

Tomislav Antić
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.antic@fer.hr

Anton Marušić
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
anton.marusic@hep.hr

Kristijan Frano Čavar
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
kristijan.cavar@hep.hr

Lovro Lukač
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
lovro.lukac@fer.hr

Anđelko Tunjić
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
andjelko.tunjic@hep.hr

Vedran Radošević
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
vedran.radosevic@hep.hr

Tomislav Capuder
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.capuder@fer.hr

Ivan Periša
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
ivan.perisa@hep.hr

Aleksandar Milković
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
aleksandar.milkovic@hep.hr

PRIMJENA INOVATIVNIH KONCEPATA U PROCJENI MOGUĆNOSTI PRIKLJUČENJA DISTRIBUIRANIH IZVORA ENERGIJE NA MREŽU

SAŽETAK

U distribucijskoj mreži je sve veći udio priključenih distribuiranih izvora, a operatori distribucijskog sustava se kontinuirano susreću s novim zahtjevima za priključenje. U ovom referatu se daje prikaz trenutnog postupka priključenja na distribucijsku mrežu u Republici Hrvatskoj te se daje uvod u inovativne koncepte izračuna prihvatnog kapaciteta mreže i dinamičkih pogonskih envelopea. Na primjeru stvarnih niskonaponskih i sredjonaponskih distribucijskih mreža izračunato je koliko distribuiranih izvora mreža može prihvatiti te su dobivene vrijednosti instalirane snage novih proizvodnih i potrošačkih jedinica uspoređene s vrijednostima definiranim u regulatornom okviru.

Ključne riječi: distribucijske mreže, distribuirani izvori energije, priključenje na mrežu, prihvatni kapacitet mreže, dinamičke pogonske envelope

APPLICATION OF INNOVATIVE CONCEPTS IN ASSESSING THE POSSIBILITY OF CONNECTING DISTRIBUTED ENERGY SOURCES TO THE NETWORK

SUMMARY

The share of distributed energy resources in distribution networks is increasing, and distribution system operators are continuously facing new connection requests. This paper presents an overview of the current connection procedure to the distribution network in Croatia and provides an introduction to innovative concepts for calculating the network's hosting capacity and dynamic operating envelopes. Using real examples from low-voltage and medium-voltage distribution networks, it is calculated how many distributed energy resources the network can accommodate, and the obtained values of installed power from new generation and consumption units are compared with values defined in the regulatory framework.

Key words: distribution networks, distributed energy resources, dynamic operating envelopes, hosting capacity, network connection

1. UVOD

S ciljem smanjenja emisija štetnih stakleničkih plinova, ali i povećanja energetske sigurnosti te smanjenja ovisnosti o uvozu energije i fosilnih goriva, politike Europske unije usmjerene su na ubrzanje energetske tranzicije i povećanje udjela obnovljivih izvora energije (OIE) [1]. Takve politike zajedno sa smanjenjem cijena niskouglijčnih tehnologija i bržim povratom investicija dovode do povećanja instaliranog kapaciteta OIE [2]. Povećanje instaliranog kapaciteta je posebno značajno u distribucijskoj mreži pa je tako priključna snaga svih elektrana u distribucijskoj mreži u Republici Hrvatskoj krajem 2024. iznosila 1.178 MW dok je krajem 2023. godine ta brojka bila 790 MW. Ne postoji naznaka usporenja tog trenda te se HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o. (HEP ODS) suočava s rastućim brojem novih zahtjeva za priključenje dodatnog proizvodnog kapaciteta. U Europi raste broj električnih vozila (EV) i posljedično punionica [3] te toplinskih pumpi [4]. Za očekivati je pojavu sličnih trendova i u Hrvatskoj, što će kreirati nove izazove u planiranju i vođenju distribucijske mreže za HEP ODS.

Visok udio niskouglijčnih tehnologija u distribucijskoj mreži može dovesti do narušavanja strujno-naponskih prilika. Nekoordinirano priključenje sunčanih elektrana može dovesti do pojave previsokih iznosa napona [5] i nedozvoljene naponske nesimetrija [6]. Integracija punionica EV dovodi do pojave podnapona [7], dok gotovo sve niskouglijčne tehnologije doprinose harmoničkom onečišćenju distribucijske mreže [8].

Kako bi se osiguralo izbjegavanje svih navedenih problema, u literaturi se sve češće proučava planski koncept izračuna prihvatnog kapaciteta mreže (eng. *hosting capacity*). Koncept se izračunava kao maksimalna priključna snaga distribuiranih izvora energije koju je moguće priključiti u svako čvorište promatrane distribucijske mreže [9]. Postoji velik broj metoda i korištenih modela za procjenu mogućnosti prihvata distribuiranih izvora energije [10], no u najvećem broju slučajeva se izračun temelji na primjeni formulacije (optimalnih) tokova snaga [11]. Bez obzira na korištenu metodu izračuna, *hosting capacity* kao koncept je definiran kao analiza najgoreg slučaja, što ovaj planski pristup čini vrlo konzervativnim i ograničavajućim za daljnju instalaciju distribuiranih izvora. **Analiza najgoreg slučaja u ovom kontekstu znači da se početno stanje distribucijske mreže definira tako da dopuštena priključna snaga novih jedinica bude najmanja, npr., u slučaju priključenja novih elektrana na mrežu, promatra se početni slučaj u kojemu je početno opterećenje u mreži najmanje, pri čemu su naponi najviši i pri čemu ima najmanje dostupnog prostora za nove elektrane.** Konzervativnost pristupa je glavni razlog istraživanja mogućnosti povećanja prihvatnog kapaciteta mreže [12]. Bez obzira na povećanje mogućnosti prihvata novih distribuiranih jedinica u distribucijsku mrežu, *hosting capacity* i dalje ostaje statička vrijednost koja se ne mijenja u vremenu, tj., maksimalna snaga razmjene s mrežom u svakom čvorištu ostaje ista bez obzira na stvarno stanje u mreži.

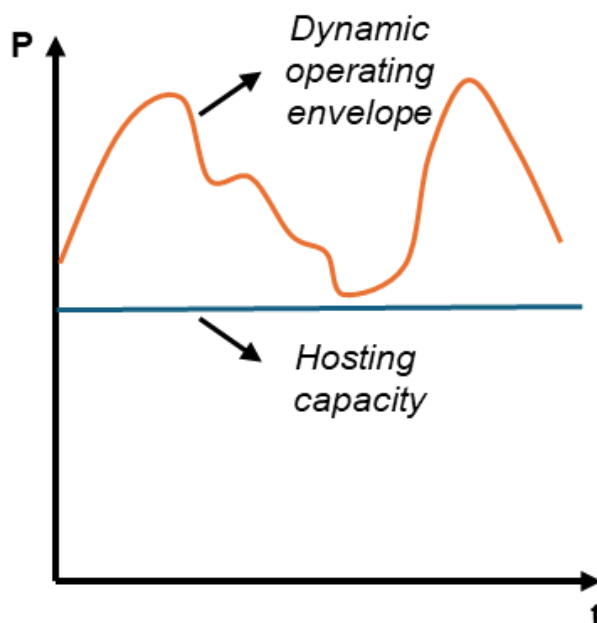
Iz tog razloga se u literaturi sve češće promatra koncept dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*), koncepta u kojem se dozvoljena proizvodnja i/ili potrošnja distribuiranih izvora određuje za svaki promatrani vremenski trenutak [13]. U literaturi se envelope računaju na temelju estimacije stanja za sljedeći vremenski trenutak [14] ili na temelju predviđanja početnog opterećenja mreže za dan unaprijed [15]. Metode za izračun pogonskih envelopea ostaju nepromijenjene u odnosu na određivanje mogućnosti mreže za prihvata novih distribuiranih izvora te se najčešće koriste formulacije temeljene na (optimalnim) tokovima snage. Ovaj koncept bi se u hrvatskom regulatornom okviru najviše mogao poistovjetiti s fleksibilnim ugovorom o priključenju i korištenju mreže, kod kojih postoji ograničenje prava na korištenje cjelokupne priključne snage [16].

Slika 1 prikazuje temeljnu razliku između dva spomenuta koncepta, a detaljnije pojašnjenje bit će dano u nastavku ovog referata. Sumarno, u članku će se analizirati sljedeće:

- Postojeći regulatorni okvir i zakonske odredbe i kako se oba koncepta uklapaju u njih
- Usporedba izračunatih vrijednosti proizvodnje i potrošnje u oba koncepta i usporedba s ograničenjima definiranim u Mrežnim pravilima
- Pregled zahtjeva i potrebnih sljedećih koraka kako bi se osigurala implementacija koncepta u distribucijskim mrežama Republike Hrvatske.

Poglavlje 2 daje pregled postojećeg zakonodavnog okvira vezanog uz priključenje novih distribuiranih jedinica u sredjonaponsku i niskonaponsku distribucijsku mrežu, poglavlje 3 prikazuje matematički model optimalnih tokova snaga korišten za izračun prihvatnog kapaciteta (*hosting capacity*) i

pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*), poglavlje 4 prikazuje najvažnije informacije o analiziranim mrežama, definirane scenarije i studije slučaja, rezultati su prikazani u poglavlju 5, dok su zaključak i smjernice za implementaciju koncepata dani u poglavlju 6.



Slika 1 *Hosting capacity* i *dynamic operating envelopes* - razlike u konceptima

2. PREGLED ZAKONODAVNOG OKVIRA

2.1. Postupak priključenja proizvodnih postrojenja na distribucijsku mrežu

S obzirom na sve veći broj zahtjeva za priključenje novih proizvodnih postrojenja na distribucijsku mrežu, važno je imati jasno definiran postupak procjene mogućnosti priključenja. Detaljan prikaz svih koraka definiranih zakonima i važećim regulativama te razlike u postupku priključenja ovisno o snazi novog postrojenja dan je u referatu [17]. Iz tog razloga će se u ovom referatu prikazati samo najvažniji koraci nužni za razumijevanje provedenih analiza za koje su rezultati prikazani u nadolazećim poglavljima.

2.1.1. Priključenje proizvodnog postrojenja na instalaciju postojećeg krajnjeg kupca

Ovakva instalacija proizvodnog postrojenja najčešće se javlja u NN distribucijskoj mreži u slučaju jednostavnog priključenja postrojenja na mrežu, npr., priključenje sunčane elektrane na postojeću instalaciju krajnjeg kupca kategorije kućanstvo. Osnovni koraci jednostavnog priključenja su:

- Izdavanje elektroenergetske suglasnosti
- Izgradnja priključka, opremanje obračunskog mjernog mjesta (OMM), stavljanje priključka i OMM-a pod napon te izdavanje potvrde o početku korištenja mreže za pojedino OMM

Razlikuju se dva slučaja, prvi u kojemu je priključna snaga u smjeru predaje u mrežu do uključivo 3,68 kW jednofazno, odnosno 11,04 kW trofazno, bez povećanja priključne snage u smjeru preuzimanja iz mreže i uz zadržavanje iste faznosti priključka i drugi slučaj u kojemu je priključna snaga proizvodnog postrojenja do uključivo 50 kW čija instalirana snaga nije veća od priključne snage krajnjeg kupca navedene u postojećoj Elektroenergetskoj suglasnosti ili ugovoru o korištenju mreže, uz zadržavanje iste faznosti.

