kapacitet pohrane, što je teško predvidjeti. Osim toga, unatoč napretku u infrastrukturi punionica, EV-ovi možda neće imati pristup dvosmjernim punjačima za usluge na određenim lokacijama. Također, nisu sve punionice kompatibilne sa svim vrstama punjenja koje zahtijevaju različiti modeli EV-ova (npr. drugačija vrsta priključka ili brzina punjenja) [7].

3. Ograničena osmotrivost u distribucijskoj mreži

U distribucijskoj mreži elektroenergetskog sustava, ograničena osmotrivost predstavlja značajan izazov za operatore. Distribucijska mreža karakterizirana je velikim brojem priključaka, što uključuje širok spektar korisnika od kućanstava do industrijskih pogona. Ova kompleksnost te razgranatost mreže otežava precizno praćenje stanja mreže na svim razinama. Informacije sa mjernih uređaja koje su dostupne često su ograničene na ključne točke, kao što su transformatorske stanice koje se nalaze na višim naponskim razinama. Također, većina tih mjernih uređaja prikuplja isključivo obračunske podatke, odnosno agregiranu potrošnju krajnjih korisnika, dok samo neki uređaji bilježe i procesne podatke poput mjerenja napona po fazama. Kao rezultat, detaljna slika o dinamičkim uvjetima u mreži ostaje nepoznata, zbog čega je operatorima sustava otežano održavanje sigurnosti sustava [9].

Nedostatak informacija o stanju distribucijske mreže može dovesti do brojnih problema u vođenju elektroenergetskog sustava. Nepostojanje preciznih podataka o naponskim i strujnim uvjetima u mreži otežava identifikaciju i rješavanje problema preopterećenja, padova napona i drugih anomalija. Ove anomalije mogu izazvati neefikasnosti u radu mreže, povećanje gubitaka energije i, u najgorem slučaju, kvarove koji mogu rezultirati prekidima u opskrbi električnom energijom.

Kao odgovor na ove izazove, postoji potreba za implementacijom naprednih sustava za mjerenje i upravljanje distribucijskom mrežom. Uvođenje naprednih brojlara i integriranje informacijsko-komunikacijskih tehnologija može značajno poboljšati osmotrivost i omogućiti operaterima da prikupe i analiziraju podatke u stvarnom vremenu. Ova poboljšanja ne samo da povećavaju sposobnost operatera da pravovremeno identificiraju i riješe probleme, već također omogućuju bolju optimizaciju mreže, povećanje energetske efikasnosti i poboljšanje pouzdanosti opskrbe električnom energijom.

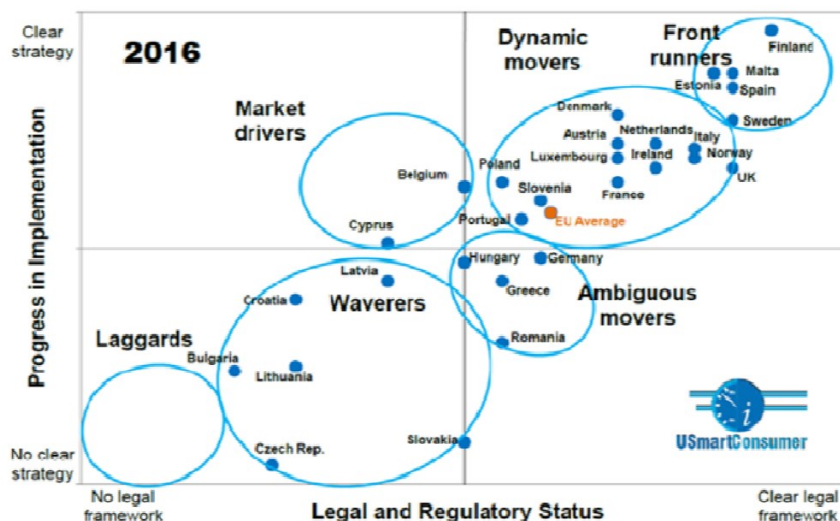
3.1. Napredne mreže

Tradicionalna elektromehanička brojila služila su isključivo za mjerenje potrošnje električne energije, a očitavanja su se morala vršiti ručno od strane ovlaštenih djelatnika elektrodistribucije. Ova brojila nisu imala mogućnost pružanja detaljnih informacija o potrošnji u stvarnom vremenu niti su mogla otkriti anomalije poput prekida u opskrbi ili naglih promjena u potrošnji. U usporedbi s modernim digitalnim i naprednim brojilima, elektromehanička brojila bila su ograničena u mogućnostima, jer nisu omogućavala dvosmjernu komunikaciju, daljinsko očitavanje niti detaljne analize potrošnje. [10]

Napredna mreža (eng. Smart Grid) je elektroenergetska mreža koja koristi napredne digitalne tehnologije za učinkovitiji, pouzdaniji i održiviji prijenos i distribuciju energije. Omogućuje dvosmjernu komunikaciju između potrošača i sustava u stvarnom vremenu, kao i integraciju obnovljivih izvora energije. Također, omogućuje korisnicima električne energije kontrolu nad potrošnjom, što rezultira smanjenjem troškova električne energije. Napredna mreža koristi informacijsko-komunikacijske tehnologije, poput naprednih brojila, raspoređenih kod krajnjih potrošača, za praćenje i upravljanje razmjenom energije između proizvođača i potrošača. Na taj način omogućava nadzor u stvarnom vremenu i visoko precizno upravljanje sustavom u svakom trenutku. [11]

Uvođenje naprednih brojila u distribucijske mreže postalo je ključan cilj Europske unije kroz Treći energetske paket iz 2009. godine, koji obvezuje zemlje članice da, uz dokazane koristi kroz dugoročne studije troškova i dobiti, do 2020. godine instaliraju napredna brojila u 80% kućanstava. [12]

Različite zemlje EU pristupile su implementaciji naprednih brojila na različite načine, ovisno o njihovim pravnim okvirima i strategijama implementacije. Zemlje unutar EU nisu ujednačene u procesu ugradnje naprednih brojila, što je vidljivo na slici 2 iz izvještaja USmartConsumer-a.



Slika 2. Napredak u implementaciji naprednih brojila u zemljama EU [12]

Dok su neke zemlje napredovale i definirale jasne planove, druge kaskaju u primjeni, poput Hrvatske, Češke i Slovačke. Ova nejednačenost uvođenja naprednih brojila ukazuje na izazove u usklađivanju zakonodavstva i strategija na europskoj razini, unatoč zajedničkim ciljevima. Napredna brojila imaju potencijal transformirati upravljanje energetske sustavima, ali njihova implementacija ovisi o lokalnim infrastrukturnim i regulatornim uvjetima. [12]

Napredni mjerni sustav (eng. Advanced Metering Infrastructure) igra ključnu ulogu u razvoju napredne mreže. Napredni mjerni sustav omogućuje precizno i kontinuirano mjerenje potrošnje energije u stvarnom vremenu, koristeći digitalna brojila koja bilježe podatke u kratkim vremenskim intervalima. Kroz dvosmjernu komunikaciju, napredni mjerni sustav osigurava stalni protok informacija između potrošača i operatora mreže, omogućujući automatizirano očitavanje digitalnih brojila i brže otkrivanje kvarova. Integracija naprednog mjernog sustava unutar napredne mreže omogućuje optimizaciju upravljanja potrošnjom energije (preciznije praćenje potrošnje), smanjenje operativnih troškova (ne postoji potreba za ručnim očitavanjem brojila) te podršku za OIE (uvid u proizvodnju te usklađivanje potrošnje s varijabilnim OIE). [10] Ovaj sustav također doprinosi poboljšanju pouzdanosti mreže putem metoda samooporavka i identifikacije problema prije nego što izazovu ozbiljnije posljedice. Dakle, napredni mjerni sustav

postaje ključna komponenta u postizanju učinkovitije, pouzdanije i održivije elektroenergetske mreže.

3.2. Aktivni korisnici

U trenutnoj elektroenergetskoj mreži, većina potrošača u potpunosti je pasivna te nemaju nikakvog kontakta sa tržištem električne energije. Oni kupuju električnu energiju po fiksnim, ugovorenim tarifama koje je odredio njihov opskrbljivač te jednostavno koriste električnu energiju prema svojim potrebama. Za razliku od tradicionalnih pasivnih korisnika, aktivni korisnici su sudionici koji ne samo da koriste električnu energiju, već i aktivno sudjeluju u njenoj proizvodnji, skladištenju i upravljanju potrošnjom. Takvi korisnici često posjeduju tehnologije poput fotonaponskih panela, vjetroturbina, baterijskih sustava za pohranu energije i pametnih uređaja za upravljanje potrošnjom. Oni mogu sudjelovati na tržištima električne energije, nudeći usluge kao što su upravljanje opterećenjem, uravnoteženje mreže i pružanje rezervne snage.

Tehnološki napredak i svijest među korisnicima znatno su potaknuli programe upravljanja potrošnjom kao pouzdanu opciju koja doprinosi smanjenju troškova i emisija štetnih plinova, kao i povećanje pouzdanosti elektroenergetskog sustava. Ovo je u skladu s modernim trendom održive i obnovljive energije u mrežama. Stoga, upravljanje potrošnjom može se koristiti za ublažavanje negativnih učinaka koji proizlaze iz nepredvidivog ponašanja proizvodnje obnovljive energije. Strategije vremenskog pomicanja potrošnje i ograničenja potrošnje (što odgovara korisnicima jer kupuju električnu energiju po nižoj cijeni) služe pružanju usluga fleksibilnosti elektroenergetskog sustava. [13] Također, programi upravljanja potrošnjom, konkretno smanjivanje potrošnje u trenucima vršnog opterećenja sustava, može spriječiti ili odgoditi potrebu za izgradnjom novih kapaciteta za proizvodnju, prijenos i distribuciju, što indirektno rezultira uštedama za korisnike. [14].

Također, programi upravljanja potrošnjom dolaze s različitim koristima u pogledu troškova za potrošače i proizvođače. Što se tiče korisnika, smanjuju prosječnu veleprodajnu cijenu električne energije. S druge strane, što se tiče proizvođača, smanjuju se operativni troškovi

(nije potrebna aktivacija plinskih ili dizelskih elektrana, koje se koriste za pokrivanje vršne potrošnje, te ne postoje svi troškovi povezani sa aktivacijom vršnih elektrana).

Metoda određivanja cijena temeljena na vremenu korištenja (eng. Time of Use: ToU) određuje cijenu električne energije koja ovisi o dobu dana. Općenito, ToU metoda raspodjeljuje dan u različite faze prema varijacijama u potrošnji energije i cijenama. Potrošnja energije tijekom sati vršnog opterećenja značajno povećava račun za električnu energiju. Stoga, ToU cijene potiču potrošače da iskoriste niske cijene tijekom vanjskih sati pomicanjem vršnih opterećenja u vanjske sate. Programi upravljanja potrošnje temeljeni na vremenu korištenja jednostavni su za praćenje. Međutim, određivanje cijena bazirano na vremenu korištenja postalo je nepovoljno, jer pomicanje opterećenja stvara nove vrhunice. Stoga je bitno u programima koji su bazirani na ovom pristupu smanjiti formiranje novih vrhunaca tijekom pomicanja opterećenja.

S teoretske perspektive, metoda naplate u stvarnom vremenu (eng. Real Time Pricing: RTP) smatra se najučinkovitijom tehnikom upravljanja potrošnjom. U ovoj metodi, cijena električne energije mijenja se u stvarnom vremenu kao odgovor na cjenovnu situaciju na veleprodajnom tržištu. Dinamične fluktuacije cijena šalju se korisnicima na satnoj ili dnevnoj bazi. To omogućuje prodavačima da sudjeluju u zadacima distribucije energije s manje rizika. Nadalje, programi bazirani na ovom pristupu potiču potrošače da prilagode svoje potrošačke rutine kako bi ostvarili veće novčane koristi. Implementacija ovog pristupa zahtijeva potpuno razvijene infrastrukture naprednog mjerenja. Ipak, čak i uz potrebne hardverske implementacije, kućanstva i dalje oklijevaju prihvatiti ovu metodu zbog nedostatka sposobnosti reagiranja na fluktuacije cijena u stvarnom vremenu.

