

**UNIVERZITET CRNE GORE**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

Veselin Ostojić

**PROCJENA KAPACITETA ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE ZA  
PRIKLJUČENJE PUNIONICA ZA ELEKTRIČNA VOZILA PRIMJENOM  
PRORAČUNA HARMONIJSKIH TOKOVA SNAGA**

Master rad

Podgorica, 2025. godine

## **PODACI O STUDENTU**

**Ime i prezime:** Veselin Ostojić

**Datum i mjesto rođenja:** 10.11.2000. godine, Podgorica, Crna Gora

**Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:** Energetika i automatika, 2023. godine

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

**Naziv master studija:** Elektroenergetski sistemi

**Naslov rada:** Procjena kapaciteta elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za električna vozila primjenom proračuna harmonijskih tokova snaga

**Fakultet na kojem je rad odbranjen:** Elektrotehnički fakultet

## **UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

**Datum prijave teme master rada:** 24.09.2025. godine

**Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema, komentor i mentor:** 16.10.2025. godine

**Komisija za ocjenu/odbranu rada:**

1. Prof. dr Martin Čalasan
2. Prof. dr Vladan Radulović
3. Prof. dr Jadranka Radović
4. Doc. dr Vladan Durković
5. Doc. dr Snežana Vujošević

**Datum odbrane:** 26.12.2025.godine

## Izjava o autorstvu

Potpisani: Veselin Ostojić

Broj indeksa/upisa: 7/23

### Izjavljujem

da je master rad pod naslovom: **Procjena kapaciteta elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za električna vozila primjenom proračuna harmonijskih tokova snaga**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cjelini ni u djelovima nije bio predložen za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio/la autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 19.12.2025. godine

Potpis magistranta

Veselin Ostojić

# Predgovor

Deregulacija elektroenergetskog sistema usloвила je promjenu elektrodistributivne mreže, od nekadašnje pasivne, ta mreža je danas okarakterisana kao aktivna. Sama deregulacija dovodi do otvaranja tržišta, odnosno ulazak na tržište novih, distribuiranih generatora električne energije. To dalje dovodi do prelaska jednosmjernog u dvosmjerni tok energije, što itekako utiče na tehničke karakteristike mreže. Taj uticaj se ogleda u lokalnoj fluktuaciji napona i frekvencije, u drugačijem opterećenju mrežnih elemenata, u promjeni podešavanja zaštita i uvođenju naprednih zaštitnih uređaja, u degradiranju kvaliteta električne energije, kao i u uvođenju naprednijeg načina upravljanja i automatizacije mreže. Osim distribuiranih generatora, današnja elektrodistributivna mreža uključuje odgovarajuće FACTS uređaje, punionice za električna vozila, baterije za skladištenje energije itd. Zbog svih tih novih elemenata distributivne mreže, postavlja se pitanje kolika je priključna sposobnost sistema sa aspekta distribuirane proizvodnje, sa aspekta punionica za električna vozila, odnosno kako novi subjekti utiču na pogonske karakteristike mreže.

## Sažetak

Razvoj tehnologije električnih vozila (EV) i namjera da se u budućnosti potpuno pređe sa vozila sa unutrašnjim sagorijevanjem na ekološki prihvatljiviji oblik transporta doprinosi smanjenju emisije CO<sub>2</sub>, buke, poboljšanju kvaliteta vazduha itd. Cilj je da se EV napajaju energijom koja je proizvedena iz obnovljivih izvora, čime se dodatno smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu.

Iako je ova tehnologija prisutna već više od decenije, i dalje postoje prepreke za intenzivniju upotrebu EV. Glavni izazovi odnose se na nedovoljno razvijenu tehnologiju baterija, mali broj stanica za punjenje i neadekvatan izbor lokacija punionica. Postojanje razvijene mreže punionica za EV jedan je od osnovnih preduslova za veću zastupljenost elektromobilnosti.