Prema Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu [18], u prvom se slučaju proces priključenja odvija na način da se prvo ODS-u **dostavi obavijest o namjeri priključenja proizvodnog postrojenja na instalaciju postojećeg krajnjeg kupca**, uz koju je potrebno dostaviti i dokaz o uplati troškova za opremanje OMM-a, glavni projekt proizvodnog postrojenja, potvrdu o uporabljivosti elektroenergetskog postrojenja i instalacije, izvještaj o parametranju proizvodnih jedinica prema zahtjevima iz Mrežnih pravila, certifikate za ugrađenu opremu proizvodnog postrojenja i dokumentaciju kojom se rješavaju pitanja vlasništva. Nakon zaprimanja obavijesti o namjeri priključenja proizvodnog postrojenja, ODS je dužan provjeriti mogućnost priključenja proizvodnog postrojenja, a u slučaju da priključenje nije moguće realizirati jednostavnim priključkom, o tome je dužan pisanim putem obavijestiti podnositelja zahtjeva u roku 30 dana od dana zaprimanja obavijesti o namjeri priključenja proizvodnog postrojenja. U slučaju kada postoji mogućnost priključenja proizvodnog postrojenja jednostavnim priključkom, operator distribucijskog sustava dužan je u roku 30 dana od dana zaprimanja obavijesti o namjeri priključenja proizvodnog postrojenja, opremiti OMM kupca s vlastitom proizvodnjom i korisniku mreže dostaviti obavijest o mogućnosti priključenja, ažurirani prilog iz ugovora o korištenju mreže u kojem se evidentira nova priključna snaga te potvrdu za trajni pogon kojom se potvrđuje promjena statusa korisnika mreže. Uvjet za izdavanje potvrde za trajni pogon je sklapanje ugovora o opskrbi krajnjeg kupca kojim je reguliran i otkup električne energije ili ugovora o opskrbi i ugovora o otkupu.

U drugom slučaju, ODS-u se **dostavlja zahtjev za provjeru mogućnosti priključenja proizvodnog postrojenja na instalaciju postojećeg krajnjeg kupca**, uz koji je potrebno dostaviti i glavni projekt proizvodnog postrojenja ili idejno rješenje s tehničkim opisom i osnovnim podacima o građevini te izjave projektanta i dokaze o vlasništvu. Operator distribucijskog sustava na temelju urednog i potpunog zahtjeva za provjeru mogućnosti priključenja vrši provjeru mogućnosti priključenja i u roku 15 dana izdaje obavijest o mogućnosti priključenja koja sadrži uvjete pod kojima postoji mogućnost priključenja, odnosno obrazloženje nepostojanja uvjeta za priključenje proizvodnog postrojenja na postojeću instalaciju. Nakon podmirivanja cjelokupnih troškova iz ponude za opremanje OMM-a, izgradnje proizvodnog postrojenja, te ispunjavanja uvjeta iz obavijesti o mogućnosti priključenja, vlasnik građevine dostavlja ODS-u zahtjev za promjenu statusa korisnika mreže uz odgovarajuće priloge. Na temelju zaprimljenog zahtjeva za promjenu statusa korisnika mreže, operator distribucijskog sustava u roku 30 dana od primitka urednog i potpunog zahtjeva u sklopu potvrde za trajni pogon dostavlja vlasniku građevine i potvrdu o promjeni statusa korisnika mreže, te ažurirani prilog iz ugovora o korištenju mreže u kojem se evidentira nova priključna snaga.

2.1.2. Priključenje proizvođača i operatora skladišta energije

Prema Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu [18], definiran je novi postupak priključenja za proizvođača i operatora skladišta energije koji podrazumijeva provođenje i prethodnog postupka priključenja. Prethodni postupak priključenja proizvođača i operatora skladišta energije provodi se u svrhu ishoda energetskog odobrenja za izgradnju proizvodnog postrojenja odnosno postrojenja za skladištenje energije, u skladu s odredbama Zakona o tržištu električne energije. Osnovni koraci prethodnog postupka priključenja se sastoje od:

- podnošenja zahtjeva za dostavu podataka o stanju u mreži i dostave podataka za potrebe izrade Elaborata mogućnosti priključenja (EMP-a)
- izrade EMP-a
- podnošenja zahtjeva za izdavanje preliminarog mišljenja operatora distribucijskog sustava o mogućnosti priključenja te o mogućim opcijama za priključenje
- pregleda i ocjene EMP-a od strane operatora distribucijskog sustava
- dostave preliminarog mišljenja o mogućnosti priključenja

Preliminarnim mišljenjem o mogućnosti priključenja daje se ocjena mogućnosti priključenja za svaku razmatranu opciju priključenja, uvažavajući aktualni desetgodišnji plan razvoja mreže ODS-a te procijenjeni rok za izgradnju priključka. Preliminarno mišljenje o mogućnosti priključenja ne jamči mogućnost priključenja na mrežu u skladu s razmatranim opcijama priključenja ako bi se priključenjem prekoračila maksimalno dopuštena priključna snaga svih proizvodnih postrojenja koja se priključuju na SN mrežu napajanu iz razmatrane TS VN/SN, u skladu s Mrežnim pravilima, u slučaju da je nakon izdavanja preliminarog mišljenja operator distribucijskog sustava sklopio ugovore o priključenju za druga proizvodna

postrojenja, odnosno ako su druga proizvodna postrojenja započela postupak priključenja. Rok važenja preliminarne mišljenja o mogućnosti priključenja je jedna godina od dana izdavanja, te je u tom roku investitor dužan ishoditi energetska odobrenje u svrhu pokretanja postupka priključenja kod ODS-a.

Nakon provedenog preliminarne postupka priključenja i ishođenja energetske odobrenja, provodi se postupak priključenja proizvođača i operatora skladišta energije u skladu s odredbama ZOTEE-a. Osnovni koraci postupka priključenja proizvođača i operatora skladišta energije sastoje se od sljedećih koraka:

- 1) podnošenja zahtjeva za dostavu podataka o stanju u mreži za potrebe izrade EOTRP-a od strane ovlaštenog izrađivača i dostave podataka o stanju u mreži za potrebe izrade EOTRP-a od strane ODS-a
- 2) izrade EOTRP-a od strane ovlaštenog izrađivača
- 3) podnošenja zahtjeva za izdavanje odluke o prihvatljivosti EOTRP-a od strane ovlaštenog izrađivača te dostave odluke o prihvatljivosti EOTRP-a od strane ODS-a
- 4) podnošenja zahtjeva za izdavanje odluke o prihvatljivosti EOTRP-a
- 5) dostave odluke o prihvatljivosti EOTRP-a
- 6) sklapanja ugovora o priključenju
- 7) izdavanja EES-a
- 8) izdavanja potvrde glavnog projekta
- 9) uplate naknade za priključenje
- 10) izgradnje priključka i stvaranja tehničkih uvjeta u mreži
- 11) sklapanja ugovora o korištenju mreže
- 12) stavljanja priključka pod napon i izdavanja potvrde o početku korištenja mreže
- 13) pokusnog rada i izdavanja potvrde za trajni pogon, ako je u EES uvjetovan pokusni rad.

Više detalja o izradi EOTRP-a dostupno je u Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu [18]. U određenim se slučajevima kroz analize provedene u EOTRP-u može pokazati da je za priključenje proizvodnog postrojenja ili postrojenja za skladištenje energije potrebno stvoriti tehničke uvjete u mreži, pri čemu je potrebno ocijeniti mogućnost primjene operativnog ograničenja korištenja priključne snage. U slučaju priključenja korisnika mreže prije stvaranja tehničkih uvjeta u mreži kada postoji mogućnost primjene operativnog ograničenja korištenja priključne snage, potrebno je u EOTRP-u, na temelju dostavljenih ulaznih podataka o stanju u mreži procijeniti:

- strujne ili naponske okolnosti na kritičnim mjestima u mreži koje su razlog ograničenja
- okvirni preliminarni iznos potrebnog operativnog ograničenja korištenja priključne snage
- okvirni preliminarni iznos trajanja aktivacije operativnog ograničenja korištenja priključne snage.

Realizacija operativnog ograničenja korištenja priključne snage ostvaruje se na zahtjev investitora odnosno vlasnika građevine, a odnosi između operatora distribucijskog sustava i investitora odnosno vlasnika građevine po pitanju realizacije operativnog ograničenja korištenja priključne snage uređuju se sklapanjem dodatka ugovora o priključenju. Realizacija operativnog ograničenja korištenja priključne snage smatra se nestandardnom izvedbom priključka te se svi dodatni troškovi koji nisu sadržani u tipskoj izvedbi priključka za predmetnu kategoriju korisnika mreže naplaćuju po stvarnom trošku i nisu dio naknade za priključenje, u skladu s Metodologijom za utvrđivanje naknade za priključenje na elektroenergetsku mrežu. Operator distribucijskog sustava ne snosi troškove stvarno neisporučene električne energije zbog primjene operativnog ograničenja korištenja priključne snage do definiranog roka za stvaranje tehničkih uvjeta u mreži iz ugovora o priključenju.

Koncept operativnog ograničenja korištenja priključne snage u najvećoj mjeri odgovara konceptu dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*) s obzirom na to da u oba koncepta u mreži ne postoje uvjeti za rad postrojenja s maksimalnom snagom

Osim analiza provedenih EOTRP-om, za proizvodna postrojenja snage veće od 50 kVA potrebno je izraditi i Elaborat utjecaja elektrane na mrežu te Elaborat podešenja zaštite. Dodatno, prilikom pokusnog rada postrojenja potrebno je provesti dodatna ispitivanja koja provodi voditelj ispitivanja odabran od strane korisnika mreže u koordinaciji s ODS-om, prema odobrenom Operativnom planu i programu ispitivanja u pokusnom radu (OPIP). OPIP se izrađuje na tipskom predlošku ODS-a ovisno o vrsti i tipu proizvodnog postrojenja.

2.2. Postupak priključenja novih potrošača na distribucijsku mrežu

Osim priključenja novih proizvodnih postrojenja na mrežu, sve su češći zahtjevi za priključenjem novih potrošačkih jedinica kao što su punionice EV ili toplinske pumpe. Iako je u nekim slučajevima priključenje punionice ili toplinske pumpe moguće bez ikakvih dodatnih analiza (priključenje dodatnog opterećenja ne uzrokuje prekoračenje priključne snage), u drugim slučajevima je potrebno provesti određen skup analiza kojima će se utvrditi mogućnost priključenja takvih jedinica. U određenim slučajevima je moguće povećati postojeću priključnu snagu i priključiti nove potrošačke jedinice, a u određenim slučajevima, npr., priključenje punionica EV velike snage na SN razinu su potrebne detaljnije analize.