Ključni cilj tarife za kritičnu vršnu snagu (eng. Critical Peak Pricing: CPP) održavanje je pouzdanosti elektroenergetskog sustava. U okviru ovog programa, potrošači su obaviješteni unaprijed o razdobljima vršnog opterećenja, a tijekom tih razdoblja nastaju znatno veće cijene za električnu energiju nego u normalnim uvjetima. Navedena tarifa uvodi se kada je elektroenergetski sustav u ranjivom stanju zbog izuzetno visokih zahtjeva što se tiče opterećenja, cijena na veleprodajnom tržištu ili kada postoji manjak proizvodnje. [15] Stoga se ova tarifa ne smatra dnevnim programom upravljanja potrošnje i može se koristiti uz metodu naplaćivanja koja je temeljena na vremenu korištenja. U ovoj tarifi, sudionici koji doprinose pouzdanosti sustava pomicanjem vršnog opterećenja ili smanjenjem vršnog opterećenja imaju pravo na popuste tijekom nekritičnih vršnih sati. Iako su ovakvi programi dobri u pomicanju vršne potrošnje energije, manje su korisni u

smislu smanjenja troškova jer se ne primjenjuju kontinuirano kao prethodno navedeni programi upravljanja potrošnjom. Također, učinkovitost ove tarife ovisi o sposobnosti korisnika da prilagode svoju potrošnju u skladu s promjenama cijena i obavijestima o vršnim periodima. [13].

Upravljanje energijom putem programa upravljanja potrošnje dobro je uspostavljen koncept, iako se stvarna primjena još uvijek odvija sporo. Mnogi razlozi utječu na implementaciju upravljanja potrošnje, a nedostatak informacijsko-komunikacijske tehnologije jedan je od ključnih izazova. Sofisticirani sustavi mjerenja, upravljačke strategije, komunikacijski sustavi i druge informacijske tehnologije nisu adekvatno dostupni u trenutnim distribucijskim i prijenosnim elektroenergetskim sustavima. Iako je unapređenje infrastrukture presudno za širenje stvarnih primjena, značajnu prepreku predstavlja potreba za velikim investicijama. Implementacija programa upravljanja potrošnje u elektroenergetski sustav povećava ukupnu složenost jer zahtijeva dodatne mehanizme kontrole. Međutim, značajne koristi kao što su smanjeni troškovi i upravljanje nesigurnošću, koje donose programi upravljanja potrošnjom, potaknut će njihovu implementaciju u bliskoj budućnosti, unatoč zahtjevima složenosti. Još jedna zabrinutost je oklijevanje potrošača u prihvaćanju mehanizama upravljanja potrošnjom. To je uglavnom zbog nedostatka informiranosti i narušenog korisničkog komfora. Korisnici nisu dobro informirani o koristima i poticajima, iako je očita nelagoda koja proizlazi iz programa upravljanja potrošnjom.

4. Pravila priključenja distribuiranih izvora električne energije na mrežu

Tijekom postupka priključenja novog korisnika mreže analiziraju se mogućnosti priključka, određuje se tehničko rješenje priključka te tehnički, ekonomski i ostali uvjeti priključenja građevine na mrežu, zajedno sa uvjetima izgradnje priključka i stvaranja tehničkih uvjeta u mreži. Zahtjeve u postupku priključenja može podnositi investitor, vlasnik građevine ili projektant.

Postupak priključenja proizvođača i operatora skladišta energije provodi se u svrhu ishoda energetske odobrenja za izgradnju proizvodnog postrojenja odnosno postrojenja za skladištenje energije, sukladno odredbama Zakona o tržištu električne energije (u daljnjem tekstu: ZOTEE) [16]. Obuhvaća izradu Elaborata mogućnosti priključenja (u daljnjem tekstu: EMP) koji se izrađuje u svrhu sagledavanja mogućih opcija priključenja na mrežu kod priključenja ili povećanja priključne snage proizvođača i operatora skladišta energije. U okviru EMP-a ne provodi se analiza tehničkih uvjeta u dubini mreže. Umjesto toga, provjerava se usklađenost priključenja proizvodnog postrojenja ili postrojenja za skladištenje energije s odredbama Mrežnih pravila. Ta pravila definiraju maksimalnu priključnu snagu svih proizvodnih postrojenja koja se mogu priključiti na SN mrežu napajanu iz TS VN/SN, uzimajući u obzir trenutni desetogodišnji plan razvoja mreže operatora distribucijskog sustava.

Nakon ishoda energetske odobrenja, izrađuje se Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja (u daljnjem tekstu: EOTRP) radi procjene mogućnosti uz provjeru tehničkih uvjeta u mreži, uvjeta priključenja u svrhu idejnog ili glavnog projekta, utvrđivanja optimalnog tehničkog rješenja te procjene troškova priključka i stvaranja tehničkih uvjeta u elektroenergetskoj mreži. Optimalno tehničko rješenje priključenja na mrežu iz EOTRP-a za proizvođača odnosno operatora skladišta energije može odstupati od razmatranih opcija izvedbe priključka iz EMP-a.

EES se izdaje u svrhu utvrđivanja posebnih uvjeta i uvjeta priključenja za novu građevinu koja se priključuje na mrežu. Također izdaje se i u svrhu priključenja posebne zone, povećanja priključne snage, promjene na priključku, priključka namijenjenog privremenom ili povremenom korištenju te priključka gradilišta. EES uvjetuje izradu Elaborata utjecaja

na elektroenergetsku mrežu (u daljnjem tekstu: EUEM) i Elaborata podešenja zaštite (u daljnjem tekstu: EPZ), prema kriterijima definiranim Mrežnim pravilima. Navedeni elaborati nisu potrebni kod proizvodnog postrojenja instalirane snage do 50 kVA. Svrha EUEM-a je analiza raznih varijanti utjecaja instalacije građevine korisnika na strujno naponske okolnosti u razmatranoj mreži te analiza utjecaja postrojenja na kvalitetu napona u mreži. Svrha EPZ-a je prikaz električnih veličina kod simulacije kvarova te sukladno tome analizu djelovanja zaštite, tj. podešenja zaštitnih uređaja u mreži i postrojenju korisnika mreže.

Uvjet za početak korištenja mreže je sklapanje ugovora o opskrbi krajnjeg kupca odnosno uređenje odnosa za otkup električne energije i/ili pripadnost bilančnoj grupi. Operativni plan i programa ispitivanja u pokusnom radu (u daljnjem tekstu: OPIP) izrađuje se kada je u EES uvjetovan pokusni rad. Pokusni rad je niz ispitivanja u stvarnim pogonskim uvjetima kojima se utvrđuje spremnost instalacije korisnika mreže za udovoljavanje zahtjevima iz EES, Mrežnih pravila i ostalih propisa koji reugliraju uvjete priključenja. Sastoji se od slijedećih ispitivanja:

- provjera spremnosti instalacije korisnika mreže za stavljanje priključka pod napon
- provjera sposobnosti i instalacije korisnika mreže za normalni pogon s mrežom
- verifikacijska ispitivanja kojima se potvrđuje udovoljavanje traženim zahtjevima prema uvjetima iz EES, Mrežnih pravila i drugih propisa koji reguliraju uvjete priključenja
- mjerenje kvalitete napona na OMM-u korisnika mreže

Nakon zaprimanja konačnog izvješća o pokusnom radu, ODS u roku od 30 dana izdaje korisniku mreže potvrdu za trajni pogon.

4.1. Hrvatski Zakon o tržištu električne energije

Nedavno usvojeni hrvatski Zakon o tržištu električne energije [16] propisuje da regulatorno tijelo treba osigurati poticaje ODS-u za nabavu usluga fleksibilnosti, uključujući upravljanje zagušenjem u suradnji s OPS-om, radi poboljšanja učinkovitosti rada i razvoja distribucijskog sustava, te promicanja usvajanja mjera energetske učinkovitosti.

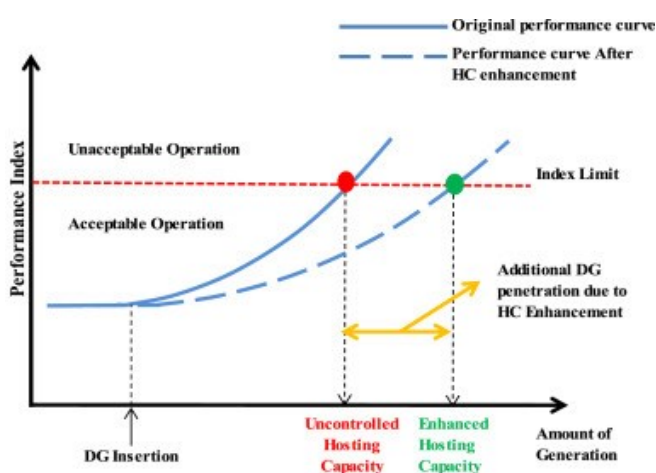
Regulativni okvir osigurava da ODS može nabavljati usluge od pružatelja koje učinkovito smanjuju potrebu za nadogradnjom ili zamjenom opreme u mreži te podržavaju učinkovito i sigurno funkcioniranje distribucijskog sustava. ODS treba nabavljati takve usluge u skladu s transparentnim, nediskriminirajućim i tržišno utemeljenim postupcima, osim ako regulatorna tijela utvrde da nabava takvih usluga nije ekonomska ili da bi takva nabava dovela do ozbiljnih poremećaja na tržištu ili do veće zagušenosti.

Do 30. rujna svake godine, ODS treba podnijeti regulatornom tijelu obrazloženi zahtjev za pristup fleksibilnosti i pomoćnih usluga koje se ne mogu nabaviti putem tržišno utemeljenih postupaka, uključujući procjenu budućih izgleda (preduvjeta) za pristup određenom proizvodu i usluzi na tržišnim principima.

Zakon (članak 75., stavak 8) navodi da ODS svake godine treba sastaviti i objaviti transparentan plan razvoja mreže (u daljnjem tekstu: 10G plan) te ga podnijeti regulatornom tijelu koje može zatražiti izmjene. 10G plan treba pružiti transparentnost o srednjoročnim i dugoročnim potrebama za uslugama fleksibilnosti i predstaviti planirane investicije za sljedećih deset godina, s posebnim naglaskom na glavnoj distribucijskoj infrastrukturi potrebnoj za povezivanje novih kapaciteta za proizvodnju i nova opterećenja, uključujući punionice za električna vozila.

5. Kapacitet mreže za prihvata

Kapacitet mreže za prihvat (eng. Hosting capacity: HC) predstavlja maksimalnu količinu nove proizvodnje ili potrošnje koja se može priključiti u elektroenergetsku mrežu, a da se pritom ne narušava stabilnost i sigurnost elektroenergetskog sustava te kvaliteta električne energije. [17] Kapacitet mreže za prihvat nije fiksna broj u kontekstu vremena – ukoliko se mrežu unaprijeđuje (npr. dodatni elementi za pohranu, nova oprema u mreži) nastaje novi prostor za priključenje novih izvora energije, što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Shema povećanja kapaciteta mreže za prihvat [18]

Konvencionalni način povećavanja kapaciteta mreže za prihvat uključuje polaganje novih dalekovoda, dodavanje dalekovoda s većim presjecima žica te instaliranje transformatora većih kapaciteta. Međutim, danas postoji niz dodatnih tehničkih mogućnosti za povećanje kapaciteta mreže za prihvat, neki od njih su primjena naprednih tehnologija (npr. napredne mreže), implementacija sustava za pohranu energije te programa upravljanja potrošnjom. [19]

Tijekom određivanja kapaciteta mreže za prihvat, važno je uzeti u obzir nekoliko pokazatelja kako bi se procijenila sposobnost elektroenergetske mreže da integrira nove kapacitete OIE [19]. Neki ključni pokazatelji su:

- **Odstupanje od propisanih granica napona:** potrebno je modeliranje karakteristika grane, duljine grane i odabira najgorih sati kako bi se ODS-ovi mogli

pripremiti za probleme s kojima će se suočiti u budućnosti.. Najistaknutija tehnika za ublažavanje prenaponskih i podnaponskih uvjeta je upotreba On-Load Tap Changer transformatora (u daljnjem tekstu: OLTC) koji održavaju napon unutar definiranih granica. OLTC transformator omogućava promjenu broja namotaja, time i promjenu vrijednosti napona na stezaljkama, pod opterećenjem.