EV mogu raditi u vehicle-to-grid (V2G) režimu i na taj način pomagati sistemu da se odupre naglom povećanju potražnje i da savlada probleme opterećenja pri časovima vršne potrošnje, kada rade kao generatori električne energije. Punionice za EV u distributivnoj mreži generišu napone i struje viših učestanosti, zbog čega je potrebno obratiti pažnju na kvalitet električne energije. Osim toga, priključivanjem novih potrošača utiče se i na druga pogonska ograničenja mreže, pa je neophodno pažljivo planirati lokacije punionica. Neodgovarajući izbor može dovesti do narušavanja naponskih granica, povećanih gubitaka i preopterećenja elemenata mreže. Da bi se izbjegli ovi efekti, od interesa je odrediti maksimalni kapacitet mreže za priključenje punionica, poznat kao prihvatna sposobnost. Glavni problemi koji su predstavljeni u ovom radu odnose se na određivanje centralizovane i decentralizovane priključne sposobnosti, odnosno na određivanje priključne sposobnosti distributivne mreže za određenu usvojenu snagu sa ciljem minimalnih gubitaka.

**Ključne riječi:** punionice za EV, proračun harmonijskih tokova snaga, centralizovana priključna sposobnost, decentralizovana priključna sposobnost, V2G

# Abstract

The development of electric vehicles (EV) technology and the strategic intention to fully transition from internal combustion engine vehicles to more environmentally sustainable modes of transportation contribute to reductions in CO<sub>2</sub> emissions, noise levels, improvements in overall air quality etc. The long-term objective is for EV to be supplied with electricity generated from renewable energy sources, thereby further minimizing their environmental impact.

Although EV technology has been commercially available for more than a decade, several barriers continue to limit its large-scale adoption. The primary challenges include the insufficient maturity of battery technologies, the limited number of charging stations, and the suboptimal spatial distribution of the charging infrastructure. A well-developed and properly planned charging network represents one of the key prerequisites for achieving higher levels of electromobility penetration.

EV are capable of operating in a vehicle-to-grid (V2G) mode, thereby supporting the power system during periods of sudden demand increase and mitigating peak-load challenges by effectively acting as distributed energy generators. However, EV charging stations connected to distribution systems introduce high-frequency voltage and current components, necessitating strict attention to power quality issues. In addition, the integration of new EV loads influences multiple operational constraints of the distribution network, making careful planning of charger locations indispensable. Inappropriate siting may result in voltage limit violations, increased system losses, and thermal overloading of network components. To prevent such adverse effects, it is essential to determine the maximum capacity of the distribution network to accommodate EV charging stations, a parameter widely known as the hosting capacity. The main issues addressed in this study concern the determination of both centralized and decentralized hosting capacity, as well as the evaluation of the distribution network's ability to integrate a specified EV charging demand while maintaining minimal power losses.

**Keywords:** EV charging stations, harmonic power flow calculation, centralized hosting capacity, decentralized hosting capacity, V2G

# Sadržaj

Popis slika .....	9
Popis tabela .....	10
1. Uvod.....	1
2. Pregled i analiza istraživanja iz literature .....	3
2.1. Determinističke metode.....	4
2.2. Stohastičke metode.....	6
2.3. Pojednostavljena metoda.....	7
2.4. Nedovoljno istražena pitanja i analize u literaturi.....	8
3. Metodologije proračuna harmonijskih tokova snaga.....	9
3.1. Klasifikacija metoda za proračun harmonijskih tokova snaga.....	10
3.2. Spregnuti Newton-Raphsonov metod .....	11
3.3. Raspregnuti metod.....	18
3.3. Shirmohammadi metod .....	21
4. Procjena prihvatne sposobnosti elektrodistributivne mreže .....	23
4.1. Tehnička ograničenja .....	23
4.2. Podjela punjača za EV i izazovi za razvoj EV .....	26
4.3. Rad EV u V2G režimu .....	28
4.4. Harmonijska analiza.....	29
4.5. Harmonijska analiza punjača za EV.....	32
4.6. Centralizovana priključna sposobnost.....	34
4.7. Decentralizovana priključna sposobnost.....	35
5. Analiza rezultata proračuna centralizovane i decentralizovane priključne sposobnosti.....	38
5.1. Testna elektrodistributivna mreža .....	38
5.2. Rezultati raspregnutog metoda u Matlabu .....	40
5.3. Rezultati centralizovane priključne sposobnosti .....	42
5.4. Rezultati decentralizovane priključne sposobnosti .....	47