2.2.1. Povećanje priključne snage bez promjena na priključku

U slučaju da se postupak jednostavnog priključenja provodi samo radi povećanja priključne snage postojećeg korisnika mreže na jednom OMM, zbog promjene na građevini koja se može izvoditi bez građevinske dozvole i glavnog projekta, vlasnik građevine podnosi samo zahtjev za izdavanje EES, uz priloženu potvrdu o uporabljivosti elektroenergetskog postrojenja i instalacije, ako se izvode zahvati na postojećoj instalaciji. ODS izdaje EES u roku 15 dana od dana zaprimanja urednog i potpunog zahtjeva te uz EES dostavlja vlasniku građevine ponudu o priključenju i ažurirani prilog iz ugovora o korištenju mreže u kojem se evidentira nova priključna snaga. Nakon uplate naknade za priključenje iz ponude o priključenju i nakon izvršenih radova na priključku i OMM započinje korištenje mreže po uvjetima iz izdane EES.

2.2.2. Postupak kod promjene na priključku građevine

Kod promjena na priključku građevine definiranih Općim uvjetima, postupak priključenja se provodi kao jednostavno ili složeno priključenje, ovisno o složenosti promjene na priključku. Kod promjena na priključku zbog promjene na građevini za koju nije potrebno ishođenje građevinske dozvole ili izrada glavnog projekta, kada nema promjene priključne snage i promjene broja OMM-a, ne provodi se postupak priključenja i ne izdaje se EES, u slučaju:

- zamjene mjernog uređaja (brojilo, strujni i naponski mjerni transformatori)
- ugradnje ograničavala strujnog opterećenja
- promjene kategorije potrošnje promjene tarifnog modela
- ograničenja snage zbog promjene tarifnog modela
- promjene tipa priključnog voda
- prelaska s 10 kV naponske razine na 20 kV kod korisnika mreže na srednjem naponu
- premještanja priključno-mjernog ormara.

2.3. Mrežna pravila distribucijskog sustava

Pojedini važni koraci koje je potrebno pratiti prilikom priključenja novih jedinica na mrežu definirani su i Mrežnim pravilima distribucijskog sustava [19]. Osim definiranja tehničkih uvjeta koji moraju biti zadovoljeni prilikom priključenja novih jedinica na mrežu, Mrežna pravila definiraju i granične vrijednosti

pojedinih veličina kao što su napon ili naponska nesimetrija. Veličine su u najvećem broju slučajeva usklađene s europskim normama kao što je EN 50160.

Mrežna pravila distribucijskog sustava definiraju maksimalne priključne snage proizvodnog postrojenja koje se može priključiti na određenu naponsku razinu. Na niskonaponsku mrežu priključuje se postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 500 kW, prema sljedećim kriterijima:

- na niskonaponski vod može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 100 kW i
- na niskonaponske sabirnice u transformatorskoj stanici TS 10(20)/0,4 kV može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 500 kW.

Na sredjonaponsku mrežu može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 20 MW, prema sljedećim kriterijima:

- na sredjonaponski vod, sabirnice TS SN/SN i rasklopište u sredjonaponskoj mreži može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do 10 MW i
- na sredjonaponske sabirnice u transformatorskoj stanici TS VN/SN mogu se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 20 MW, uz uvjet da se za priključnu snagu jednaku ili veću od 10 MW u EOTRP-u provede analiza prijenosne mreže u suradnji s operatorom prijenosnog sustava.

Iako Mrežna pravila definiraju i ostale važne uvjete koje je potrebno ostvariti prije priključenja na mrežu, te predstavljaju detaljno razrađenu kategorizaciju i podjelu korisnika mreže, u ovom referatu će se prikazati podjela korisnika mreže u grupe prema priključnoj snazi s obzirom na to da će se te snage promatrati kao ograničenja u izračunima prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*).

Za kategoriju kupca, podjela je sljedeća:

- 1) Priključna snaga kupaca s jednofaznim priključkom iznosi do uključivo 11,5 kW.
- 2) Podjela kupaca s trofaznim priključkom, s obzirom na priključnu snagu:
 - Grupa 1: do uključivo 20 kW,
 - Grupa 2: od 20 kW do uključivo 50 kW,
 - Grupa 3: od 50 kW do uključivo 500 kW,
 - Grupa 4: od 500 kW do uključivo 10 MW te
 - Grupa 5: od 10 MW do uključivo 20 MW.
- 3) Najmanja priključna snaga novih kupaca s jednofaznim priključkom iznosi 4,6 kW, a novih kupaca s trofaznim priključkom 11,04 kW.

Za kategoriju proizvođača, podjela je sljedeća:

- 1) Priključna snaga proizvođača s jednofaznim priključkom iznosi do uključivo 3,68 kW.
- 2) Podjela proizvođača s trofaznim priključkom, s obzirom na priključnu snagu:
 - Grupa 1: do uključivo 50 kW,
 - Grupa 2: od 50 kW do uključivo 100 kW,
 - Grupa 3: od 100 kW do uključivo 500 kW,
 - Grupa 4: od 500 kW do uključivo 5 MW,

- Grupa 5: od 5 MW do 10 MW te
- Grupa 6: od uključivo 10 MW do uključivo 20 MW.

3. MATEMATIČKI MODEL OPTIMALNIH TOKOVA SNAGA

U ovom će se referatu za jednu SN i jednu NN distribucijsku mrežu na području Hrvatske izračunati njihov prihvatni kapacitet (*hosting capacity*) kao i dinamičke pogonske envelope (*dynamic operating envelopes*). U analizama će se koristiti implementacija matematičkog modela optimalnih tokova snaga u programskom jeziku *Python*. Za analize SN mreža će se koristiti formulacija optimalnih tokova snaga prilagođena za jednofazni ekvivalent mreže, dok će se za NN mreže koristiti formulacija trofaznih optimalnih tokova snaga koja uzima u obzir i odnose među fazama. U oba slučaja koristit će se nelinerani, nekonveksni optimizacijski model, koji unatoč povećanoj računarskoj kompleksnosti u obzir uzima sve fizikalne zakone i kao takav jedini daje točne rezultate u provedenim analizama.

Jednadžbe (1) i (2) definiraju pad napona za svaku fazu p uzduž voda koji povezuje čvorišta i i j , za svaki vremenski trenutak t .

$$U_{j,p,t}^{re} = U_{i,p,t}^{re} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} R_{l,pq} \cdot I_{l,ij,q,t}^{re} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} X_{l,pq} \cdot I_{l,ij,q,t}^{im} \quad (1)$$

$$U_{j,p,t}^{im} = U_{i,p,t}^{im} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} R_{l,pq} \cdot I_{l,ij,q,t}^{im} - \sum_{q \in \{a,b,c\}} X_{l,pq} \cdot I_{l,ij,q,t}^{re} \quad (2)$$

U početnom slučaju prije instalacije novih proizvodnih i/ili potrošačkih jedinica, u mreži već postoje potrošači i/ili proizvođači, koji su definirani radnom i jalovom snagom potrošnje (*teret*) i/ili proizvodnje (*gen*). S obzirom na to da se u analizama promatra mogućnost priključenja distribuiranih izvora (*DI*), koji su također definirani radnom i jalovom snagom, potrebno je povezati napone, struje i snage, što je omogućeno jednadžbama (3) i (4). Izračunate struje se koriste i za osiguravanje Kirchhoffovog zakona struje, što je prikazano jednadžbom (5).

$$P_{n,p,t}^{teret/gen/DI} = U_{n,p,t}^{re} \cdot (I_{n,p,t}^{teret/gen/DI})^{re} + U_{n,p,t}^{im} \cdot (I_{n,p,t}^{teret/gen/DI})^{im} \quad (3)$$

$$Q_{n,p,t}^{teret/gen/DI} = U_{n,p,t}^{im} \cdot (I_{n,p,t}^{teret/gen/DI})^{re} - U_{n,p,t}^{re} \cdot (I_{n,p,t}^{teret/gen/DI})^{im} \quad (4)$$

$$(I_{i,p,t}^{teret})^{re/im} - (I_{i,p,t}^{gen})^{re/im} \pm (I_{i,p,t}^{DI})^{re/im} - I_{l,h \rightarrow i,p,t}^{re/im} + I_{l,i \rightarrow j,p,t}^{re/im} = 0 \quad (5)$$

Osim jednadžbi kojima se definiraju fizikalne zakonitosti, važno je uvesti ograničenja na svaku od ključnih veličina. Jedno od ključnih ograničenja je i ono na maksimalnu dozvoljenu priključnu snagu distribuiranih izvora koja je definirana Mrežnim pravilima distribucijskog sustava [19], definirano jednadžbom (6). Jednadžbu je moguće modificirati te promatrati ograničenje snage za jednofazno priključenje. Također, potrebno je osigurati da su vrijednosti napona unutar dozvoljenih granica od $\pm 10\% U_n$, da struja voda nije veća od maksimalne strujne opteretivosti, te da naponska nesimetrija ne prijeđe 2%, zbog čega su uvedene jednadžbe (7)-(9).

$$P_{n,t}^{DI} \leq P_n^{max} \quad (6)$$

$$(U^{min})^2 \leq (U_{n,p,t}^{re})^2 + (U_{n,p,t}^{im})^2 \leq (U^{max})^2 \quad (7)$$

$$(I_{l,ij,p,t}^{re})^2 + (I_{l,ij,p,t}^{im})^2 \leq (I_{l,ij}^{max})^2 \quad (8)$$

$$nesimetrija_{n,t} \leq 2\% \quad (9)$$

Funkcija cilja je maksimizirati prihvrat dodatnih proizvodnih ili potrošačkih jedinica, tj., maksimizirati njihovu snagu u svakom trenutku, što je prikazano jednadžbom (10).

$$\max \sum_{t \in T} \sum_{p \in \{a,b,c\}} \sum_{n \in N} P_{n,p,t}^{DI} \quad (10)$$

Prikazani model je prikladan u izračunu pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*). U ovom slučaju, koncept predstavlja izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) za svaki vremenski trenutak, što znači da se prikazani model može koristiti u izračunu prihvatnog kapaciteta mreže kada se promatra samo jedan vremenski trenutak. Također, prikazani model se koristi u slučaju trofaznih modela mreže, što je česta pretpostavka u modeliranju NN mreža. Kod SN mreža, često se koristi jednofazni ekvivalent mreže što zahtijeva modifikaciju predstavljenog modela, točnije, njegovo pojednostavljenje. Pojednostavljeni *DistFlow* model optimalnih tokova snaga [20] će se koristiti i u ovom referatu prilikom analize SN mreže.