- **Preopterećenje opreme:** veća penetracija fotonaponskih elektrana uzrokuje više termičkog preopterećenja opreme, posebno distribucijskih kabela. Stoga će veća vrijednost amperaže kabla omogućiti ODS-ima veću penetraciju fotonaponskih elektrana i time veću vrijednost kapaciteta mreže za prihvata.
- **Nesimetrija napona:** nesimetrija napona u niskonaponskim distribucijskim mrežama uzrokuje neravnomjerno opterećenje faza, što može dovesti do preopterećenja komponenti mreže poput transformatora i kabela. To smanjuje učinkovitost mreže, uzrokuje varijacije u napajanju korisnika te povećava gubitke energije i operativne troškove. Globalni standardi utvrdili su prihvatljivu nesimetriju napona u niskonaponskim distribucijskim sustavima unutar 1-3% nominalnog napona. Međutim, njegova vrijednost nije strogo primijenjena u različitim distribucijskim područjima.
- **Treperenje napona:** ove brze kratkotrajne oscilacije napona mogu negativno utjecati na rad osjetljive električne opreme. Treperenje napona povezano je s intermitentnošću opterećenja u tradicionalnoj mreži, ali s integracijom distribuiranih izvora u mreži, intermitentnost proizvodnje također može izazvati treperenje napona.
- **Harmonici:** nove metode proizvodnje energije, promjene u potrošačkom ponašanju i integracija aktivne elektronike u električne sustave uzrokuju pojavu problema s harmonicima, što rezultira lošijom kvalitetom energije, većim gubicima i ograničenjem učinkovitosti sustava, te konačno ograničenjem kapaciteta mreže za prihvat.

Tijekom odabira pristupa za određivanje kapaciteta mreže za prihvat u promatranom dijelu mreže potrebno je obratiti pozornost na ciljeve istraživanja, dostupnost podataka, kompleksnost mreže, rezoluciju podataka i slično. Osnovni pristupi određivanja kapaciteta mreže za prihvat u mreži su [20]:

- **Deterministički pristup:** pristup koji se temelji na korištenju fiksnih ulaznih podataka, provodi proračune tokova snage i određuje jedinstvenu vrijednost kapaciteta mreže za prihvata. Jednostavan je za implementaciju i razumijevanje te daje konzervativne procjene. Ne može uključiti varijabilne podatke u model i zanemaruje dinamičku prirodu elektroenergetskog sustava.
- **Stohastički pristup:** pristup koji uzima u obzir varijabilnost ulaznih podataka, tj. koristi funkcije vjerojatnosti varijabilnih podataka, što će dovesti do realističnijih rezultata. Često se koriste Monte Carlo simulacije za generiranje različitih scenarija te se dobiva preciznija procjena. S druge strane, složeniji je za implementaciju jer zahtijeva više podataka i resursa za simulacije.
- **Pristup vremenskih nizova:** pristup koji koristi stvarna mjerenja varijabli iz elektroenergetskog sustava i korelira obrasce proizvodnje i potrošnje. Odražava stvarne uvjete u elektroenergetskoj mreži. No, zahtijeva velike količine podataka i napredne analitičke alate za analizu.

Kada se određuje kapacitet mreže za prihvat na određenoj lokaciji ili za određeni dio mreže, nekoliko neizvjesnosti igra ulogu. Neizvjesnost u kojoj se najviše raspravlja i proučava je varijabilnost proizvodnje vjetroelektrana ili solarnih elektrana tijekom vremena. Naravno, nije moguće precizno predvidjeti proizvodnju solarne ili vjetroelektrane nekoliko dana unaprijed, čak niti nekoliko sati unaprijed. Međutim, na temelju nekih osnovnih informacija o veličini postrojenja, moguće je s određenom točnošću dobiti vjerojatnosne distribucije za količinu proizvodnje solarne ili vjetroelektrane na određenoj lokaciji. Rijeđe raspravljane neizvjesnosti su [21]:

- Hoće li OIE biti spojem na trofaznu ili jednofaznu mrežu (ako je spoj jednofazan, na koju fazu će se spojiti)?
- Koja je lokacija korisnika?
- Koji je smjer i nagib solarnih panela (u slučaju fotonaponske elektrane)?
- Koja vrsta i broj pretvarača će se koristiti?
- Hoće li postojati uređaj za pohranu energije na lokaciji?
- Hoće li pretvarač biti opremljen kontrolom napona i jalove snage?

Odgovori na sva ova pitanja trebaju biti poznati prije nego što se može izračunati točan kapacitet prihvata. Međutim, odgovori će vjerojatno biti nepoznati. Može se donijeti obrazovana pretpostavka ili je potreban stohastički pristup.

6. Općenito o otoku Šolti

Otok Šolta smješten je u južnoj Hrvatskoj, u zapadnom dijelu Splitsko-dalmatinske županije. Zauzima središnji položaj u Dalmaciji te je orijentiran u smjeru sjeverozapad-jugoistok.

Na Šolti se nalazi ukupno 8 naselja; Donje Selo, Gornje Selo, Grohote, Maslinica, Nečujam, Rogač, Srednje Selo i Stomorska. Na Šolti se nikada nije razvio grad, s obzirom na blizinu grada Splita i činjenici da postoji dobra povezanost sa gradom Splitom kojem je Šolta uvijek gravitirala. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine na području općine Šolta živjelo je 1700 stanovnika. Demografske promjene na otoku karakterizira stalni pad broja autohtonih stanovnika, visok udio starije populacije i niska stopa fertiliteta. Međutim, zbog velike razvedenosti obale, ugodne klime i privlačne vegetacije, otok Šolta ima razvijen turizam tijekom ljetnih mjeseci.

Otok Šolta ima jadranski tip mediteranske klime s vrućim, suhim ljetima i blagim, vlažnim zimama. Najviše padalina javlja se u kasnu jesen, a najmanje ljeti. Šolta je jedan od najsunčanijih dijelova Jadrana s 2697 sunčanih sati godišnje i prosječnim dnevnim trajanjem sunca od 7,39 sati.

Šolta je oduvijek imala raznoliko, ali nedovoljno razvijeno gospodarstvo koje su činili turizam, poljoprivreda, industrija i zanatstvo. Danas gospodarstvo otoka gotovo ne postoji osim u ugostiteljstvu i trgovini. Unatoč potencijalu za razvoj turizma, poljoprivrede i ribarstva, ti sektori nisu dovoljno iskorišteni i tek trebaju biti valorizirani u budućnosti. [22]

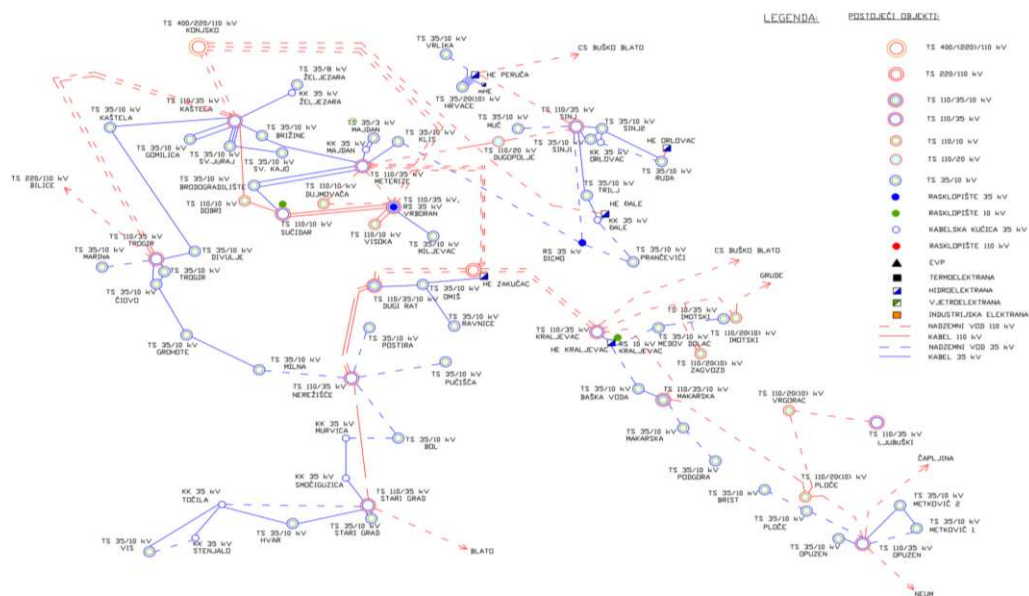
6.1. Elektroenergetska infrastruktura

Otok Šolta pripada u distribucijsko područje Elektrodalmacija Split. Na slici 4 prikazana je shema distribucijskog područja te kako je cijeli otok Šolta povezan sa ostatkom elektroenergetske mreže sa dva 35 kV podmorska kabela. Osnovno napajanje otoka ostvareno je sa transformatorskom stanicom TS Grohote 35/10 kV, instalirane snage 2x4 MVA, koja je povezana sa sjeverne strane sa transformatorskom stanicom TS Čiovo 35/10

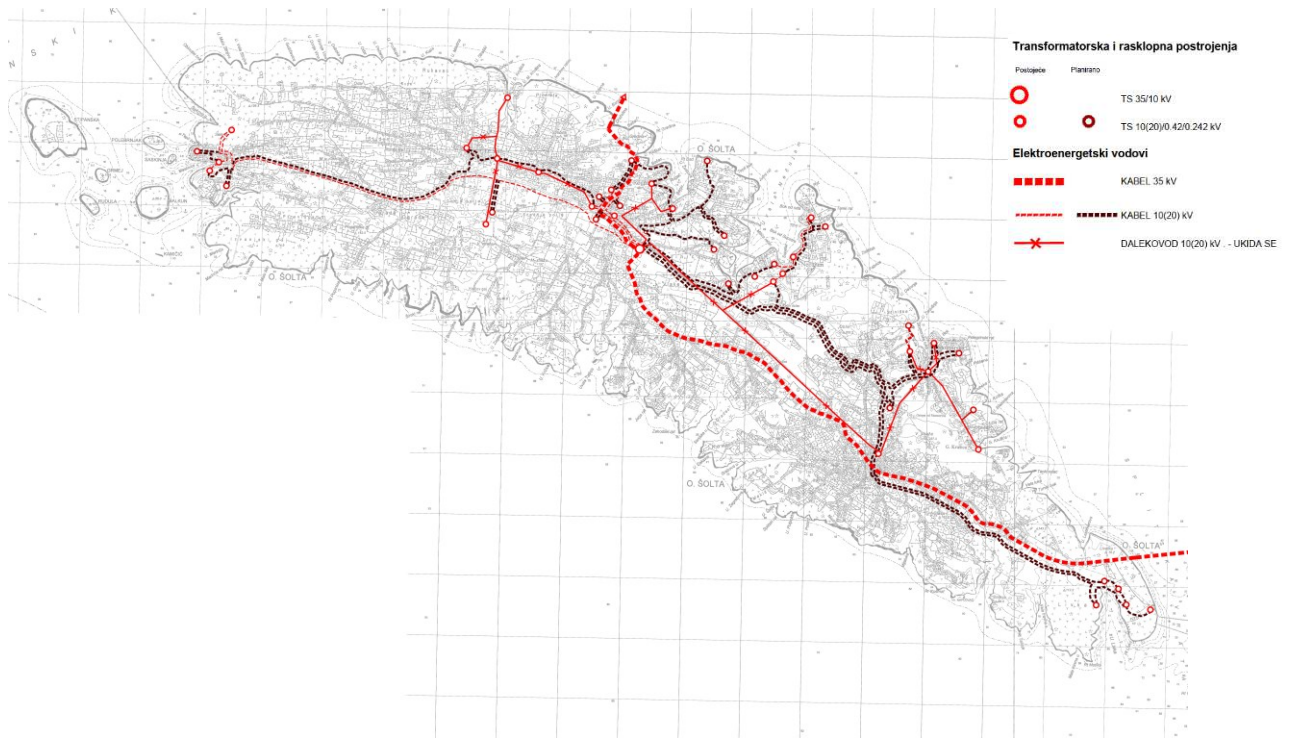
kV, koja se nalazi na otoku Čiovu, te sa jugoistočne strane sa transformatorskom stanicom TS Milna 35/10 kV, koja se nalazi na otoku Braču.