5.5. Minimalni aktivni gubici.....	50
6. Zaključak.....	54
Literatura.....	56

## Popis slika

<b>Slika 1.</b> Statistika korišćenih metoda u radovima vezanim za procjenu prihvatne sposobnosti ....	3
<b>Slika 2.</b> Dijagram toka algoritma spregnutog Newton-Raphsonovog metoda.....	16
<b>Slika 3.</b> Dijagram toka algoritma Raspregnutog metoda.....	21
<b>Slika 4.</b> Broj prodatih električnih vozila u svijetu za period od 2014-2022.....	26
<b>Slika 5.</b> Dnevni dijagram opterećenja prije i posle V2G režima.....	29
<b>Slika 6.</b> Limiti harmonika napona prema IEC 61000-2-4 .....	30
<b>Slika 7.</b> Vremenska promjena harmonika napona na sabirnicama 10 kV .....	31
<b>Slika 8.</b> Kumulativna vjerovatnoća THDU sa slike 10 .....	31
<b>Slika 9.</b> Podaci o harmonijskoj distorziji napona na sabirnicama industrije “Tigar”, Pirot.....	32
<b>Slika 10.</b> Procentualne vrijednosti struja viših učestanosti industrijskog potrošača .....	32
<b>Slika 11.</b> Spektar harmonijskih struja punjača .....	34
<b>Slika 12.</b> Dijagram toka algoritma za proračun centralizovane priključne sposobnosti .....	35
<b>Slika 13.</b> Dijagram toka algoritma za proračun decentralizovane priključne sposobnosti.....	37
<b>Slika 14.</b> Jednopolna šema testne elektrodistributivne mreže .....	39
<b>Slika 15.</b> Komparacija rezultata THD napona dobijenih raspregnutim metodom i u Neplanu....	41
<b>Slika 16.</b> Komparacija rezultata THD struje dobijenih raspregnutim metodom i u Neplanu .....	41
<b>Slika 17.</b> Rezultati distribucije viših harmonika dobijenih pomoću raspregnutog metoda.....	42
<b>Slika 18.</b> Toplotni graf centralizovane priključne sposobnosti kada EV vraću energiju mreži ...	43
<b>Slika 19.</b> Aktivni gubici mreže kada EV vraćaju energiju mreži .....	44
<b>Slika 20.</b> Toplotni graf centralizovane priključne sposobnosti u slučaju punjenja EV .....	44
<b>Slika 21.</b> Aktivni gubici mreže u slučaju punjenja EV .....	45
<b>Slika 22.</b> Priključna sposobnost po čvorovima za različita opterećenja konzuma .....	46
<b>Slika 23.</b> Decentralizovana priključna sposobnost određena primjenom Monte Carlo pristupa .	48
<b>Slika 24.</b> Decentralizovana priključna sposobnost određena komparacijom oba scenarija .....	49
<b>Slika 25.</b> Rezultati minimalnih gubitaka određenih novim stohastičkim pristupom.....	52

## Popis tabela

<b>Tabela 1.</b> Komparacija različitih metoda za procjenu priključne sposobnosti .....	4
<b>Tabela 2.</b> Pregled nepoznatih veličina na početku proračuna .....	12
<b>Tabela 3.</b> Pregled jednačina neophodnih za rješavanje problema harmonijskih tokova snaga ..	15
<b>Tabela 4.</b> Poređenje performansi spregnutog i raspregnutog metoda .....	20
<b>Tabela 5.</b> Granične vrijednosti individualnih harmonika napona .....	25
<b>Tabela 6.</b> Klasifikacija punjača za EV .....	27
<b>Tabela 7.</b> Karakteristike brzog DC punjača analiziranog u radu [46] .....	33
<b>Tabela 8.</b> Procentualne vrijednosti struja viših harmonika stambene zgrade .....	39
<b>Tabela 9.</b> Procentualne vrijednosti struja viših harmonika industrijskog potrošača.....	40
<b>Tabela 10.</b> Klasifikacija narušavanja ograničenja u zavisnosti od nivoa opterećenja konzuma.	46
<b>Tabela 11.</b> Klasifikacija narušavanja ograničenja za dva različita pristupa računanja .....	50
<b>Tabela 12.</b> Klasifikacija narušavanja ograničenja za različite usvojene snage punionica .....	52