4. STUDIJA SLUČAJA

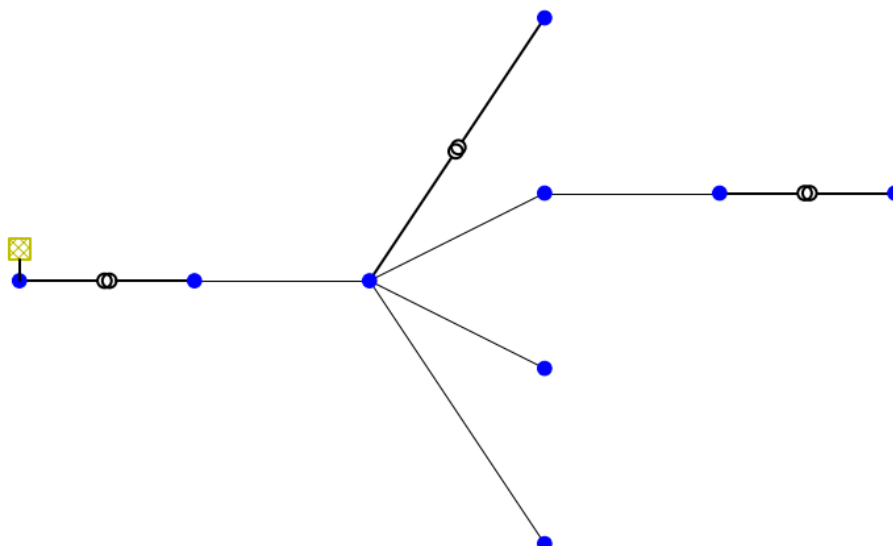
Izračun prihvatnog kapaciteta (*hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*) te usporedba s ograničenjima definiranim u hrvatskom regulatornom i zakonodavnom okviru prikazat će se zasebno na jednom primjeru SN i jednom NN distribucijske mreže.

4.1. Srednjonaponska mreža

Slika 2 prikazuje model stvarne SN distribucijske mreže koja je dio hrvatskog distribucijskog sustava. Mreža se sastoji od devet čvorišta, 5 vodova i 3 transformatora. Jedno čvorište je naponske razine 110 kV i njemu je priključena aktivna mreža koja predstavlja vezu s ostatkom elektroenergetskog sustava. Šest čvorišta je naponske razine 35 kV, a neka od njih su transformatorima povezana s 10 kV čvorištima. U dva 10 kV čvorišta su priključeni tereti koji predstavljaju opterećenje dijela mreže koji se napaja iz tih točaka te se nove jedinice mogu priključiti isključivo u ta čvorišta. Mjerenja potrebna za izradu scenarija i provođenje analiza dobivena su iz SCADA sustava i sumarnih brojlara koja se nalaze u transformatorskim stanicama. Za prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) se u danom skupu mjerenja traže minimalna i maksimalna opterećenja za svako čvorište kako bi se kreirali scenariji za rubne slučajeve izračuna mogućnosti prihvata proizvodnih postrojenja i dodatne potrošnje električne energije u mreži. U slučaju izračuna mogućnosti prihvata novih proizvodnih postrojenja, promatra se scenarij minimalnog opterećenja s obzirom da su u njemu naponi u mreži najviši i instalirana snaga proizvodnih postrojenja određena za taj scenarij, tj., vremenski trenutak, neće uzrokovati mrežne probleme niti za jedan drugi vremenski trenutak. U slučaju analize mogućnosti priključenja dodatnog opterećenja, promatra se scenarij u kojem je početno opterećenje najveće, pri čemu su naponi najmanji, a strujna opteretivost vodova najveća. Tako izračunato dodatno opterećenje osigurava da niti u jednom drugom scenariju, tj., vremenskom trenutku strujno-naponske prilike u mreži neće biti narušene. Za izračun dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*) koriste se stvarne krivulje opterećenja za jedan nasumično odabran dan. Tako kreirane krivulje predstavljaju estimaciju ili predviđanje potrošnje električne energije za dan unaprijed te se za svaki sat u danu zasebno računa vrijednost snage proizvodnje i dodatne potrošnje u promatranom dijelu mreže na isti način na koji se računa prihvatni kapacitet (*hosting capacity*).

Kao što je ranije spomenuto, SN distribucijska mreža će se modelirati koristeći jednofazni ekvivalent u kojem se ne promatraju odnosi među fazama i u kojoj se pretpostavlja simetričnost mreže. Iz tog razloga nema potrebe za definiranjem slučajeva u kojima su krajnji korisnici jednofazno ili trofazno priključeni na mrežu te se definiraju isključivo slučajevi u kojima se procjenjuje mogućnost priključenja proizvodnih postrojenja i dodatnih potrošačkih jedinica u mrežu:

- **Slučaj 1** – analiza mogućnosti priključenja proizvodnih jedinica
- **Slučaj 2** – analiza mogućnosti priključenja potrošačkih jedinica



Slika 2 Model SN distribucijske mreže

Za oba slučaja potrebno je definirati scenarije kako bi se omogućila analiza mogućnosti priključenja kroz koncepte prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelopea. U slučaju priključenja proizvodnih jedinica u scenariju 1.1 se pretpostavlja instalirana snaga od 5 MW u oba čvorišta što je gornja granica priključne snage grupe 4 u Mrežnim pravilima distribucijskog sustava. U scenariju 1.2 pretpostavljena snaga iznosi 10 MW što je gornja granica priključne snage za grupu 5 u Mrežnim pravilima, ali je ujedno i granica priključne snage za koju u analizu mogućnosti priključenja nije potrebno uzeti u obzir prijenosnu mrežu. U scenarijima 1.3 se računa prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) za slučaj minimalnog početnog opterećenja u 10 kV čvorištima, dok se u scenariju 1.4 računaju dinamičke pogonske envelopee (*dynamic operating envelopes*) na temelju satnih krivulja opterećenja koje predstavljaju dan unaprijed predviđanje. Scenariji su definirani na sljedeći način:

- **Scenarij 1.1** – priključna snaga 5 MW
- **Scenarij 1.2** – priključna snaga 10 MW
- **Scenarij 1.3** – izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*)
- **Scenarij 1.4** – izračun dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*)

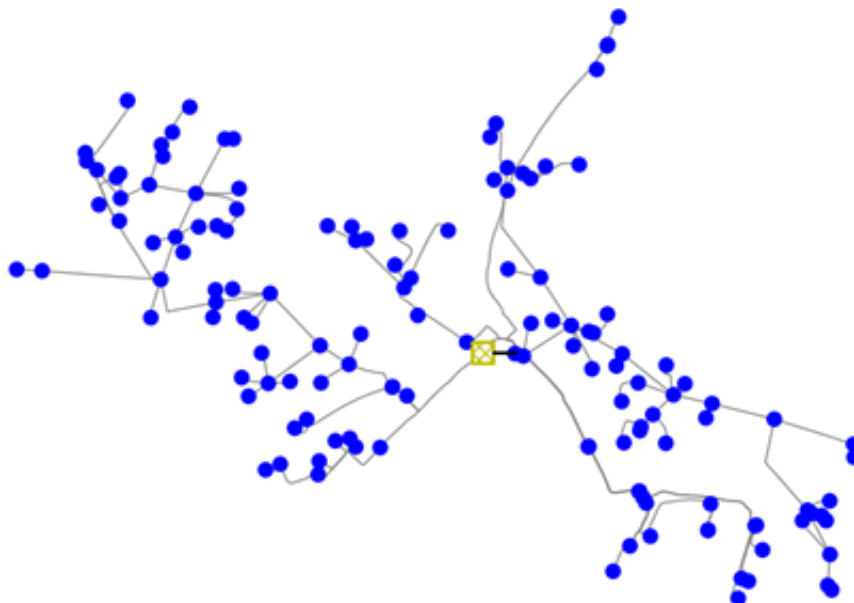
U slučaju 2 kada se promatra mogućnost priključenja novih potrošačkih jedinica, u prvom scenariju 2.1 se promatra priključna snaga od 10 MW što je ujedno i granica grupe 4 u Mrežnim pravilima distribucijskog sustava. S obzirom na to da se zadržava pretpostavka o potrebi promatranja prijenosne mreže u slučaju priključenja snage veće od 10 MW, ovaj scenarij je jedini u kojemu se promatra ograničenje definirano Mrežnim pravilima. U scenariju 2.2 se računa prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) za slučaj u kojem je početno opterećenje u čvorištima najveće, dok se u scenariju 2.3 računaju dinamičke pogonske envelopee na temelju satnih iznosa opterećenja. Scenariji su sumarno definirani na sljedeći način:

- **Scenarij 2.1** – priključna snaga 10 MW
- **Scenarij 2.2** – izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*)
- **Scenarij 2.3** – izračun dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*)

4.2. Niskonaponska mreža

Slika 3 prikazuje model NN mreže koji predstavlja stvarnu prigradsku NN mrežu. NN mreža se sastoji od 140 čvorišta i 139 vodova i kabela. Krajnji korisnici se nalaze u 88 čvorišta. U promatranoj mreži nema instaliranih sunčanih elektrana. Za proračune su prikupljeni podaci s naprednih brojila krajnjih

korisnika. U prikupljenom setu podataka je za svakog korisnika vremenski trenutak u kojemu je potrošnja električne energije bila minimalna, odnosno maksimalna, što odgovara scenarijima potrebnima za izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*). Za izračun dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*) koriste se mjerenja prikupljena s naprednih brojila u jednom danu koja predstavljaju predviđanje (estimaciju) potrošnje električne energije za dan unaprijed.



Slika 3 Model NN distribucijske mreže

S obzirom na to da Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu i Mrežna pravila distribucijskog sustava razlikuju jednofazne i trofazne korisnike, te različite priključne snage za takve korisnike, u ovom će se radu definirati četiri slučaja u analizi NN mreže:

- **Slučaj 1** – svi krajnji korisnici u promatranoj NN mreži su **jednofazno** priključeni na mrežu, **priključenje proizvodnih postrojenja**
- **Slučaj 2** – svi krajnji korisnici u promatranoj NN mreži su **trofazno** priključeni na mrežu, **priključenje proizvodnih postrojenja**
- **Slučaj 3** – svi krajnji korisnici u promatranoj NN mreži su **jednofazno** priključeni na mrežu, **priključenje dodatnog opterećenja**
- **Slučaj 4** – svi krajnji korisnici u promatranoj NN mreži su **trofazno** priključeni na mrežu, **priključenje dodatnog opterećenja**

Osim dva slučaja potrebno je definirati i različite scenarije kako bi se olakšala usporedba ograničenja definiranih u Mrežnim pravilima i Pravilima o priključenju s rezultatima izračuna prihvatnog kapaciteta (*hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*). Scenariji se razlikuju za slučajeve 1 i 2 te 3 i 4, tj., za slučajeve jednofaznog i trofaznog priključenja te za izračun instalirane snage proizvodnih postrojenja i dodatnog opterećenja.