Energetski sustav otoka Šolte podijeljen je u tri glavne zone prema koncentraciji i rasporedu potrošača: zapadna, središnja i istočna zona. Zapadna zona obuhvaća područje naselja Maslinica, dok istočna zona uključuje naselja Stomorska i Gornje Selo. Središnja zona je najveća po opsegu i potrošnji električne energije, te obuhvaća naselja Grohote, Donje Selo, Srednje Selo, Rogač i Nečujam.

Na slici 5 prikazan je uvećani plan elektroenergetske mreže otoka Šolte zajedno sa planiranim budućim transformatorskim stanicama.



Slika 4. Elektroenergetska infrastruktura Elektrodalmacije Split [23]



Slika 5. Elektroenergetska infrastruktura otoka Šolte [24]

7. Metodologija rada

7.1. Prikupljanje i obrada podataka

U svrhu izrade ovog diplomskog rada, HEP ODS je ustupio izmjerene podatke za 26 10(20)/0,4 kV transformatorskih stanica na otoku Šolti. Sve navedene transformatorske stanice povezane su sa transformatorskom stanicom TS 35/10 kV Grohote na otoku Šolti.

Podaci obuhvaćaju detaljna mjerenja o snazi, struji, naponu (po fazama i/ili tarifama), strujnoj i naponskoj nesimetriji, faktoru snage te ukupnom harmoničkom izobličenju. Mjerna preciznost u pravilu iznosi 10 ili 15 minuta. Dostavljena mjerenja sežu sve do 1.1.2000. godine. Ukupno postoji 51 979 880 podataka koji su mjereni u rasponu od 1.1.2000. godine do 8.4.2024. godine. Zbog značajne disperzije podataka s obzirom na vrijeme mjerenja, za ovaj rad koristili su se podaci od 1.1.2023. godine do 1.1.2024. godine. Unutar navedenog raspona nalazi se čak 33 523 078 mjerenja, što omogućuje temeljitu analizu te uvid u obrasce ponašanja priključenih korisnika u promatranom dijelu mreže. Za obradu ovako velikog seta podataka korišten je softver Dbeaver [25].

U tablici 1 prikazani su osnovni podaci svih 26 distribucijskih TS nazivnih napona 10(20)/0,4 kV.

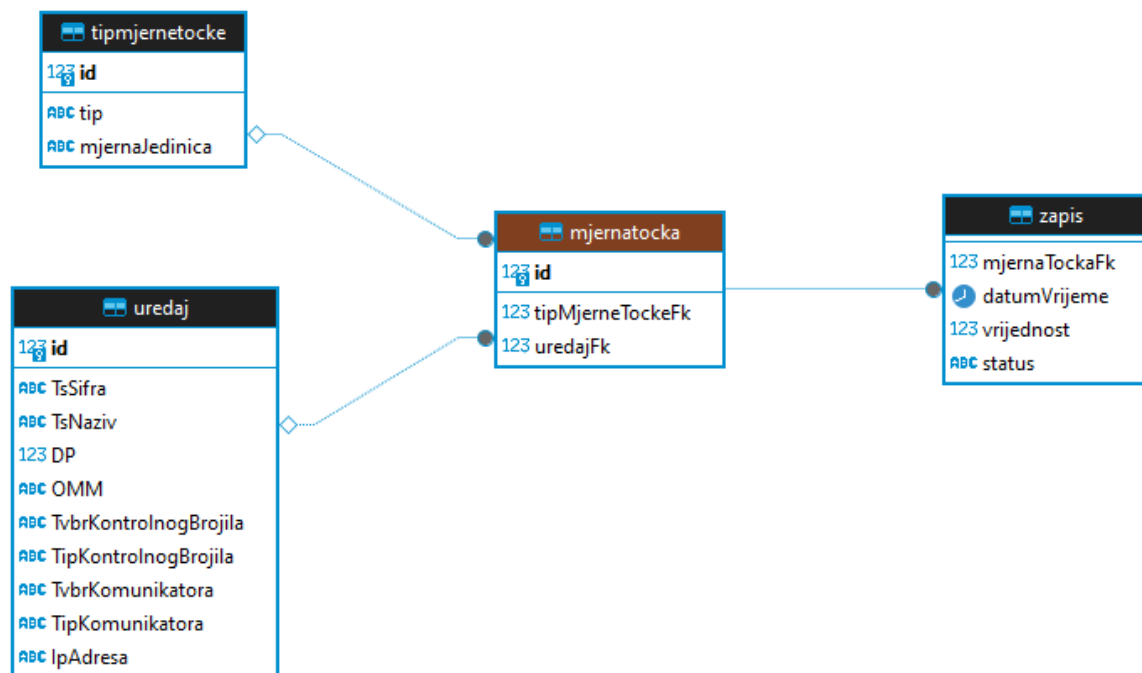
Tablica 1. TS u razmatranoj mreži

Broj TS	Šifra TS	Naziv TS
1.	1TS576_TS DONJE SELO 1	TS Donje Selo 1
2.	1TS638_TS DONJE SELO 2	TS Donje Selo 2
3.	1TS637_TS DONJE SELO (V.P.)	TS Donje Selo VP
4.	1TS569_TS GORNJE SELO	TS Gornje Selo
5.	1TS571_TS GROHOTE 1	TS Grohote 1
6.	1TS573_TS GROHOTE 3 (DOM)	TS Grohote 3
7.	1TS631_TS GROHOTE 4 (ŠKOLA)	TS Grohote 4

8.	1TS1249_TS GROHOTE 5	TS Grohote 5
9.	1TS596_TS KRUŠICA DONJA	TS Krušica Donja
10.	1TS591_TS KRUŠICA GORNJA	TS Krušica Gornja
11.	1TS575_TS MASLINICA 1	TS Maslinica 1
12.	1TS1121_TS MASLINICA 2	TS Maslinica 2
13.	1TS984_TS MASLINICA 3	TS Maslinica 3
14.	1TS577_TS NEČUJAM 1	TS Nečujam 1
15.	1TS701_TS NEČUJAM 2	TS Nečujam 2
16.	1TS859_TS NEČUJAM 3	TS Nečujam 3
17.	1TS953_TS NEČUJAM 6	TS Nečujam 6
18.	1TS1202_TS PIŠKERA	TS Piškera
19.	1TS1224_TS PODKAMENICA	TS Podkamenica
20.	1TS578_TS ROGAČ 1 (LUKA)	TS Rogač 1
21.	1TS600_TS ROGAČ 2	TS Rogač 2
22.	1TS1201_TS ROGAČ 3	TS Rogač 3
23.	1TS574_TS SREDNJE SELO	TS Srednje Selo
24.	1TS570_TS STOMORSKA 1 (CENTAR)	TS Stomorska 1
25.	1TS609_TS STOMORSKA 2	TS Stomorska 2
26.	1TS799_TS STOMORSKA 3	TS Stomorska 3

Na slici 4 nalazi se dijagram entiteta i veza (eng. Entity-Relationship Diagram: ERD) koji prikazuje najznačajnije tablice te njihove odnose. U tablici *tipmjernetocke* navedeni su tipovi mjerenja (npr. mjerenja energije na mjesečnoj razini radi obračuna, mjerenja energije na 15-minutnom intervalu, mjerenja struje i napona na 10-minutnom intervalu, mjerenja frekvencije na 10-minutnom intervalu, mjerenja strujne/naponske nesimetrije na

10-minutnom intervalu, itd), te svako mjerenje ima navedenu mjernu jedinicu te vlastiti *id*, koji se koristi kao ključ da bi se povezao sa tablicom *mjernatocka*. U tablici *uredaj* nalaze se imena transformatorskih stanica, te još nekoliko tehničkih karakteristika svakog kontrolnog brojila, obračunsko mjerno mjesto pojedine TS i oznaka distributivnog područja. Svaka TS ima vlastiti *id*, koji se koristi kao ključ da bi se povezao sa tablicom *mjernatocka*. U tablici *mjernatocka* dodjeljuje se jedinstvena vrijednost za svaku TS, za svaku vrstu mjerenja. Dakle, za svaku od 26 TS prikupljeno je 88 različitih vrsta mjerenja. Zbog toga postoji ukupno $26 \cdot 88 = 2288$ različitih šifri koje se koriste kako bi se iz tablice *zapis* mogle izvući vrijednosti za svaki trenutak, svaku TS i svaku vrstu mjerenja.



Slika 6. Dijagram entiteta i veza

Korišteni podaci o radnoj energiji nalazili su se u 2 kategorije, ovisno o smjeru energije kroz TS. Na temelju dostupnih podataka, identificirano je da ukupno 16 TS nije imalo nikakvu zabilježenu proizvodnju od trenutka instalacije novih kontrolnih brojila, te na 1 TS istovremeno nije zabilježena nikakva potrošnja te je zaključak da je vjerojatno tek instalirana. U dokumentu *Strategija razvoja općine Šolta do 2020* [22] iz 2015. godine, piše da su tada postojale 22 TS u pogonu, te da je postojala procijenjena potreba za ukupno

32 TS do 2020. godine. Za potrebe ovog rada, dobiveni su mjerni podaci prikupljeni sa 26 TS, što potkrepljuje procjene o rastućem trendu potražnje navedene u [22] (premda nije ispunjena konačna kvota od 32 TS). S obzirom na rastući trend potražnje, očigledno je da su u tijeku ulaganja u mrežnu infrastrukturu, što podupire zaključak da je spomenuta TS nedavno instalirana i stoga još uvijek bez zabilježene potrošnje.

Kontrolna brojila na otoku Šolti bilježe kumulativne vrijednosti energije. Većina mjerenja proizvodnje pokazuje konstantne vrijednosti koje su znatno niže od potrošnje, što ukazuje na veliki potencijal za instalaciju distribuiranih izvora energije na tom području.

Uz navedena očitavanja sa kontrolnih brojila u transformatorskim stanicama, za svaku je navedena odgovarajuća obračunska konstanta. Brojila u pravilu imaju strujni ulaz dimenzioniran za 5 A, te naponski ulaz za 100 V. Obračunska konstanta je produkt prijenosnih omjera strujnog i naponskog mjernog transformatora koja se koristi za izračun stvarne potrošnje/proizvodnje kroz vrijeme.

U dobivenim podacima nije se nalazila nazivna snaga transformatorskih stanica te je ona procijenjena na temelju izmjerenih podataka o potrošnji električne energije. Mjerenja su evidentirana u intervalima od 15 minuta, zbog čega se promatrala maksimalna potrošnja energije kroz pojedinu TS za bilo koji uzastopni period od 4 mjerenja tj. za bilo koji period od sat vremena. Najveća vrijednost potrošnje kroz sat vremena (u kasnijim formulu označena kao $P_{očitano}$) koristila se za daljnju procjenu nazivne snage svake TS.

Prvo, kako bi se dobio ispravan red veličine izmjerene električne energije, dobivena radna snaga množi se sa obračunskom konstantom:

$$P_{dopušteno} = O.K. * P_{očitano} \quad (1)$$

gdje je $P_{dopušteno}$ vrijednost stvarne radne energije iskazane u kWh, dok O.K. označava obračunsku konstantu.