# 1. Uvod

Namjera da se u budućnosti potpuno pređe sa vozila sa unutrašnjim sagorijevanjem na ekološki prihvatljiviji oblik transporta doprinosi smanjenju emisije CO<sub>2</sub>, buke, poboljšanju kvaliteta vazduha itd. Cilj je da se električna vozila (EV) napajaju energijom koja je proizvedena iz obnovljivih izvora, čime se dodatno smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu. Sa razvojem EV dolazi i do razvoja punionica za EV, koje predstavljaju nove komponente u distributivnoj mreži. Usljed toga, sistem je suočen sa novim izazovima poput dodatnog opterećenja, koje utiče i na vršno opterećenje. Ipak, očekivano je da u budućim elektrodistributivnim sistemima punionice rade u vehicle-to-grid (V2G) režimu. Prema [1] tokom vršnog opterećenja baterije EV, povezane putem punjača na mrežu, šalju energiju nazad u mrežu i na taj način pomažu sistem u časovima maksimalnog opterećenja. Pri ostalim časovima opterećenja, kada sistem može odgovoriti zahtjevima potrošača, punionice uzimaju energiju iz mreže za punjenje baterija EV. Na taj način, V2G režim ne samo da pomaže sistemu da savlada problem sa vršnim opterećenjem, već dovodi do ravnjanja dijagrama opterećenja, odnosno do smanjivanja razlike između maksimalnog i minimalnog opterećenja. Prema nivou snage i vremenu punjenja, punjači za EV se dijele na tri grupe i to na spore, srednje i brze punjače [2]. Spori i srednji punjači su ugrađeni u samo EV, dok su DC brzi punjači van vozila.

Kako je prisutnost EV, a samim tim i punionica za EV sve veća, nameće se potreba da se definiše uticaj ovih novih potrošača na elektrodistributivni sistem. Taj uticaj se ogleda sa aspekta injektiranja viših harmonika napona i struja u čvorovima mreže, sa aspekta odstupanja, varijacije i nesimetrije napona čvorova, u pogledu aktivnih gubitaka po granama mreže itd. U ovom master radu data je analiza dijela uticaja punionica za EV na elektrodistributivni sistem. Cilj je da se ovi uticaji determinišu i uporede sa dozvoljenim ograničenjima u odnosu na priključenu snagu punionica. Na osnovu proračuna harmonijskih tokova snage, cilj je odrediti i kapacitet elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za EV. Ta priključna sposobnost se odnosi kako za slučaj gdje se analizira svaki čvor mreže posebno, tako i za slučaj većeg broja čvorova. Poznavanje priključne sposobnosti u određenom čvoru ili za određenu kombinaciju čvorova, može operateru distributivne mreže pomoći da odluči koje mjesto u mreži je odgovarajuće za priključenje određene snage punionica za EV, a da tehničke karakteristike mreže budu zadovoljene. Koncept priključne sposobnosti je prvi put predložen od strane Math Bollena 2004. godine kao pristup za rješavanje različitih uticaja na distributivnu mrežu usljed povećane penetracije distribuiranih izvora električne energije. Najprihvaćenija definicija priključne sposobnosti glasi [4]: „Količina nove proizvodnje ili potrošnje koja se može priključiti na određenom feeder-u bez uticaja na rad sistema pod postojećom konfiguracijom kontrole i infrastrukture.“