U slučaju proizvodnog postrojenja za slučaj jednofaznog priključenja definiraju se scenariji 1.1.-1.3..U scenariju 1.1., pretpostavljena snaga proizvodnog postrojenja u svakom čvorištu iznosi 3,68 kW, što je i teorijski maksimum prema Mrežnim pravilima. U scenarijima 1.2. i 1.3. ne promatra se ograničenje priključne snage već se računaju prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) i dinamičke pogonske envelope (*dynamic operating envelopes*) čije su vrijednosti određene mrežnim ograničenjima napona, struje i naponske nesimetrije. U slučaju 2, kada su korisnici i nova postrojenja trofazno priključeni na mrežu definirano je pet scenarija. U scenariju 2.1. je pretpostavka da su sva nova postrojenja priključena sa snagom 11,04 kW (3,68 kW/fazi), što je i ograničenje za postupak priključenja na temelju jednostavne obavijesti prema Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu. U scenarijima 2 i 3 pretpostavljene

priključne snage su 20, odnosno 50 kW, što su ograničenja priključne snage grupa 1 i 2 u Mrežnim pravilima. Također, 50 kW je i granica priključne snage za koju prema Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu nije potrebno raditi EUEM, EPZ, EOTRP te nije potreban pokusni rad, što znači da ODS nema mogućnost adekvatne provjere utjecaja elektrane na mrežu. U scenarijima 2.4 i 2.5. nema ograničenja na priključnu snagu već je ona izračunata prema definiranim tehničkim ograničenjima promatrane NN mreže. Sumarno, scenariji su definirani na sljedeći način:

- **Scenarij 1.1 i scenarij 2.1** – priključna snaga 3,68 kW/fazi (jednofazno i trofazno)
- **Scenarij 1.2 i scenarij 2.4** – izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*)
- **Scenarij 1.3 i scenarij 2.5** – izračun dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*)
- **Scenarij 2.2** – priključna snaga 20 kW (trofazno)
- **Scenarij 2.3** – priključna snaga 50 kW (trofazno)

U slučaju priključenja dodatnog opterećenja (npr., punionica EV) na NN mrežu ponovno se promatraju isti slučajevi jednofaznog (Slučaj 3) i trofaznog (Slučaj 4) priključenja na mrežu. Ponovno se definiraju različiti scenariji koji su nešto drugačiji u odnosu na priključenje proizvodnog postrojenja, prvenstveno jer Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu i Mrežna pravila distribucijskog sustava ne definiraju postupak priključenja dodatnog opterećenja jednako kao postupak priključenja proizvodnih postrojenja. Mrežnim pravilima je definirano ograničenje jednofazno priključenog opterećenja od 11,5 kW. Kako bi se izračunala snaga dodatnog opterećenja koje se može priključiti poštujući sva ograničenja, definiraju se scenariji 3.1 i 3.2, pri čemu se u scenariju 3.1 snaga dodatnog opterećenja računa kao statička vrijednost izračunata kao razlika granične vrijednosti i vremenskog trenutka s maksimalnim početnim opterećenjem za svako čvorište, dok se u scenariju 3.2 snaga dodatnog tereta računa za svaki sat kao razlika maksimalnog jednofaznog opterećenja i početnog opterećenja u danom satu. U scenariju 3.3 se računa prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) za dodatno opterećenje u slučaju kada je početno postojeće opterećenje maksimalno, a u scenariju 3.4 se računaju dinamičke pogonske envelopee (*dynamic operating envelopes*). U slučaju trofaznog priključenja u scenarijima 4.1 i 4.2. se kao ukupno opterećenje u svakom čvorištu definiraju granice grupa 1 i 2 definiranih u Mrežnim pravilima. U Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu nije definirano za koje snage dodatnog opterećenja nije potrebna izrada elaborata pa se u ovom referatu promatraju iste grupe kao i u slučaju proizvodnih postrojenja sa snagama iznosa 50 kW i 100 kW. U scenarijima 4.3 i 4.4 računaju se prihvatni kapacitet (*hosting capacity*) i dinamičke pogonske envelopee (*dynamic operating envelopes*) za trofazno priključene potrošačke jedinice. Scenariji su sljedeći:

- **Scenarij 3.1 i scenarij 3.2** – ukupna priključna snaga u čvorištu je 11,5 kW, statičke vrijednosti i vremenski promjenjive vrijednosti (jednofazno)
- **Scenarij 3.3 i scenarij 4.3** – izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*)
- **Scenarij 3.4 i scenarij 4.4** – izračun dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*)
- **Scenarij 4.1** – priključna snaga 50 kW (trofazno)
- **Scenarij 4.2** – priključna snaga 100 kW (trofazno)

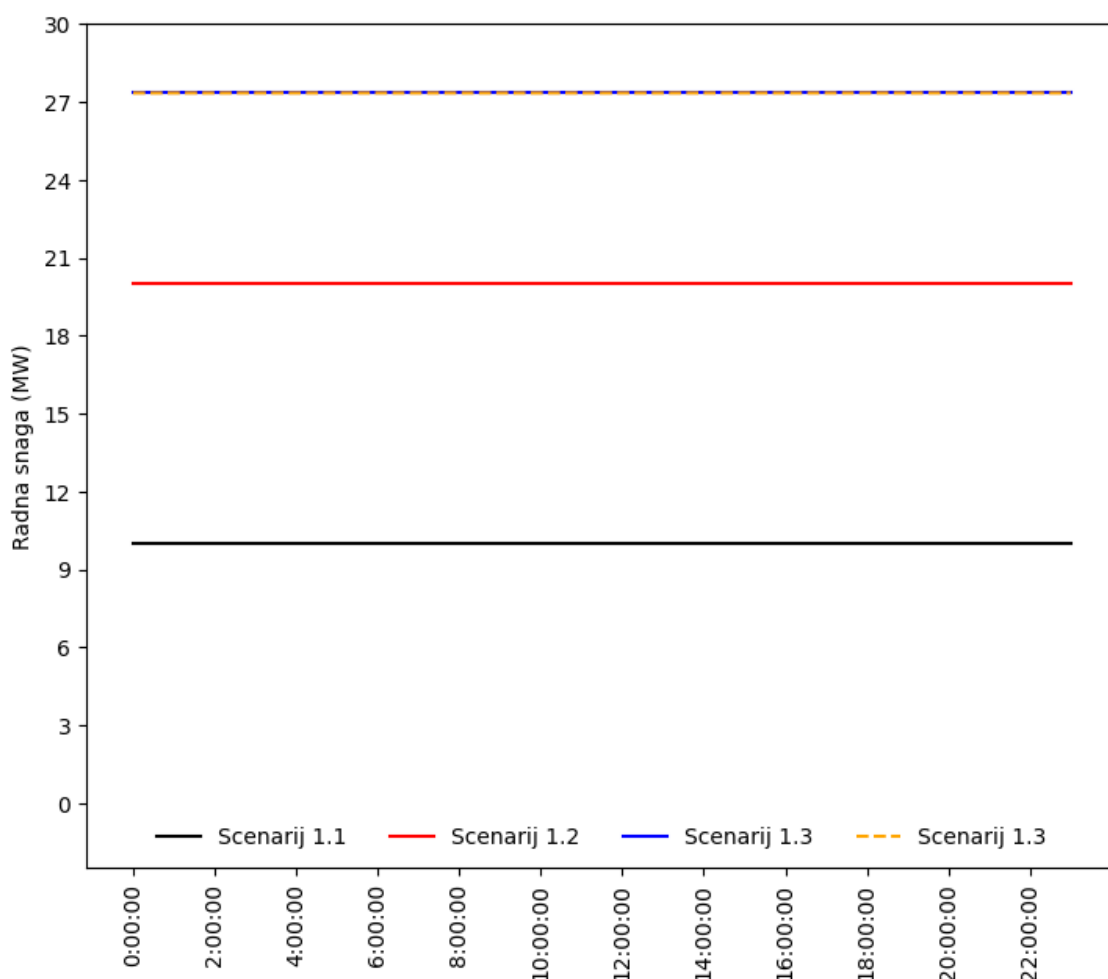
5. REZULTATI

Rezultati prikazuju izračunate vrijednosti priključne snage proizvodnih i potrošačkih jedinica za SN i NN distribucijsku mrežu za sve definirane scenarije. Uspoređuju se vrijednosti definirane Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu i Mrežnim pravilima distribucijskog sustava s vrijednostima prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelopea (*dynamic operating envelopes*). Važno je napomenuti da rezultati ne odgovaraju niti jednoj tehnologiji već prikazuju samo teorijski izračunate snage proizvodnih postrojenja i potrošačkih jedinica. To znači da će u slučaju izračuna snage

instaliranih proizvodnih postrojenja snaga u večernjim satima biti različita od nule s obzirom na to da se ne radi o sunčanim elektranama već riječ može biti i o drugoj vrsti elektrane ili pražnjenju baterijskog spremnika.

5.1. Sredjonaponska mreža

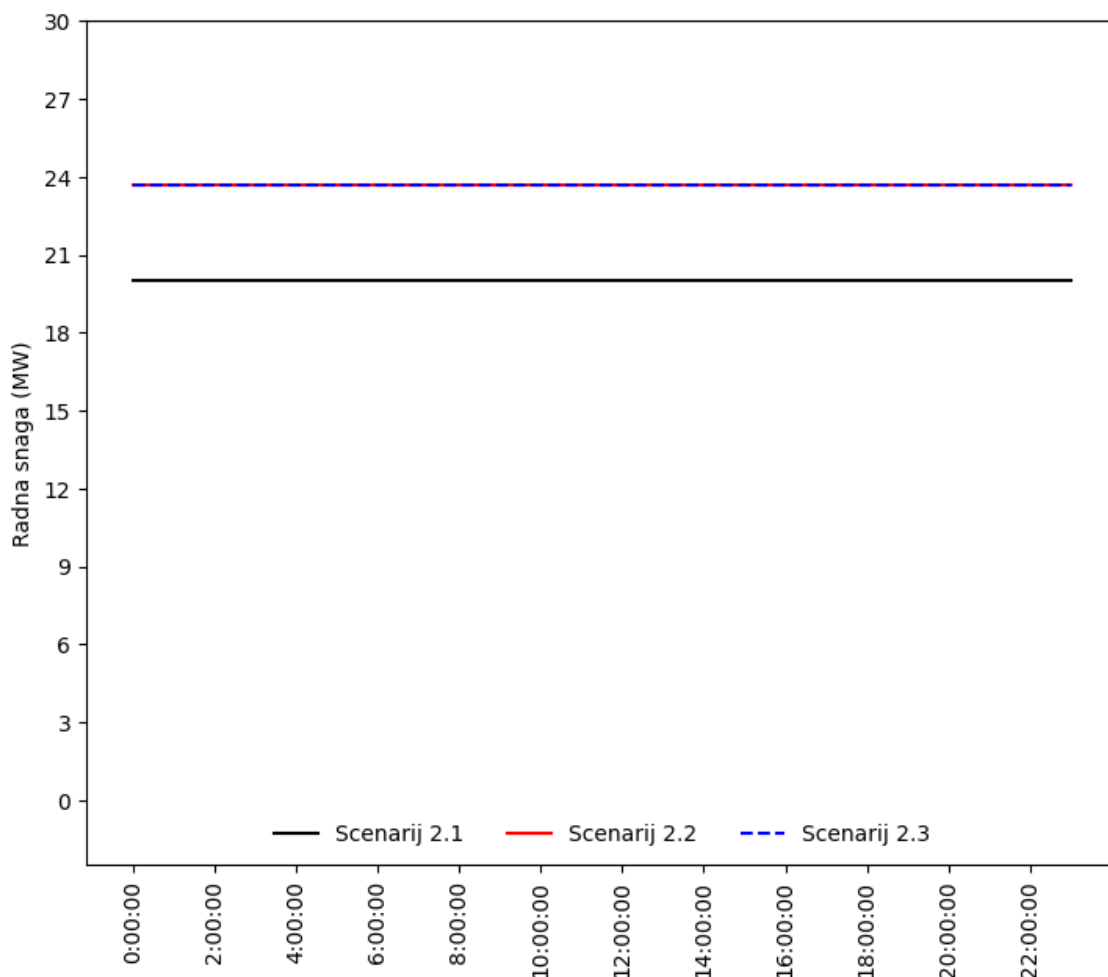
Slika 4 prikazuje rezultate analize mogućnosti priključenja proizvodnih postrojenja u SN mreži. U scenarijima 1.1 i 1.2 vrijednosti su statičke i iznose 10 MW, odnosno 20 MW što odgovara priključnim snagama od 5 i 10 MW u dva čvorišta u promatranoj SN mreži. U scenariju 1.3 u kojem se računa prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*), izračunata priključna snaga proizvodnih postrojenja iznosi 27,3 MW što je značajno više od ograničenja prema mrežnim pravilima, čak i od maksimalne dopuštene snage grupe 6 od 20 MW, što je i gornja granica priključenja na distribucijsku mrežu. U scenariju 1.4 u kojem se računaju dinamičke pogonske envelope (*dynamic operating envelopes*) snaga proizvodnje se mijenja u gotovo zanemarivom iznosu što rezultira skoro statičkom krivuljom proizvodnje. To je rezultat malog početnog opterećenja koje se mjeri u kilovatima što ne predstavlja značajan iznos početnog opterećenja u provedenoj analizi. Ovi rezultati jasno pokazuju prednost koncepta prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) s obzirom na to da se oslanja isključivo na definirana tehnička ograničenja a ne na unaprijed postavljene granice priključne snage. Prednost drugog analiziranog koncepta dinamičkih pogonskih envelopaa (*dynamic operating envelopes*) u promatranoj SN mreži nije jasno vidljiv zbog malog iznosa početnog opterećenja te je za očekivati da se prednost koncepta vidi na nižim naponskim razinama i u mrežama sa značajnijim iznosom početnog opterećenja.