Zatim, radi procjene potrebne prividne snage svake TS, prethodno određena maksimalna radna energija, unutar perioda od sat vremena, dijeli se sa konzervativnim faktorom snage od 0.8, kako je prikazano u idućoj formuli:

$$S_{dopušteno} = \frac{P_{dopušteno}}{\cos(\varphi)} \quad (2)$$

Radi smanjenja rizika od pregrijavanja, osiguravanja potrebne fleksibilnosti i rezervi te uzimajući u obzir potencijalne buduće potrebe, transformatori se obično projektiraju tako da ne koriste više od 80% svoje nazivne snage. Prema navedenoj praksi, te i dalje u skladu sa konzervativnim pristupom procjene, dobivena prividna snaga transformatora predstavlja 80% nazivne snage, što znači da se procijenjena nazivna snaga svake pojedine transformatorske stanice izračunava dijeljenjem dobivene prividne snage s faktorom sigurnosti od 0.8.

$$S_{\min_nazivno} = \frac{S_{dopušteno}}{0.8} \quad (3)$$

Nakon što je određena prividna snaga $S_{\min_nazivno}$, koja predstavlja minimalnu prividnu snagu TS potrebnu za prijenos izmjerene radne energije u vršnih sat vremena, nazivna snaga svake pojedine TS određena je kao prva standardizirana snaga TS koja je veća od izračunatog $S_{\min_nazivno}$ prema [26].

U tablici 2 istaknute su prave nazivne snage transformatorskih stanica (prema izvorima [27], [28] i [29]), te prikazane su ostale pretpostavljene nazivne snage prema opisanom izračunu. Suma tako dobivenih nazivnih snaga TS 10(20)/0,4 kV iznosi 7.82 MVA, što je u skladu s činjenicom da snaga TS 35/10 kV Grohote iznosi 8 MVA. Na taj način je osigurana stabilnost i pouzdanost elektroenergetske mreže. Radi zaštite i sigurnosti podataka, sve transformatorske stanice od sada će biti identificirane jedinstvenom šifrom.

Tablica 2. Procijenjene i prave nazivne snage TS

Broj TS	Šifra TS	Obračunska konstanta	Nazivna snaga [kVA]
1.	424086	200	630
2.	424088	160	400
3.	424101	200	630
4.	424106	300	1000
5.	426846	200	50
6.	426852	300	160
7.	426861	200	400
8.	529379	200	50
9.	529393	120	250
10.	529397	120	250
11.	529403	200	630
12.	529405	200	100
13.	539950	300	630
14.	539958	200	630
15.	539960	200	250
16.	539963	200	400
17.	540731	120	160
18.	540997	120	250
19.	540999	80	100
20.	541271	20	100

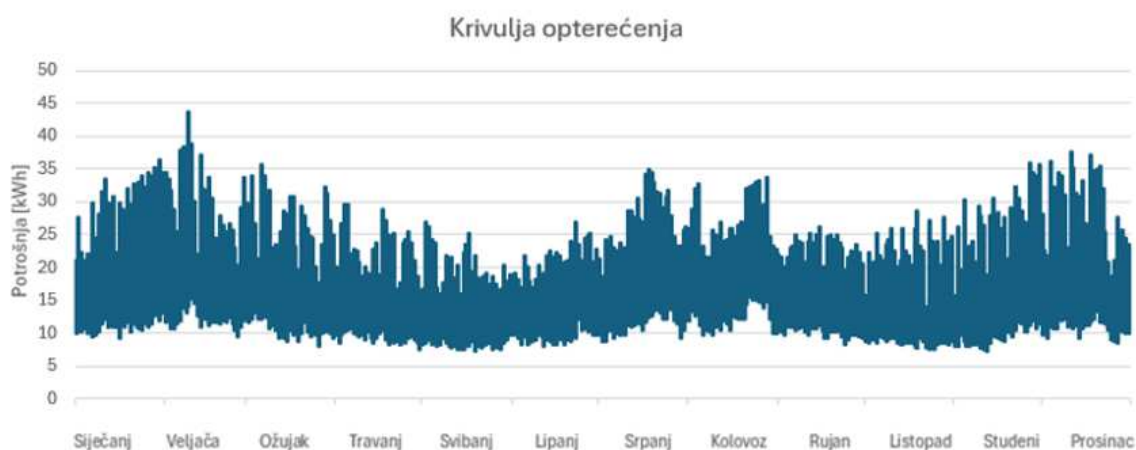
21.	541281	40	100
22.	541286	80	100
23.	541288	80	250
24.	541915	160	250
25.	541926	15	50
26.	581348	80	630

Prilikom analize podataka o potrošnji radne energije, uočeno je da je 9. veljače 2023. godine u 22:15 sati zabilježen neočekivani i značajan skok potrošnje na 14 TS. Međutim, napredna brojila, koja imaju sposobnost prepoznavanja određenih operativnih stanja (npr. power up, power down, no power, disturbed value itd.) nisu zabilježila nikakvu poruku vezanu za ovu anomaliju. Zahvaćene TS nasumično su pozicionirane u mreži da bi se mogao izvući zaključak o tome što je izazvalo tu situaciju. Također, primjetno je da se u jednoj TS dogodio nagli skok potrošnje 8. veljače 2023. u 22:15 sati, no vjerojatno se radi o istom događaju te brojilo na spomenutoj TS nije ispravno sinkronizirano sa vremenom.

Lokacije razmatranih TS nisu dostavljene, te su one određene pomoću dostupnih dokumenata o infrastrukturi elektroenergetske mreže ([24], [27], [28] i [29]), te pregleda katastarskog plana otoka Šolte [30]. Lokacije TS korištene su kasnije za kartografski prikaz TS na otoku Šolti.

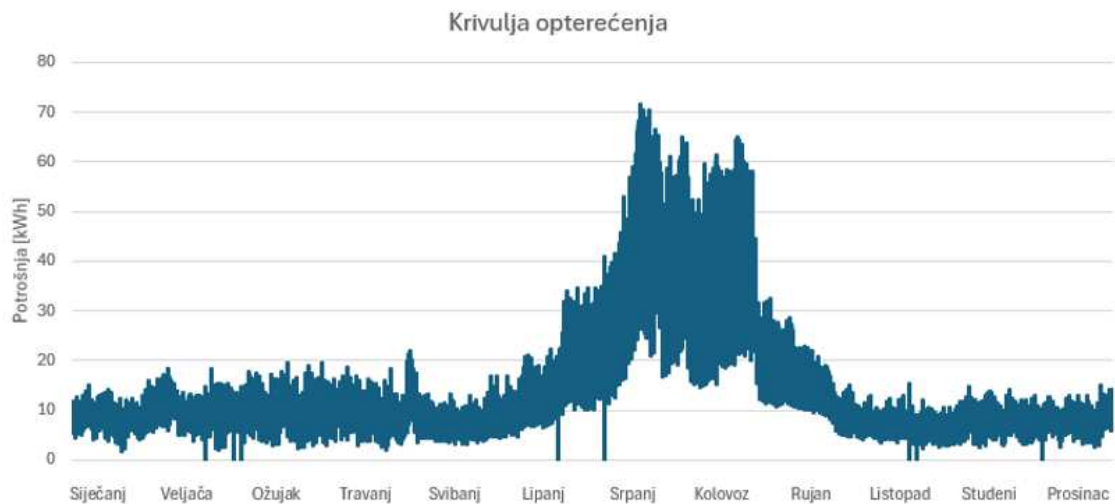
8. Proračun dostupnog kapaciteta mreže za prihvata

U svrhu ovog diplomskog rada korištena su mjerenja iz 2023. godine. Na manjem broju razmatranih TS, onih koji se nalaze u stalno naseljenim područjima, opterećenje kroz cijelu godinu je relativno kontinuiranog iznosa kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Krivulja opterećenja kroz 2023. godinu za TS 540997

Međutim, na ostatku TS jako je izražen utjecaj ljetnog turizma. Na slici 9 nalazi se graf potrošnje električne energije kroz cijelu godinu za TS 424101. Postoji značajan porast potrošnje električne energije u razdoblju od lipnja do rujna, s vrijednostima koje su višestruko veće u usporedbi s ostatkom godine.



Slika 9. Krivulja opterećenja kroz 2023. godinu za TS 424101

S obzirom na to da je otok Šolta popularna ljetna turistička destinacija, s nešto manje od 1700 stanovnika prema popisu stanovništva iz 2011. godine i bez razvijene industrije, razlike između dnevnih krivulja opterećenja zimi i ljeti na određenim TS izrazito su velike. Na slici 10 prikazane su 2 krivulje opterećenja u različitim vremenskim periodima na TS 424101. Plava linija predstavlja podatke za tjedan dana u veljači, kada je zabilježena najmanja potrošnja, te narančasta linija predstavlja podatke za tjedan dana krajem srpnja, kada je zabilježena najveća potrošnja. Ovaj prikaz jasno ilustrira sezonske fluktuacije u potrošnji električne energije, koje su značajno veće tijekom ljetnih mjeseci zbog povećanog broja turista i pojačanih aktivnosti na otoku.



Slika 10. Potrošnja el. energije na TS 424101 tijekom veljače (plava linija) i tijekom srpnja (narančasta linija)

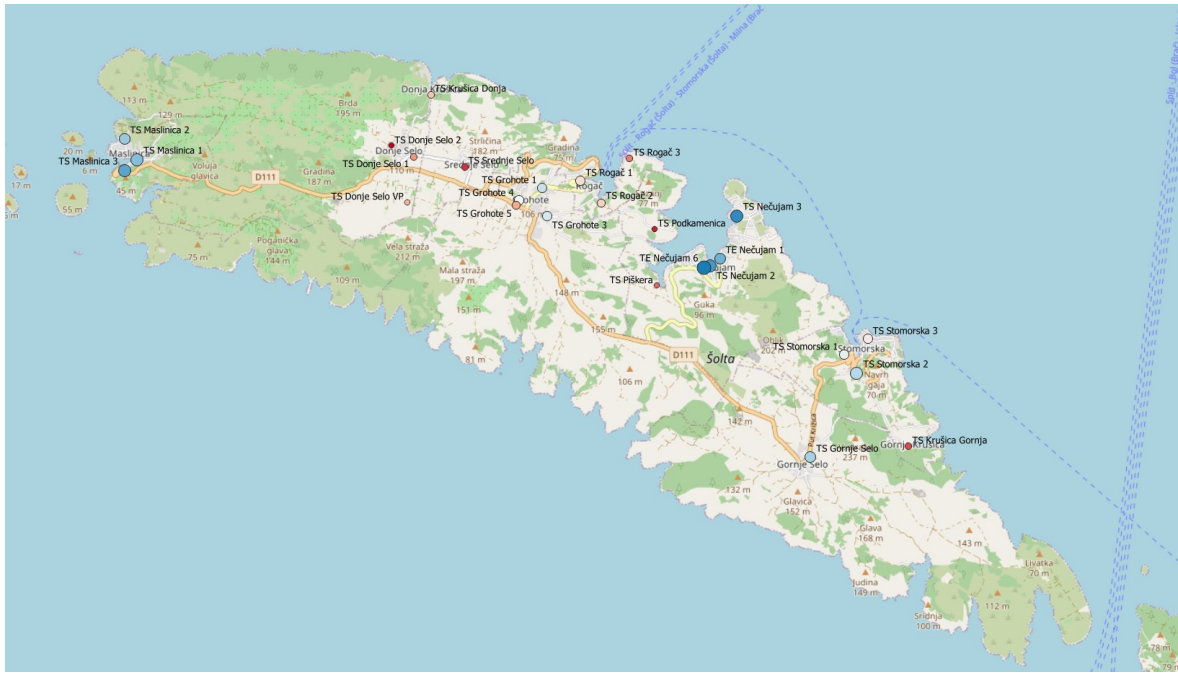
8.1. Dostupni kapacitet mreže za prihvata potrošnje

Na temelju procijenjenih nazivnih snaga TS, te izmjerenih maksimalnih iznosa potrošnje energije po pojedinoj TS, izvršen je proračun ukupnog kapaciteta koji je na raspolaganju za prihvat potrošnje.