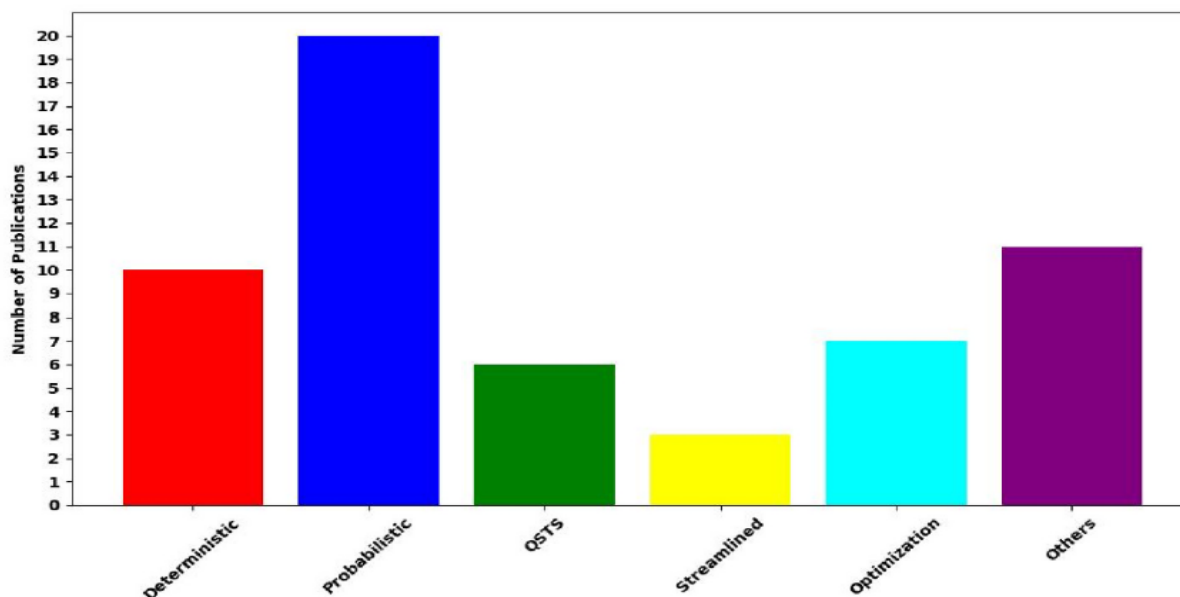
Ovaj rad se sastoji od šest poglavlja:

- U drugom poglavlju izvršena je obrada literature iz oblasti istraživanja sistematizacije postojećih metoda za određivanje priključne snage decentralizovanih izvora energije (DER), sa fokusom na punionice za električna vozila, u distributivnoj mreži.
- U trećem poglavlju predstavljen je proračun harmonijskih tokova snaga, opisane su odgovarajuće metode koje se bave ovim proračunom i predložena je metoda za proračun harmonijskih tokova snaga.
- U četvrtom poglavlju, na osnovu predloženog metoda za proračun harmonijskih tokova snaga, predložene su metode za određivanje priključne sposobnosti punionica za EV u pojedinačnim čvorovima i elektrodistributivnoj mreži u cjelini.
- U petom poglavlju su analizirani dobijeni rezultati, odnosno, čvor i kombinacije lokacija čvorova sa maksimalnom priključnom sposobnošću i ona kombinacija pri kojoj su aktivni gubici minimalni.
- U šestom poglavlju predstavljeni su glavni zaključci, nakon čega je dat pregled literature.