Slika 4 Instalirana snaga proizvodnih postrojenja u SN mreži - Slučaj 1

Slika 5 prikazuje rezultate analize u slučaju 2, tj., procjene mogućnosti priključenja dodatnih potrošačkih jedinica u SN mrežu. Zaključci su slični kao i u slučaju analize mogućnosti priključenja

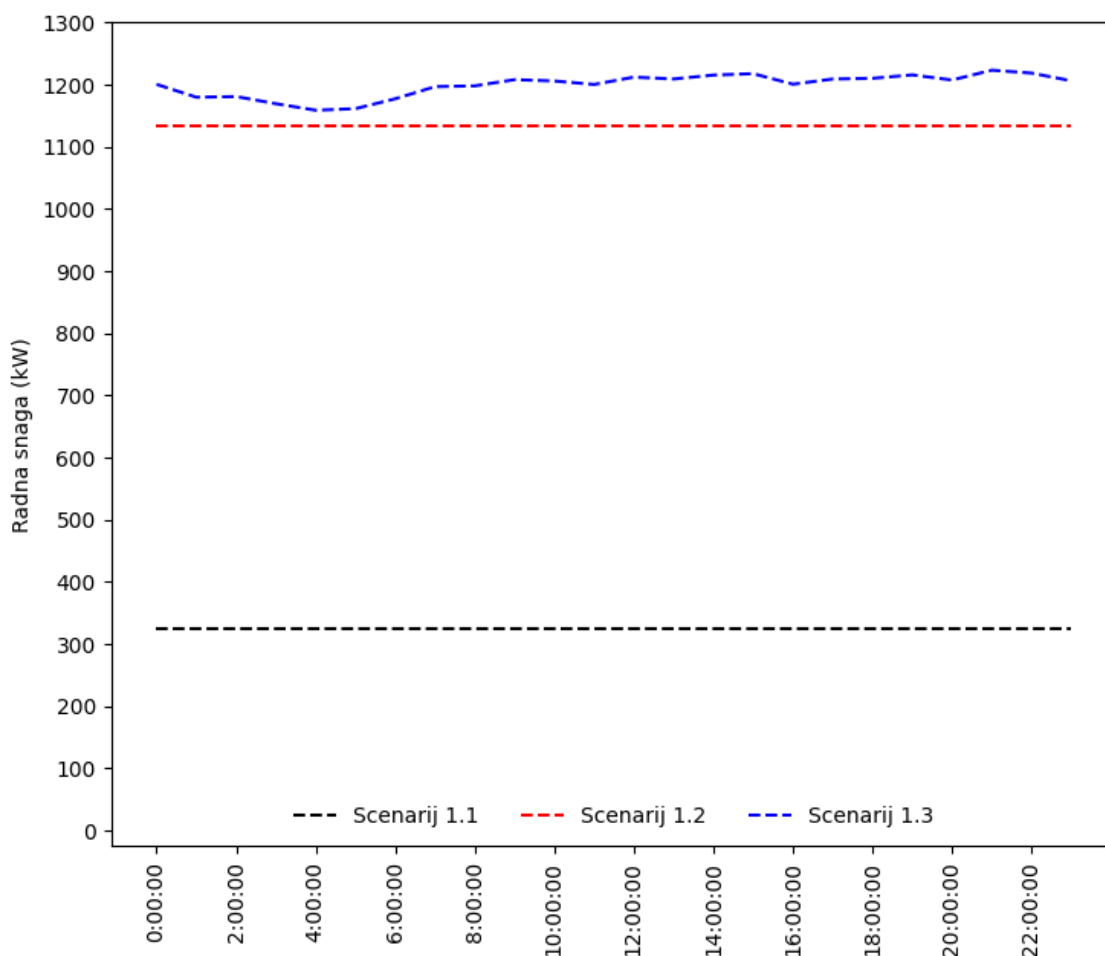
proizvodnih postrojenja na mrežu. Teorijski scenarij 2.1 dozvoljava priključenja dodatnog opterećenja najmanje snage od 20 MW iako je razlika u odnosu na vrijednosti dobivene u scenarijima 2.2 i 2.3 manja u odnosu na analizu mogućnosti priključenja proizvodnih postrojenja. U scenarijima 2.2 i 2.3 vrijednost priključne snage je oko 23,7 MW, ovisno o vremenskom trenutku. Prednosti dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*) su i u ovom slučaju nedovoljno jasne s obzirom na to da se početno promatrana potrošnja električne energije ne mijenja značajno u različitim vremenskim trenucima.



Slika 5 Snaga dodatnog opterećenja u SN mreži - Slučaj 2

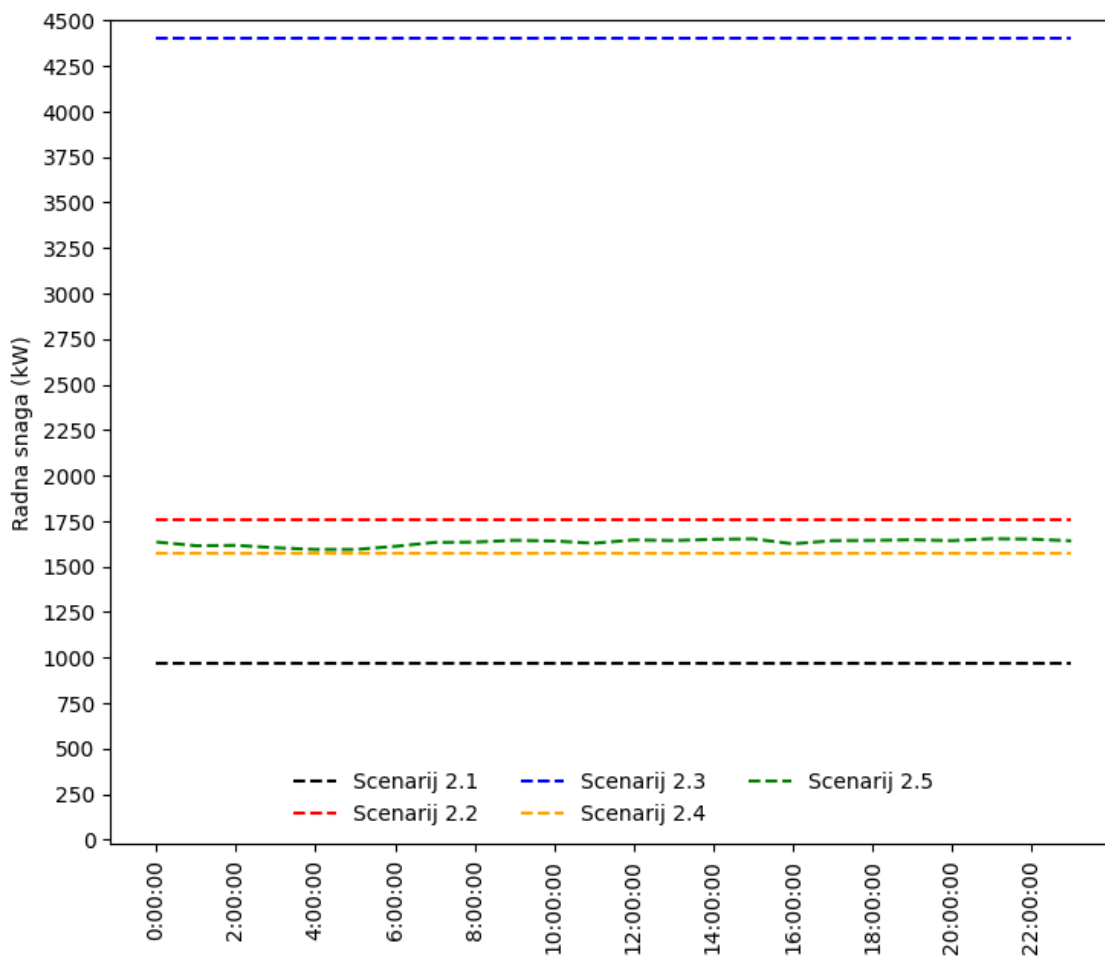
5.2. Niskonaponska mreža

Slika 6 prikazuje rezultate analize mogućnosti priključenja jednofaznih proizvodnih postrojenja. Ukupna instalirana snaga u scenariju 1.1 iznosi 323,84 kW, što odgovara ograničenju u Mrežnim pravilima od 3,68 kW za svakog od 88 korisnika u promatranoj NN mreži. Preostale dvije krivulje u grafu prikazuju situaciju u kojoj nisu promatrana ograničenja definirana u Mrežnim pravilima već je priključna snaga proizvodnih postrojenja izračunata promatrajući samo definirana tehnička ograničenja NN mreže. U slučaju izračuna prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) dobivena vrijednost priključne snage iznosi 1.134,53 kW te ona ostaje nepromijenjena kroz vrijeme, bez obzira na stanje u mreži s obzirom na to da je izračun proveden za rubni scenariji minimalnog početnog opterećenja mreže. U slučaju dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*) rezultati pokazuju vrijednost ukupne instalirane snage u intervalu između 1.158,64 i 1.223,07 kW, što pokazuje prednost ovog koncepta u odnosu na statički proračun prihvatnog kapaciteta mreže. Izračuni provedeni za oba koncepta pokazuju da je u ovom slučaju moguće instalirati proizvodna postrojenja gotovo četiri puta veće snage nego što je to slučaj u teorijskom maksimumu prema Mrežnim pravilima. Ovi rezultati pokazuju potrebu za provođenjem određenih analiza u postupcima priključenja na NN mrežu s obzirom na to da postojeća ograničenja mogu usporiti energetske tranzicije i limitirati instaliranu snagu novih proizvodnih postrojenja u mreži.