Na primjer, nazivna snaga TS 541286 iznosi 100 kVA. Analizom mjerenja tijekom jednogodišnjeg perioda, vrijednost koja je predstavljala maksimalnu potrošnju električne energije, tj. najveći zbroj 4 uzastopna 15-minutna intervala iznosila je 0,66. Dobivena vrijednost pomnožena je sa obračunskom konstantom tj. pravi iznos maksimalno potrošene energije za TS 541286 bio je $0,653 * 80 = 52,24$ kWh, prema formuli (1). Prividna snaga koja odgovara izračunatoj radnoj snazi, uz faktor snage 0,8, iznosi $52,24 / 0,8 = 65,3$ kVA, sukladno formuli (2). S obzirom na nazivnu snagu TS 541286 od 100 kVA, dostupna snaga za prihvat potrošnje iznosi $100 \text{ kVA} - 65,3 \text{ kVA} = 34,7 \text{ kVA}$.

Za kartografsku vizualizaciju korišten je softver QGIS [31]. Na idućem snimku zaslona iz QGIS-a, grafički su prikazane razmatrane TS. Veličina svake točke, koja prestavlja pojedinu TS, proporcionalna je njejoj nazivnoj snazi, dok boja točke varira od crvene, preko bijele i konačno plave, sukladno prikazujući dostupan kapacitet za prihvat potrošnje.

U tablici 3 nalaze se točni iznosi preostalog dostupnog kapaciteta za prihvat potrošnje. TS 581348 nema evidentiranu potrošnju, stoga dostupni kapacitet za prihvat potrošnje jednak je nazivnoj snazi TS.



Slika 11. Prikaz TS prema dostupnom kapacitetu za prihvat potrošnje

Tablica 3. Dostupni kapacitet za prihvat potrošnje

Broj TS	Šifra TS	Nazivna snaga TS [kVA]	Dostupni kapacitet za prihvat potrošnje [kVA]
1.	541286	100	34
2.	581348	630	630
3.	541926	50	38
4.	539963	400	122
5.	541288	250	104
6.	529393	250	87
7.	540997	250	5
8.	426852	160	34
9.	541281	100	40

10.	541271	100	26
11.	539958	630	184
12.	426861	400	164
13.	529403	630	259
14.	424088	400	190
15.	424101	630	286
16.	424086	630	377
17.	424106	1000	692
18.	529379	50	32
19.	426846	50	16
20.	541915	250	50
21.	540731	160	44
22.	529405	100	3
23.	540999	100	21
24.	539960	250	73
25.	539950	630	119
26.	529397	250	53

8.2. Dostupni kapacitet mreže za prihvata proizvodnje

Osnova ove analize je izračunati maksimalnu moguću integraciju distribuiranih izvora energije, pri čemu mora biti osigurano da se napon održi u propisanim granicama $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n , u promatranoj elektroenergetskoj mreži.

Za određivanje dostupnog kapaciteta razmatrane mreže za prihvat proizvodnje na promatranim TS, izrađen je model u kojem fotonaponski sustavi djeluju kao distribuirani izvori energije. Korišteni su podaci preuzeti sa stranice Renewables.ninja [32] koja na temelju zadane lokacije, orijentacije te zadane snage panela i izmjerene ozračenosti tijekom 2019. godine, generira CSV datoteku s proizvodnjom električne energije kroz period od godinu dana, na satnoj razini.

Podaci koji predstavljaju proizvodnju električne energije konfigurirani su za radnu snagu elektrane od 100 kW. Početna vrijednost od 100 kW korištena je kao referentna točka za lakšu normalizaciju ostalih vrijednosti dobivenih skaliranjem početne vrijednosti. Ovi podaci odražavaju proizvodnju električne energije iz fotonaponskih elektrana, konkretno vrijednosti na izlazu iz invertera fotonaponske elektrane. Za obradu podataka korišten je programski jezik Python [33], koji je čitao podatke o potrošnji s promatranih TS te podatke o proizvodnji iz CSV datoteke.

S obzirom na to da su podaci o proizvodnji električne energije zabilježeni na satnoj razini, dok su podaci o potrošnji sa kontrolnih brojila mjereni na 15-minutnoj razini, primijenjena je linearna interpolacija na podatke o proizvodnji. Na taj način omogućeno je usklađivanje podataka s očuvanom vremenskom preciznošću, osiguravajući da model pruža precizne procjene raspoloživog kapaciteta mreže za prihvat proizvodnje električne energije na svakoj pojedinoj TS.

Prema slici 9, uočava se značajan porast potrošnje energije tijekom ljetne turističke sezone, dok je tijekom ostatka godine potrošnja stabilna i znatno niža. S obzirom da je otok Šolta turističko odredište, elektroenergetska mreža je izgrađena u skladu s tim potrebama. Stoga je značajan broj TS u razmatranoj mreži dimenzioniran s većim nazivnim kapacitetom nego što je potrebno za mjesec izvan ljetne turističke sezone. To otvara prostor za značajnu proizvodnju električne energije, koja se preko razmatranih 10(20)/0,4 kV, te zatim i nadređene TS 35/10 kV Grohote, šalje u elektroenergetsku mrežu.

Osnovno polazište ove analize je identificirati maksimalan kapacitet fotonaponske elektrane koja može zadovoljiti lokalnu potrošnju električne energije u svakom trenutku, uz istovremenu proizvodnju dodatne energije koja se može slati u elektroenergetsku mrežu. Pri tome se moraju poštivati naponska ograničenja od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n , kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava te ograničenje maksimalnog iznosa radne snage koju svaka pojedina TS može prenositi u elektroenergetsku mrežu. Dakle, u svakom trenutku, te za svaku razmatranu TS, vrijedi jednadžba:

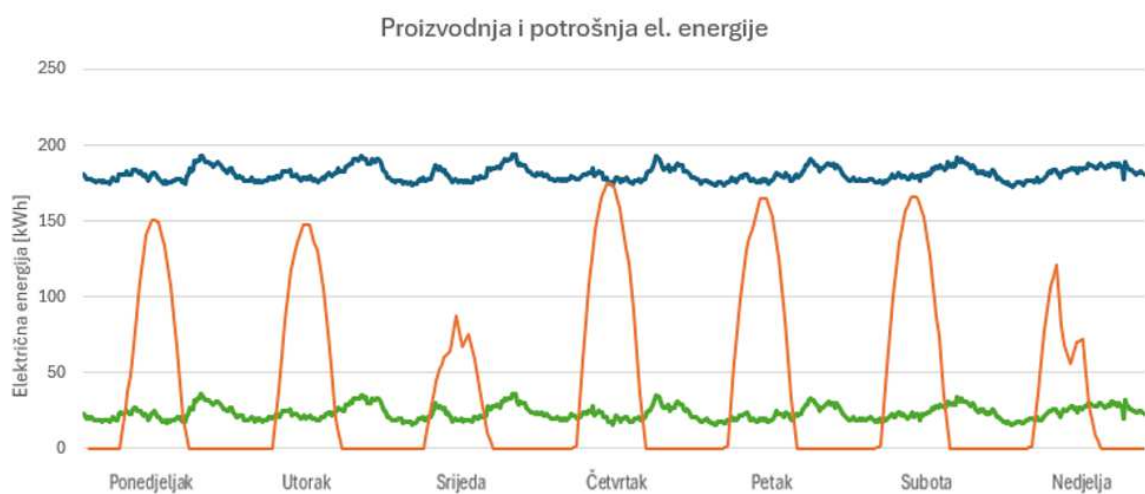
$$P_{PV_{gen}} \leq P_{potrošnja} + P_{max_{TS}} \quad (4)$$

gdje je $P_{PV_{gen}}$ maksimalna moguća snaga ostvarena iz fotonaponske elektrane po pojedinoj TS, $P_{potrošnja}$ je snaga potrebna da zadovolji potrošnju električne energije po pojedinoj TS, te $P_{max_{TS}}$ je maksimalna radna snaga svake pojedine TS. $P_{max_{TS}}$ određena je na temelju procijenjene nazivne snage svake pojedine TS $S_{n_{TS}}$ uz konzervativnu pretpostavku faktora snage od 0.8.

Tijekom svakog vremenskog trenutka, programski kod u Pythonu provjeravao je uvjet da snaga fotonaponske elektrane ne premašuje sumarnu vrijednost definiranu lokalnom potrošnjom i maksimalnom radnom snagom svake pojedine TS. Dodatno je izračunavao faktor skaliranja, koji pokazuje za koliko se može povećati ili smanjiti snaga od 100 kW kako bi se na optimalan način zadovoljili navedeni uvjeti za svaku analiziranu TS. Faktor skaliranja definira maksimalni dopušteni prihvata novih kapaciteta proizvodnje, poštujući samo navedeni uvjet o nejednakosti snaga. Ograničavajući trenutak koji je određivao vrijednost faktora skaliranja, najčešće je bio kraj mjeseca veljače, zbog značajno manje potrošnje energije u tom razdoblju.

Na primjeru TS 539950, grafički je ilustriran maksimalni mogući kapacitet za prihvata nove proizvodnje, te maksimalna moguća proizvodnja energije iz fotonaponskih elektrana. Na slici 11 prikazan je graf na kojem je zelenom linijom obilježena potrošnja električne energije na TS 539950, dok je narančastom linijom obilježena proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana. S obzirom da je u razmatranom slučaju moguća promjena smjera električne energije kroz TS, maksimalnu integraciju fotonaponskih

elektrana ne ograničava isključivo lokalna potrošnja električne energije, već je tom iznosu dodana i maksimalna radna snaga koju TS može prenijeti u elektroenergetsku mrežu. Kritični trenutak na TS 539950 zabilježen je u četvrtak, 23. veljače 2023. u 10:45 sati. Povećanjem količine instaliranih fotonaponskih elektrana, postojeća TS bila bi preopterećena jer nema više dostupnog kapaciteta za prihvatanje proizvedene električne energije. Dakle, proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana zadovoljila je lokalnu potrošnju, te višak proizvedene električne energije šalje se u mrežu, poštujući jedino uvjet neprekoračenja nazivne snage TS.



Slika 11. Prikaz potrošnje i proizvodnje el. energije na TS 539950

Faktor skaliranja za svaku pojedinu TS nalazi se u tablici 4.

8.3. Analiza opterećenja TS sukladno naponskom ograničenju

Sljedeći korak obuhvaćao je provjeru je li moguće opteretiti svaku pojedinu TS s izračunatim opterećenjem, uz poštivanje naponskih ograničenja od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n .

Prvi korak analize je uspostavljanje veze između napona na pojedinoj TS i potrebne snage TS za prijenos električne energije. Izmjerene vrijednosti napona na svakoj TS su zabilježene u intervalima od 10 minuta. S druge strane, izmjereni podaci o potrošnji električne energije zabilježene su u 15-minutnom intervalu. Radi usklađivanja podataka te postizanja korelacije između izmjerenih podataka, iz oba seta podataka su izdvojene samo vrijednosti koje su zabilježene u puni sat i u pola sata. Na temelju podataka izvršena je regresijska analiza, pri čemu je od nekoliko osnovnih modela svaki put odabran polinomijalni model stupnja 2 zbog najpreciznijeg opisa podataka. Dobiveni model regresijske analize korišten je za predviđanje vrijednosti napona koji bi se ostvario pri opterećenju svake razmatrane TS koje je dobiveno iz prethodnih poglavlja.

Tijekom postupka određivanja maksimalnog kapaciteta za prihvrat potrošnje, ograničavajući trenutak je bio onaj kada je svaka pojedina TS bila 100% opterećena. Analogno, tijekom postupka određivanja maksimalnog kapaciteta za prihvrat proizvodnje, ograničavajući trenutak je bio onaj kada je proizvedena energija iz fotonaponskih elektrana zadovoljavala lokalnu potražnju te maksimalno proizvodila električnu energiju s obzirom na nazivnu snagu pojedine TS. Dakle, i u drugom proračunu je postojao period kada je svaka pojedina TS bila 100% opterećena, jedina razlika je što se energija vraćala natrag u elektroenergetku mrežu a nije služila za potrebe lokalne potrošnje. Zbog prethodno navedenog razloga, rezultati proračuna vezani uz napon ostaju identični u oba scenarija.