## 2. Pregled i analiza istraživanja iz literature

Na osnovu postojeće literature i industrijskih izvještaja, objavljenih u periodu od 2014. do 2023. godine, u radu [5] predstavljena je sveobuhvatna analiza metoda koje se bave problemom priključne sposobnosti u distributivnoj mreži. Razlikuju se dva osnovna pristupa pri procjeni priključne sposobnosti, i to simulacioni i optimizacioni pristup. Izbor strategije zavisi od dostupnosti podataka, ciljeva proračuna, primijenjenih alata itd. Simulacioni pristup fokusira se na dinamičku analizu priključnog kapaciteta koristeći ponašanje sistema, dok optimizacioni pristup pronalazi maksimalnu priključnu sposobnost za pretpostavljena ograničenja. Prvi pristup zahtijeva modelovanje sistema radi simulacije tokova snaga, a drugi pristup računa optimalne tokove snaga za definisane funkcije i ograničenja. Optimizacioni pristup je jednostavniji, efikasniji i pogodniji za mreže većih razmjera, dok simulacioni pristup zahtijeva detaljno modelovanje sistema i mnogo je računarski zahtjevniji pristup [6]. U ovome istraživanju, procjena priključne sposobnosti određena je primjenom optimizacionog pristupa. Prema [7], aktuelna istraživanja klasifikuju simulacione i optimizacione pristupe na determinističke, stohastičke i pojednostavljene metode, u zavisnosti od izabranih neizvjesnosti i scenarija.

Metode koje se najviše koriste za problematiku priključne sposobnosti su determinističke i stohastičke (probabilistic) metode, kao što prikazuje slika 1. Često se koriste i pojednostavljeni (streamlined) pristupi koji, za vrlo kratko vrijeme računanja, mogu procijeniti približnu priključnu sposobnost. Osnovne karakteristike pojedinih metoda predstavljene su u tabeli 1.



**Slika 1.** Statistika korišćenih metoda u radovima vezanim za procjenu prihvatne sposobnosti

**Tabela 1.** Komparacija različitih metoda za procjenu priključne sposobnosti

Metoda	Složenost	Potrebe za podacima	Scenario	Preciznost	Vrijeme računanja	Referenca
Deterministička	Jednostavna	Malo	Najgori slučaj	Približna	Malo	[5, 8]
Stohastička	Složena	Značajno	Više slučajeva	Zavisi od neizvjesnosti	Veliko	[4, 9]
Pojednostavljena	Složena	Umjereno	Nekoliko slučajeva	Zavisi od odabranog scenarija	Relativno malo	[10, 11]

## 2.1. Determinističke metode

Determinističke metode se fokusiraju na najgore scenarije sa unaprijed definisanim podacima, koje zanemaruju stohastičku prirodu DER-ova u koje spadaju i EV. Deterministički pristupi se često koriste za male sisteme, dok za velike sisteme, tačnost i proračunska složenost postaju izazov zbog topologije mreže, kao što je objašnjeno u radu [12]. Prema [13], deterministički pristup korišćen je za procjenu priključne sposobnosti punionica za EV, gdje su uzeta u obzir naponska ograničenja, preopterećenje transformatora i termička ograničenja.

Princip rada determinističkih metoda za procjenu priključne sposobnosti sastoji se iz dvije faze [14]. U prvoj fazi koristi se neki od proračuna tokova snaga, kao što su forward, backward ili forward-backward pristupi. U drugoj fazi priključna sposobnost računa se na način što se postepeno povećava kapacitet DER-ova dok se ne prekorače ograničenja. Ove metode se mogu klasifikovati u dvije podgrupe: metoda konstantne generacija (Constant generation method) i metoda vremenskih serija (Time series method).

Prva metoda pretpostavlja da su potrošnja i proizvodnja DER-ova konstantni i na maksimumu. Ova metoda ne odražava realnu promjenu i stohastičku prirodu izvora. Za proračun prihvatne sposobnosti (HC) koristi se scenario iterativnog povećanja dok se ne naruši neko od ograničenja. Ponekad se koristi scenario najgoreg slučaja za pronalaženje HC mreže, tako što se uzima da je proizvodnja DER jedinica maksimalna, dok je opterećenje minimalno [6]. To dovodi do povećanja napona u čvorovima mreže i do kršenja ograničenja vezanih za napon, a takođe može dovesti i do preopterećenja transformatora ili vodova. Veoma mali broj studija se oslanja isključivo na ovu metodu za proračun HC, jer je ona previše pojednostavljena i može dati samo približne rezultate. Ukoliko se koristi scenario najgoreg slučaja, često dolazi do potcjenjivanja rezultata HC, jer je mala vjerovatnoća da će se u istom trenutku poklopiti maksimalna proizvodnja i minimalna potrošnja.