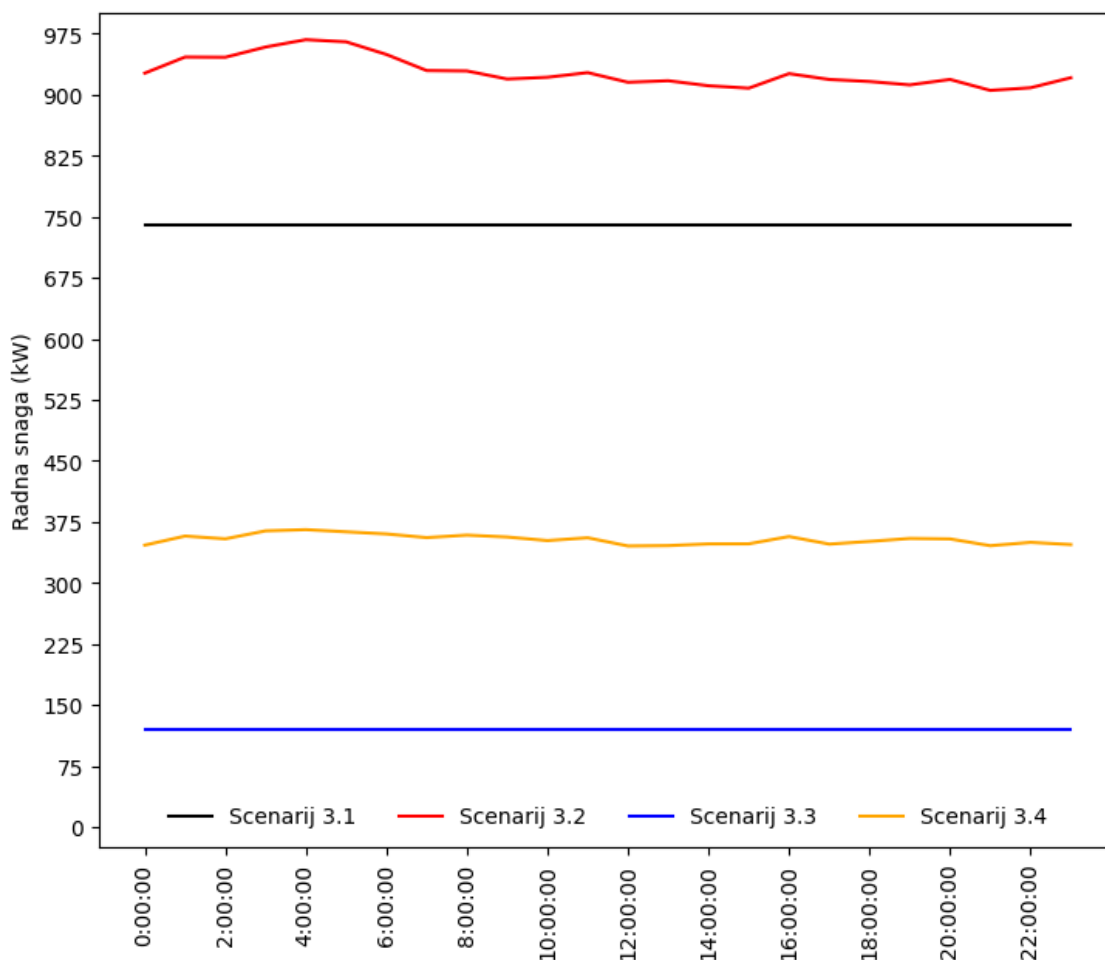
Slika 6 Instalirana snaga proizvodnih postrojenja u NN mreži - Slučaj 1 (jednofazno priključenje)

Slika 7 prikazuje rezultate provedene analize za slučaj trofaznog priključenja proizvodnih postrojenja na mrežu. Kao i u slučaju jednofaznog, ograničenje od 3,68 kW/fazi, odnosno instalirana snaga od 971,52 kW u scenariju 2.1 je manja nego u ostalim scenarijima. U scenarijima 2.2 i 2.3 u kojima se promatraju maksimalne priključne snage grupa 1 i 2 u Mrežnim pravilima distribucijskog sustava i granica od 50 kW za koju nije potrebna izrada elaborata prema Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu. U scenariju 2.2 priključna snaga iznosi 1.760,00 kW, a u scenariju 2.3 4.400,00 kW. Uspoređujući te rezultate s onima u scenariju 2.4 za koji prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) iznosi 1.569,64 kW i u scenariju 2.5 gdje se snaga proizvodnje mijenja kroz vrijeme u intervalu između 1.594,41 i 1.651,51 kW, vidljivo je da oslanjanje na Mrežna pravila i Pravila o priključenju u teoriji može dovesti do dopuštanja instaliranja prevelike količine proizvodnih postrojenja koja mogu narušiti vrijednosti strujno-naponskih prilika i siguran pogon distribucijskog sustava. Ti rezultati su samo pokazatelj potrebe za uvođenjem spomenutih koncepata.



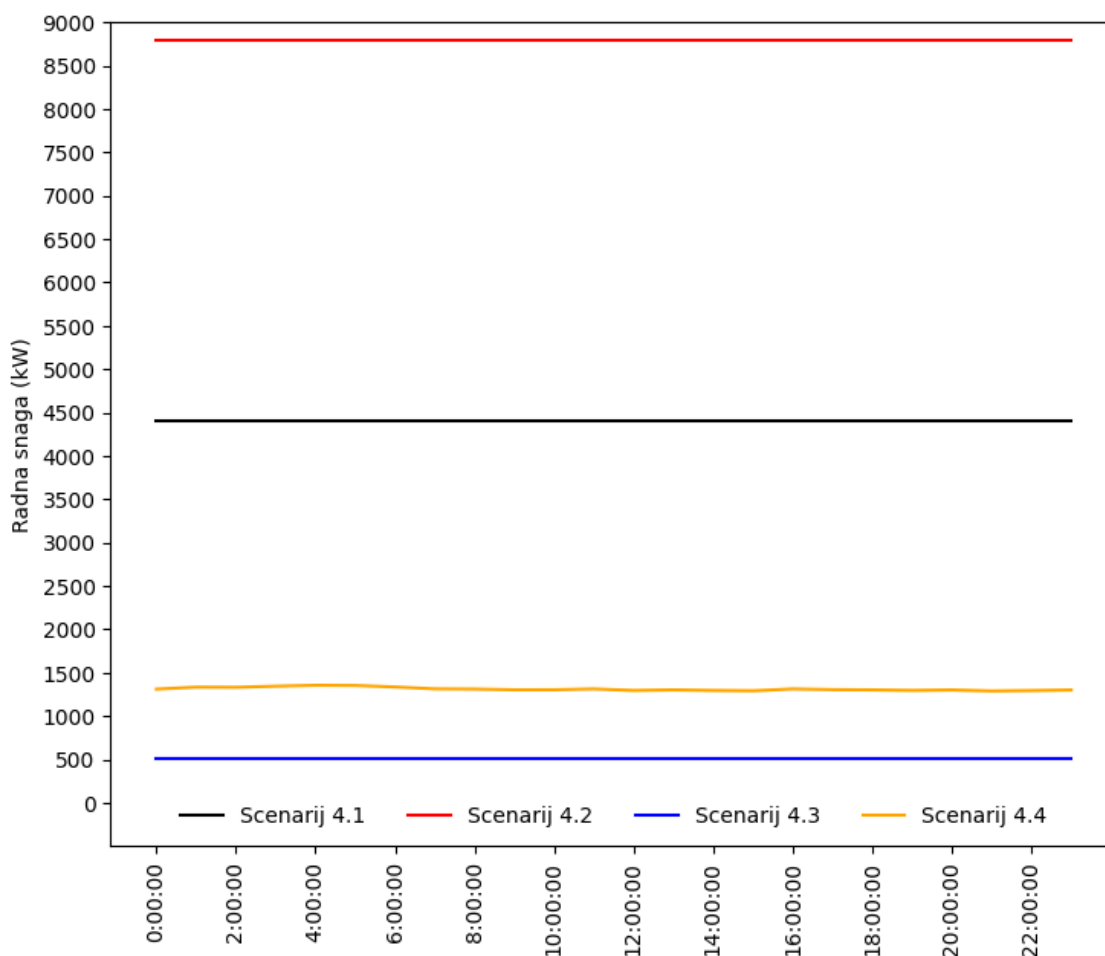
Slika 7 Instalirana snaga proizvodnih postrojenja u NN mreži - Slučaj 2 (trofazno priključenje)

Slika 8 prikazuje rezultate analize mogućnosti priključenja dodatnog opterećenja za jednofazne krajnje korisnike. Mrežna pravila definiraju da ukupna priključna snaga jednofaznog krajnjeg korisnika ne smije prijeći 11,5 kW. Poštujući to ograničenje, u scenariju 3.1 u kojem se promatra mogućnost priključenja dodatnog opterećenja u odnosu na početnu maksimalnu snagu svakog krajnjeg korisnika snaga dodatnog opterećenja iznosi 740,84 kW, a u scenariju 3.2 u kojem se promatra satno promjenjiva potrošnja električne energije snaga dodatnog opterećenja je između 905,33 kW i 967,67 kW. U scenarijima 3.3 i 3.4 se računaju prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*), čija je vrijednost 120,42 kW te dinamičke pogonske envelope (*dynamic operating envelopes*) gdje su vrijednosti dodatnog opterećenja između 345,53 kW i 365,61 kW. Rezultati pokazuju da oslanjanje isključivo na Mrežna pravila distribucijskog sustava nije dovoljno s obzirom na to da snaga od 11,5 kW za svakog korisnika mreže može dovesti do prekoračenja graničnih vrijednosti promatranih strujno-naponskih ograničenja mreže.



Slika 8 Snaga dodatnog opterećenja u NN mreži - Slučaj 3 (jednofazno priključenje)

Slika 9 prikazuje rezultate analize u posljednjem promatranom slučaju u kojem su krajnji korisnici trofazno priključeni na mrežu. U scenarijima 4.1 i 4.2 promatraju se granice definirane Mrežnim pravilima distribucijskog sustava. S obzirom na to da prema Pravilima o priključenju na distribucijsku mrežu za proizvodnja postrojenja iz grupe 1 i 2 u Mrežnim pravilima nije potrebna izrada elaborata, ista je pretpostavka napravljena i u ovoj analizi pa je tako iznos ukupnog opterećenja u scenariju 4.1 4.400,00 kW, a u scenariju 4.2 8.800 kW. I bez daljnjih analiza moguće je zaključiti da je riječ o prevelikim iznosima opterećenja, a rezultati u scenarijima 3.3 i 3.4 pokazuju da je prihvatni kapacitet mreže (*hosting capacity*) jednak 513,68 kW, dok se u dinamičkim pogonskim envelopama (*dynamic operating envelopes*) vrijednosti nalaze u intervalu između 1.288,56 kW i 1.354,73 kW. Osim što pokazuju potrebu za detaljnijim analizama mreže, rezultati analize u slučaju 4 jasno pokazuju prednost koncepta dinamičkih pogonskih envelopa (*dynamic operating envelopes*) i potrebu za odmakom analize rubnih scenarija što je izračun prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*).