Dakle, model je napravljen na izmjerenim podacima o potrošnji električne energije i napona, a primijenjivati će se na izračunate podatke o potrošnji i o proizvodnji električne energije, s obzirom da je razlika između 2 slučaja samo smjer prolaska električne energije kroz svaku pojedinu TS.

U regresijskom modelu varijabla x predstavlja vrijednost napona, dok varijabla y predstavlja vrijednost radne energije koja prolazi kroz pojedinu TS u svakom trenutku.

Sada se primijenjuje obrnuti postupak u odnosu na onaj korišten na početku rada (podsjetnik: iz podataka o potrošnji električne energije u 15-minutnim intervalima dobivena je dopuštena radna snaga kojom se može opteretiti TS, te posljedično i nazivna snaga TS). Na primjer, za TS 529379 je izračunat regresijski model koji glasi $y = 6589.6967 - 53.5054 * x + 0.1087 * x^2$. U tablici 2 je prikazano da nazivna snaga TS 529379 iznosi 50 kVA. S obzirom da korišteni faktor snage prilikom izračuna dopuštene prividne snage iz radne snage je iznosio 0.8, isti faktor vrijedi i u obrnutom slučaju. Dakle, maksimalna radna snaga kojom teretimo TS 529379 iznosi $50 * 0,8 = 40$ kW. Također,

budući da je regresijski model izrađen na temelju podataka o potrošnji električne energije, te da su ti podaci zapisani u 15-minutnim intervalima, potrebno je odrediti maksimalnu dopuštenu električnu energiju kojom se svaka TS smije opteretiti u tom razdoblju prema formuli (5). Konkretno, uz ograničenje snage od 40 kW, jednostavnim proračunom dobiveno je da maksimalna električna energija koja smije teći kroz TS 529379 tijekom 15-minutnog perioda iznosi 10 kWh.

$$E_{15min} [kWh] = P_{1h_max} [kW] * \frac{1}{4} [h] \quad (5)$$

Konačno, za iznos $y = 10$ kWh u regresijskom modelu dobiveno je da vrijednost napona iznosi 239,65 V. S obzirom da se rezultat nalazi u dopuštenom rasponu od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n , zaključuje se da TS 529379 može funkcionirati pod 100-postotnim opterećenjem bez utjecaja na naponske prilike u mreži te bez potrebe za korekcijom faktora skaliranja (u slučaju izračuna kapaciteta za prihvata proizvodnje).

U proračunima nije uzet u obzir faktor sigurnosti od 80%, jer se razmatrao slučaj maksimalne priključive proizvodnje/potrošnje. Također, uz varijabilnost fotonaponskih elektrana, poznato je da TS neće biti dugoročno pod 100-postotnim opterećenjem.

U tablici 4 prikazani su rezultati analize za svaku od 26 razmatranih TS. Vrijednosti napona dobivene ovim postupkom jednake su u oba izračuna kapaciteta za prihvata potrošnje i kapaciteta za prihvata proizvodnje električne energije. Razlog tome je što se u oba slučaja promatrao trenutak 100-postotne opterećenosti pojedine TS, neovisno o smjeru u kojem energija teče kroz TS. Sve vrijednosti napona su unutar ograničenja od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n , osim TS 424106.

TS 424106 je jedina TS nazivnog kapaciteta 1000 kVA. Također, kapacitet od 1000 kVA nije procijenjena, nego stvarna vrijednost dobivena iz izvora [27], [28] i [29]. Navedena TS je znatno podopterećena, s maksimalnim iznosom satne potrošnje električne energije od 258 kWh. Da se provela procjena nazivne snage navedene TS na podacima iz 2023. godine, ona bi iznosila 400 kVA. Moguće je da je dugotrajna podopterećenost TS 424106 utjecala na ukupnu učinkovitost i smanjenje performansi zbog neoptimiziranog rada, te je posljedično podopterećenost imala utjecaj na naponske prilike tijekom nazivnog opterećenja.

Za TS 424106 ponovljen je proračun sa danim regresijskim modelom, ali ovoga puta je fiksna varijabla bila vrijednost napona. Uz minimalni dozvoljeni napon od 207 V, tj. poštujući naponsko ograničenje od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n , dobiveno je maksimalno opterećenje TS 424106. Na taj način dobiven je nešto niži faktor skaliranja početne snage fotonaponske elektrane od 100 kW, tj. rezultat je smanjena moguća integracija fotonaponskih elektrana na TS 424106.

Tablica 4. Regresijski modeli i dobiveni faktori skaliranja za proizvedenu energiju iz fotonaponskih elektrana

TS šifra	Faktor skaliranja	Regresijski model	Odgovarajuće vrijednosti napona [V]	Konačan faktor skaliranja
529379	0.58	R-squared: 0.85 $y = 6589.6967 + -53.5054 * x^1 + 0.1087 * x^2$	239.65	0.58
540731	2.23	R-squared: 0.87 $y = 7422.2907 + -60.4637 * x^1 + 0.1232 * x^2$	230.24	2.23
541926	0.61	R-squared: 0.81 $y = 6824.7041 + -55.4719 * x^1 + 0.1128 * x^2$	239.11	0.61
541271	1.24	R-squared: 0.84 $y = 7105.2558 + -57.8520 * x^1 + 0.1178 * x^2$	233.34	1.24
529393	3.36	R-squared: 0.84 $y = 7004.9436 + -56.9656 * x^1 + 0.1159 * x^2$	226.09	3.36
539963	5.53	R-squared: 0.88 $y = 7006.0353 + -57.0226 * x^1 + 0.1161 * x^2$	220.05	5.53
529403	7.72	R-squared: 0.88 $y = 6735.7385 + -54.7611 * x^1 + 0.1114 * x^2$	212.96	7.72
581348	-	-	-	-
540997	3.46	R-squared: 0.87 $y = 5905.9769 + -47.7865 * x^1 + 0.0967 * x^2$	224.87	3.46
426846	0.58	R-squared: 0.80 $y = 5857.7448 + -47.3825 * x^1 + 0.0959 * x^2$	239.84	0.58
529405	1.26	R-squared: 0.83	233.07	1.26

		$y = 6617.5422 + -53.7351 * x^1 + 0.1091 * x^2$		
426861	5.08	R-squared: 0.84 $y = 6176.8915 + -50.0197 * x^1 + 0.1013 * x^2$	219.18	5.08
529397	3.19	R-squared: 0.84 $y = 6702.5186 + -54.4620 * x^1 + 0.1107 * x^2$	225.60	3.19
424106	9.51	R-squared: 0.86 $y = 6589.6967 + -53.5054 * x^1 + 0.1087 * x^2$	203.81	8.23
539960	3.37	R-squared: 0.81 $y = 5745.3793 + -46.4198 * x^1 + 0.0938 * x^2$	224.89	3.37
424086	7,62	R-squared: 0.87 $y = 6852.5605 + -55.7159 * x^1 + 0.1133 * x^2$	212.92	7,62
424088	4.81	R-squared: 0.86 $y = 7156.6866 + -58.2947 * x^1 + 0.1188 * x^2$	212.30	4.81
424101	7.38	R-squared: 0.85 $y = 6317.4204 + -51.2044 * x^1 + 0.1038 * x^2$	212.18	7.38
426852	2.40	R-squared: 0.88 $y = 6956.6282 + -56.5662 * x^1 + 0.1150 * x^2$	229.43	2.40
539950	7.10	R-squared: 0.81 $y = 6561.5224 + -53.2928 * x^1 + 0.1083 * x^2$	212.67	7.10
539958	7.29	R-squared: 0.85 $y = 6632.2955 + -53.8594 * x^1 + 0.1094 * x^2$	212.67	7.29
540999	1.39	R-squared: 0.80 $y = 6650.0221 + -53.9600 * x^1 + 0.1095 * x^2$	233.70	1.39
541281	1.21	R-squared: 0.83 $y = 5761.6337 + -46.5503 * x^1 + 0.0941 * x^2$	234.57	1.21
541286	1.26	R-squared: 0.83 $y = 6697.9757 + -54.4159 * x^1 + 0.1106 * x^2$	234.26	1.26
541288	3.38	R-squared: 0.81 $y = 7431.4477 + -60.5138 * x^1 + 0.1232 * x^2$	225.57	3.38
541915	3.21	R-squared: 0.90 $y = 6275.0391 + -50.8826 * x^1 + 0.1032 * x^2$	225.22	3.21

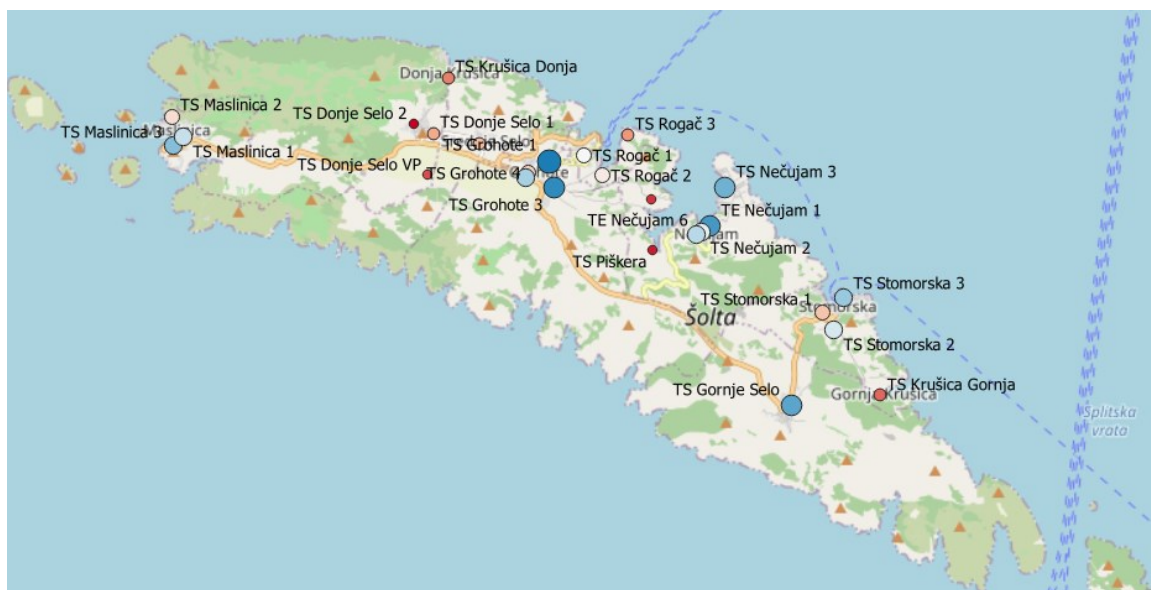
Konačne vrijednosti maksimalnog dostupnog kapaciteta za prihvata proizvodnje iz fotonaponskih elektrana na pojedinu TS, poštujući naponska ograničenja od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n te poštujući maksimalni iznos radne snage koju svaka pojedina TS može podnijeti, prikazan je u tablici 5. Vrijednosti su dobivene produktom početne snage od 100 kW te faktora skaliranja. Za TS 581348 nije specificirana nikakva vrijednost dostupnog kapaciteta za prihvata proizvodnje jer je vjerojatno nova transformatorska stanica, koja će tek uskoro biti povezana s trenutno nepoznatom potrošnjom.