Slika 9 Snaga dodatnog opterećenja u NN mreži - Slučaj 4 (trofazno priključenje)

6. ZAKLJUČAK

U distribucijskim mrežama kontinuirano raste instalirana snaga distribuirane proizvodnje, punionica električnih vozila i toplinskih pumpi. Ranije provedene analize pokazuju da priključenje niskouglijčnih tehnologija može dovesti do narušavanja strujno-naponskih prilika u distribucijskoj mreži čime se može ugroziti njezin siguran pogon. Bez obzira na to, operatori distribucijskog sustava se susreću s rastućim brojem zahtjeva za priključenje novih proizvodnih postrojenja na mrežu, a za očekivati je i porast broja zahtjeva za priključenje punionica EV-a. Tradicionalno se svaki zahtjev obrađuje pojedinačno što dovodi do zagušenja u obradi zahtjeva i usporavanju procesa priključenja na mrežu. Problemi se javljaju i na NN razini gdje se priključuju distribuirani izvori manje snage koji na agregiranoj razini mogu predstavljati značajan udio u ukupnoj proizvodnji ili potrošnji distribucijskog sustava. Izazovi u NN mreži dodatno dolaze do izražaja s obzirom na to da se ona u prošlosti nije planirala na jednak način kao i SN mreža te da je bila nedovoljno osmotriva. Iz tog razloga se u NN mrežama ne rade analize prikazane u ovom referatu.

U ovom referatu se daje pregled najvažnijih točaka hrvatskog regulatornog i zakonodavnog okvira koji se odnosi na priključenje distribuiranih izvora na mrežu, nužnih za razumijevanje provedenih analiza. Regulatorni i zakonodavni okvir daju uvid u dosadašnji postupak procjene mogućnosti priključenja na distribucijsku mrežu te granične snage proizvodnih postrojenja i potrošačkih jedinica koje se mogu priključiti na SN, odnosno na NN mrežu. Oslanjanje isključivo na te granice može biti konzervativno čime se podcjenjuje mogućnost mreže za prihvati novih tehnologija, dok u drugim slučajevima omogućava priključenje prevelike snage koja bi narušila normalan i siguran pogon distribucijske mreže. Iz tog razloga se u ovom referatu predstavljaju koncepti prihvatnog kapaciteta mreže (eng. *hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelope (eng. *dynamic operating envelopes*) u kojima se na temelju matematičke formulacija

optimalnih tokova snaga i definiranih mrežnih ograničenja računaju stvarno dostupni kapacitet mreže za prihvatanje novih tehnologija. U referatu se analiziraju SN i NN mreže te se izračunavaju vrijednosti oba koncepta uspoređujući s graničnim vrijednostima priključne snage definiranim u Mrežnim pravilima distribucijskog sustava.

Rezultati analize na primjeru jedne SN mreže pokazuju prednost koncepta prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) u odnosu na oslanjanje isključivo na granice definirane u mrežnim pravilima s obzirom na izračunati iznos instalirane snage od nekoliko megavata više, u slučajevima analize mogućnosti priključenja proizvodnih postrojenja i potrošačkih jedinica. Prednost dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*) u ovom slučaju nije jasno vidljiva s obzirom na to da su početni iznosi opterećenja izrazito niski te se ne mijenjaju značajno kroz vrijeme. Prednost ovog koncepta je jasnija u analizi NN mreže u kojoj se još jednom pokazalo da isključivo oslanjanje na granice u Mrežnim pravilima nije dovoljno i da bi se trebalo poticati detaljnije analiziranje prilika u NN mrežama s obzirom na to da u nekim slučajevima granice definirane Mrežnim pravilima podcjenjuju mogućnost prihvata distribuiranih izvora (npr., jednofazno priključenje proizvodnih postrojenja) dok u drugim slučajevima oslanjanje isključivo na definirane granice može dovesti do preopterećenja vodova i naponskih problema u mreži (npr., priključenje dodatnih potrošačkih jedinica). S obzirom na to da su za analizu korištene krivulje potrošnje električne energije za krajnje korisnike kategorije kućanstvo, izračun dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*) pokazuje da se uz upravljivost distribuiranih izvora vremenska promjenjivost potrošnje može iskoristiti za otključavanje dodatnog kapaciteta mreže i prihvatanje novih tehnologija.

Rezultati analiza pokazuju da predstavljeni koncepti mogu imati ulogu u ubrzavanju zelene energetske tranzicije kroz ubrzavanje procesa procjene mogućnosti priključenja distribuiranih izvora na mrežu, a istovremeno osiguravaju izbjegavanje nekoordiniranog priključenja distribuiranih izvora energije koje ugrožava siguran pogon distribucijske mreže. Trenutno su predstavljeni koncepti i dalje teorijski s obzirom na to da uvjeti za njihovu implementaciju nisu u potpunosti osigurani. Kako bi se operatoru distribucijskog sustava omogućilo njihovo korištenje, potrebno je ispuniti sljedeće uvjete:

- 1) Mapiranje SN i NN distribucijske mreže u GIS ili drugi sličan sustav, dostupnost tehničkih parametara distribucijske mreže koji su nužni za kreiranje digitalnog blizanca
- 2) Opremanje transformatorskih stanica i krajnjih korisnicima naprednom mjernom infrastrukturom, dostupnost mjerenja o potrošnji i proizvodnji električne energije u promatranoj mreži
- 3) Razvoj alata i programskih rješenja za proračune strujno-naponskih prilika u mreži i izračun koncepta prihvatnog kapaciteta mreže (*hosting capacity*) i dinamičkih pogonskih envelope (*dynamic operating envelopes*)
- 4) Razvoj ostalih potrebnih pomoćnih alata i programskih rješenja, npr., algoritmi za obradu podataka, uklanjanje grešaka i nedostajućih vrijednosti, uređivanje GIS podataka, predviđanje proizvodnje i potrošnje energije i estimacije stanja itd.
- 5) Dorada regulatornog i zakonodavnog okvira kojom bi se omogućilo ubrzavanje postupka procjene mogućnosti priključenja distribuiranih izvora energije
- 6) Digitalizacija distribucijske mreže i implementacija predstavljenih koncepta u centre vođenja

Djelomičnim ispunjavanjem ovih uvjeta stvorili bi se preduvjeti za odgovaranje na ključna pitanja u distribucijskim mrežama s visokim udjelom distribuiranih izvora te bi se olakšao i ubrzao njezin razvoj i omogućio daljnji razvoj programskih rješenja i alata potrebnih za rješavanje nadolazećih izazova i promjena.

7. LITERATURA

- [1] "Direktiva (EU) 2023/2413 Europskog parlamenta i Vijeća od 18. listopada 2023. o izmjeni Direktive (EU) 2018/2001, Uredbe (EU) 2018/1999 i Direktive 98/70/EZ u pogledu promicanja energije iz obnovljivih izvora te o stavljanju izvan snage Direktive Vijeća (EU) 2015/652." <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj?locale=hr> (accessed Mar. 03, 2025).

- [2] IRENA, "Renewable energy statistics 2024," Abu Dhabi, UAE, 2024.
- [3] IEA, "Global EV Outlook 2024," Pariz, Francuska. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- [4] IEA, "World Energy Outlook 2024," Pariz, Francuska, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
- [5] F. P. M. Kreuwel, W. B. Mol, J. Vilà-Guerau de Arellano, and C. C. van Heerwaarden, "Characterizing solar PV grid overvoltages by data blending advanced metering infrastructure with meteorology," *Sol. Energy*, vol. 227, pp. 312–320, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.09.009.
- [6] T. Antić, T. Capuder, and M. Bolfek, "A Comprehensive Analysis of the Voltage Unbalance Factor in PV and EV Rich Non-Synthetic Low Voltage Distribution Networks," *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 30, 2021.
- [7] B. Azzopardi and Y. Gabdullin, "Impacts of Electric Vehicles Charging in Low-Voltage Distribution Networks: A Case Study in Malta," *Energies*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: 10.3390/en17020289.
- [8] T. Antić and T. Capuder, "Utilization of physical devices for the improvement of power quality indicators during the COVID-19 pandemic and uncoordinated integration of low carbon units," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 32, p. 100926, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.SEGAN.2022.100926.
- [9] H. H. H. Mousa, K. Mahmoud, and M. Lehtonen, "A Comprehensive Review on Recent Developments of Hosting Capacity Estimation and Optimization for Active Distribution Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 18545–18593, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3359431.
- [10] M. ul Abideen, O. Ellabban, and L. Al-Fagih, "A Review of the Tools and Methods for Distribution Networks' Hosting Capacity Calculation," *Energies*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/en13112758.
- [11] T. Antić, A. Keane, and T. Capuder, "Impact of phase selection on accuracy and scalability in calculating distributed energy resources hosting capacity," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 39, p. 101473, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101473.
- [12] A. Rajabi, S. Elphick, J. David, A. Pors, and D. Robinson, "Innovative approaches for assessing and enhancing the hosting capacity of PV-rich distribution networks: An Australian perspective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 161, p. 112365, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112365.
- [13] M. Z. Liu, L. F. Ochoa, P. K. C. Wong, and J. Theunissen, "Using OPF Based Operating Envelopes to Facilitate Residential DER Services," *IEEE Trans. Smart Grid*, p. 1, 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3188927.
- [14] T. Milford and O. Krause, "Managing DER in Distribution Networks Using State Estimation & Dynamic Operating Envelopes," in *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715663.
- [15] A. Koirala, F. Geth, and T. Van Acker, "Day-ahead dynamic operating envelopes using stochastic unbalanced optimal power flow," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 40, p. 101528, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101528.
- [16] M. Skok, L. Wagmann, and M. Maričević, "FLEKSIBILNI UGOVORI O PRIKLJUČENJU I KORIŠTENJU MREŽE," *16. savjetovanje HRO CIGRE*. Šibenik, Hrvatska, 2023.
- [17] I. Burul, K. Ugarković, H. Jelić, V. Radošević, and C. Tomislav, "POSTUPCI PRIKLJUČENJA PROIZVODNIH POSTROJENJA NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU HEP-ODS-A," *I. savjetovanje o elektrodistributivnim mrežama Crne Gore*. Budva, Crna Gora, 2024.
- [18] HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o., *Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu*. 2023.
- [19] HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o., "Mrežna pravila distribucijskog sustava." https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html (accessed Mar. 12, 2025).
- [20] M. Baran and F. F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, 1989, doi: 10.1109/61.19266.