Tablica 5. Dostupan kapacitet za prihvata proizvodnje

TS šifra	Dostupan kapacitet za prihvata proizvodnje [kW]
542379	58
540731	223
541926	61
541271	124
529393	336
539963	553
529403	772
581348	-
540997	346
426846	58
529405	126
426861	508
529397	319
424106	823
539960	337
424086	762

424088	481
424101	738
426852	240
539950	710
539958	729
540999	139
541281	121
541286	126
541288	338
541915	321

Na slici 9 prikazan je snimak zaslona iz QGIS-a u kojem boja točaka odražava dostupni kapacitet za proizvodnju. Spektar boja ide od crvene, preko bijele, do konačno plave, što odgovara različitim razinama dostupnog kapaciteta mreže za prihvatanje proizvodnje. Veličina svake točke je proporcionalna nazivnoj snazi TS.



Slika 12. Prikaz TS prema dostupnom kapacitetu za prihvatanje proizvodnje

Za ovaj diplomski rad nisu bili dostupni podaci o topologiji distribucijskih vodova, što je onemogućilo precizniju analizu utjecaja priključenja distribuiranih izvora energije na kvalitetu električne energije i njihovog utjecaja na kapacitet mreže za prihvata proizvodnje u mreži. U analizi se pretpostavlja da su svi priključeni distribuirani izvori energije ravnomjerno raspoređeni po fazama, čime se minimizirao utjecaj na naponsku nesimetriju. Nadalje, zbog nedostatka mjerenja na nadređenoj distribucijskoj TS 35/10 kV Grohote, nije bilo moguće u potpunosti uzeti u obzir eventualni dodatni utjecaj ove TS na izračunati maksimalni kapacitet prihvata. Stoga, može se zaključiti da bi navedena TS mogla dodatno smanjiti procijenjeni maksimalni kapacitet mreže za prihvata proizvodnje.

Ukupna energija proizvedena iz fotonaponskih elektrana iznosi čak 13,61 GWh. Dobivena je zbrajanjem proizvedene energije svakog trenutka iz fotonaponskih elektrana, te za svaku pojedinu TS, kako bi se dobila kumulativna energija za cijeli jednogodišnji period. Dakle, uključen je konačan faktor skaliranja iz tablice 5 – točnije, poštovani su uvjeti naponskih ograničenja od $\pm 10\%$ nazivnog napona U_n , te uvjet maksimalne radne energije koju pojedina TS može prenijeti. S obzirom da je ukupna potrošnja električne energije u razmatranoj mreži tijekom 2023. godine je 2,49 GWh, a maksimalna moguća proizvedena električna energija iznosi čak 13,61 GWh, ovaj razmatrani dio mreže može značajnu količinu električne energije predati u mrežu. Ovaj rezultat pokazuje velik potencijal razmatrane mreže za integraciju novih distribuiranih izvora energije, te konačno smanjenje ovisnosti o konvencionalnim izvorima energije.

9. Zaključak

Tradicionalni pristupi povećanja kapaciteta prihvata, poput polaganja novih dalekovoda i dodavanja transformatora većeg kapaciteta, polako se zamjenjuju modernim tehnikama koje koriste fleksibilnu opremu elektroenergetskog sustava i informacijsku tehnologiju. U ovom diplomskom radu napravljena je analiza dostupnog kapaciteta za prihvata potrošnje i proizvodnje na razmatranom dijelu elektroenergetske mreže na otoku Šolti.

Metodologija rada uključivala je analizu velikog skupa podataka dostavljenih od strane HEP ODS-a, koji su obuhvaćali mjerenja energije, struje, napona, nesimetrije i harmoničkog izobličenja za 26 transformatorskih stanica koje su spojene na TS 35/10 kV Grohote na otoku Šolti. Korištenjem alata poput Pythona, DBeavera i QGIS-a, provedena je detaljna analiza koja je pokazala da se može priključiti značajan broj fotonaponskih elektrana bez kršenja naponskih ograničenja. Rezultati su pokazali da je moguće priključiti više fotonaponskih elektrana nego što je godišnja potrošnja energije tog dijela mreže, što rezultira vraćanjem viška energije natrag u mrežu.

Podaci o dostupnom kapacitetu za prihvata i dostupnoj fleksibilnosti u elektroenergetskoj mreži u pravilu nisu dostupni te to otežava implementaciju OIE. QGIS prikaz značajno olakšava pristup relevantnim informacijama potencijalnim investitorima i projektantima, omogućujući im detaljnije i učinkovitije planiranje i donošenje odluka.

Transformacija elektroenergetskog sustava otoka Šolte može se jednostavno prilagoditi sustavima drugih jadranskih otoka. Tako postaje očito da Hrvatska, s obzirom na svoj izuzetno povoljan geografski položaj, posjeduje značajan energetske potencijal. Daljnje istraživanje i implementacija ovih pristupa mogu značajno doprinijeti razvoju naprednih, održivih elektroenergetskih sustava.

Literatura

- [1] Yoga Wienda Pratama, Piera Patrizio, Niall Mac Dowell, *National priorities in the power system transition to net-zero: No one size fits all*, 2022
- [2] Europska komisija, *The European Green Deal*. Poveznica: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [3] Vijeće Europske unije, *Fit for 55*. Poveznica: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55/>; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [4] Julien Le Baut, Guillaume Leclercq, Giacomo Vigano, Merkebu Zenebe Degefa, *Characterization of flexibility resources and distribution networks*, 2017.
- [5] Međunarodna energetska agencija (IEA). *Energy System – Industry*. Poveznica: <https://www.iea.org/energy-system/industry>; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [6] IFZ, *Consumer acceptance of smart appliances*. Poveznica: https://ifz.at/sites/default/files/2021-02/D5_5-Consumer%20acceptance.pdf; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [7] F. D'Ettorre, M. Banaei, R. Ebrahimi, S. Ali Pourmousavi, E.M.V. Blomgren, J. Kowalski, Z. Bohdanowicz, B. Łopaciuk-Gonczaryk, C. Biele, H. Madsen, *Exploiting demand-side flexibility: State-of-the-art, open issues and social perspective*, 2022
- [8] IRENA – International Renewable Energy Agency, *Electric-vehicle smart charging*. Poveznica: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_EV_Smart_Charging_2019.pdf; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [9] Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, *Elektroenergetski distribucijski sustavi*. Poveznica: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEDS_predavanja.pdf; pristupljeno 10. rujna 2024.

- [10] Jady Powell, Alex McCafferty-Leroux, Waleed Hilal, S. Andrew Gadsben, *Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends*, 2024.
- [11] ScienceDirect. Smart Grid – Earth and Planetary Sciencee. Poveznica: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/smart-grid>; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [12] Hrvoje Keko, Ivan Krajnović, Damir Crnarić, Tomislav Stupić, *Potencijali iskorištavanja podataka s pametnih obračunskih brojila*, 2018.
- [13] Bhagya Nathali Silva, Murad Khan, Kijun Han, *Futuristic Sustainable Energy Management in Smart Environments: A Review of Peak Load Shaving and Demand Response Strategies, Challenges, and Opportunities*, 2020.
- [14] U.S. Department of Energy, *Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them*, 2006.
- [15] EnergySage, Critical peak pricing overview. Poveznica: <https://www.energysage.com/electricity/critical-peak-pricing-overview/>; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [16] Narodne novine. (2021). *Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o tržištu električne energije*. Narodne novine, br. 111/2021. Poveznica: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_10_111_1940.html; pristupljeno 10. rujna 2024.
- [17] M.H.J. Bollen, M. Häger, *Power quality: interactions between distributed energy resources, the grid, and other customers*, 2018.
- [18] Sherif M. Ismael, Shady H.E. Abdel Aleem, Almoataz Y. Abdelaziz, Ahmed F. Zobaa, *State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation*, 2019.
- [19] Naveed Qamar, Ammar Arshad, Karar Mahmoud, Matti Lehtonen, *Hosting capacity in distribution grids: A review of definitions, performance indices, determination methodologies, and enhancement techniques*, 2023.
- [20] Melike Selcen Ayaz, Mostafa Malekpour, Rasoul Azizipanah-Abarghooee, Mazaher Karimi, Vladimir Terzija, *Probabilistic photovoltaic generation and load demand uncertainties modelling for active distribution networks hosting capacity calculations*, 2024.

- [21] Math H. J. Bollen, Sarah K. Ronnberg, *Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption Equipment*, 2017.
- [22] Urbos d.o.o. Split, *Strategija razvoja općine Šolta do 2020.*, 2015.
- [23] HEP - Operator Distribucijskog Sustava, *Desetogodišnji (2023.-2032.) plan razvoja distribucijske mreže HEP ODS-a*, 2023.
- [24] Urbos d.o.o. Split, *Izmjene i dopune prostornog plana uređenja općine Šolta*, 2024.
- [25] Dbeaver. Poveznica: <https://dbeaver.io>; pristupljeno 11. rujna 2024.
- [26] Ivan Sitar, *Distributivni uljni transformatori prema normi EN 50464*, 1. savjetovanje, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije (2008), str. 2
- [27] Arching d.o.o. Split, *Urbanistički plan uređenja ugostiteljsko turističke zone Nečujam – Centar*, 2013.
- [28] Arching d.o.o. Split, *Urbanistički plan uređenja naselja Nečujam*, 2012.
- [29] Arching d.o.o. Split, *Urbanistički plan uređenja naselja Grohote – Rogač*, 2021.
- [30] Ministarstvo pravosuđa, uprave i digitalne transformacije – Državna geodetska uprava. Poveznica: <https://oss.uredjenazemlja.hr/map>; pristupljeno 24. lipnja 2024.
- [31] QGIS. Poveznica: <https://qgis.org/> ; pristupljeno 11. rujna 2024
- [32] Renewables.ninja. Poveznica: <https://www.renewables.ninja/>; pristupljeno 25. lipnja 2024.
- [33] Python. Poveznica: <https://www.python.org>; pristupljeno 11. rujna 2024

Sažetak

Fleksibilnost elektroenergetske mreže, kao i svih priključenih sudionika i elemenata, postaje sve značajnija tema u području istraživanja elektroenergetike. Suvremene tehnološke inovacije potiču sve veću integraciju različitih OIE i pametnih uređaja u elektroenergetski sustav, što dovodi do potrebe za prilagodbom i optimizacijom cjelokupnog sustava. Posebno je primjetno povećanje instalacija solarnih elektrana na krovovima kućanstava. Ovakva decentralizirana proizvodnja energije mijenja tradicionalni model elektroenergetske mreže, stvarajući nove izazove i mogućnosti. U sklopu diplomskog rada, planira se razviti model koji će omogućiti analizu i procjenu fleksibilnosti određenog dijela elektroenergetske mreže. Koristeći stvarna mjerenja i podatke dobivene od strane HEP ODS-a ovaj model će prikazati kako različiti faktori, uključujući potrošnju električne energije od strane korisnika, te varijacije u proizvodnji iz solarnih elektrana utječu na kapacitet prihvata u mreži.

Ključne riječi: fleksibilnost mreže, napredna brojila, kapacitet mreže, elektroenergetska mreža

Summary

The flexibility of the electrical power grid, as well as all connected participants and elements, is becoming an increasingly significant topic in the field of power systems research. Modern technological innovations are driving the greater integration of various renewable energy sources (RES) and smart devices into the electrical power system, requiring adaptation and optimization of the entire system. Particularly significant is the increasing installation of rooftop solar photovoltaic (PV) systems in households. This decentralized energy production is reshaping the traditional model of the electrical power grid, presenting new challenges and opportunities. As part of the Master's thesis, a model will be developed to enable the analysis and evaluation of the flexibility of a specific portion of the electrical power grid. Utilizing real measurements and data provided by the Distribution System Operator (DSO), this model will demonstrate how various factors, including electricity consumption by users and variations in production from solar PV systems, affect the hosting capacity of the electrical power grid.

Key words: grid flexibility, smart meters, grid capacity, power system

Skraćenice

HC	<i>Hosting Capacity</i>	kapacitet prihvata
OIE	<i>Renewable energy source</i>	obnovljivi izvori energije
DR	<i>Demand Response</i>	upravljanje potrošnjom
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>	napredni mjerni sustav
TS	<i>Transformer Substation</i>	transformatorska stanica
PV	<i>Photovoltaic</i>	fotonaponski (npr. sustav)
EV	<i>Electric Vehicle</i>	električno vozilo