U [15] je primjenom metode konstantne generacije određena HC za tri niskonaponske mreže Sjeverne Amerike. Snaga priključene DER jedinice u izabranom čvoru postepeno se povećava za po 1 kW dok se ne naruše tehnička ograničenja. Konstatovano je da HC ne zavisi od promjenjivosti opterećenja, ako je ograničavajući faktor odstupanje napona. Rad [16], u kome je korišćena ista metoda, pokazuje da HC testnog voda zavisi od toga da li se koristi  $\pi$ -model voda ili se paralelne kapacitivnosti voda zanemaruju. Rezultati pokazuju da je veća HC u prvom slučaju, što je i logično znajući da otočni kondenzatori injektiraju reaktivnu snagu u mrežu, čime smanjuju vrijednosti napona u čvorovima mreže. Autori u radu [17] analizirali su 216 vodova različitih performansi u pogledu njihove individualne HC, kao i njihove lokacione HC duž voda, ako se priključuju fotonaponski sistemi (PV). Zaključeno je da HC značajno zavisi od naponskog nivoa voda, a da termička opterećenost vodova takođe predstavlja jedan od glavnih ograničavajućih faktora. Rad [18] zaključuje da lokacija DER, a rad [19] da tehnologija distribuiranog generatora predstavljaju faktore koji dominantno utiči na HC.

Metoda vremenskih serija predstavlja unapređenje metode konstantnih generacija, jer uzima u obzir promjenu u profilima potrošnje i proizvodnje tokom vremena. Ova metoda je veoma zavisna od dostupnih podataka, što ima više podataka, to se detaljnije može analizirati dinamički uticaj DER-ova na HC. Sa druge strane, velika količina podataka utiče na vrijeme proračuna. Da bi se smanjila proračunska složenost, broj scenarija se često ograničava, što može uticati na tačnost rezultata. Većina radova, vezanih za ovu metodologiju, fokusirala se na proračun HC PV tehnologije u distributivnim mrežama.

Primjenom metode vremenskih serija, utvrđeno je da je maksimalni nivo penetracije PV sistema u gradskoj distributivnoj mreži između 82% i 150%, u industrijskoj mreži 31%, dok u mreži, koja napaja poslovne i komercijalne objekte, zavisi od raspoloživog krovnog prostora [20]. Kao ograničenja uzeti su prenaponi u čvorovima i preopterećenje opreme. U radu [21], osim prethodna dva ograničenja, razmatrani su pad napona i povratni tok snage, kao dodatna ograničenja pri integraciji vjetroturbina u srednjenaponskoj distributivnoj mreži, a pokazano je da HC opada sa povećanjem broja ograničenja. Rad [22] proučava uticaj integracije PV tehnologije, u niskonaponskoj mreži Šri Lanke, na amplitudu i neuravnoteženost napona, faktor snage na sekundaru transformatora, gubitke u mreži i na tok aktivne snage. Utvrđeno je da je odstupanje napona na kraju voda, glavni ograničavajući faktor, koji utiče na nivo HC distributivne mreže. U radu [23] razmatrana je HC PV sistema u gradskom području na Mauricijusu, a kao glavno ograničenje uzeta je harmonijska distorzija napona. Zaključeno je da penetracijom PV sistema do 40%, harmonici ostaju unutar dozvoljenih granica koje su postavljene prema IEEE 519 standardu.

Prednosti determinističkog pristupa su jednostavnost, brzina, mala računarska zahtjevnost. Pogodan je ako nije bitna velika preciznost rezultata, a može se koristiti i za početne faze planiranja. Primjenom ovog metoda, može se na jednostavan način odrediti priključna sposobnost svakog posebno analiziranog čvora elektrodistributivne mreže. Mana ovih metoda je što ne uzimaju u obzir neizvjesnost instalisane snage, lokacije i međusobnu interakciju za

priključenje više distribuiranih generatora. To onemogućava proračun ukupne HC DER-ova za neku distributivnu mrežu u cjelini.

## 2.2. Stohastičke metode

Integracija DER jedinica u distributivnu mrežu se sprovodi iako mnoge promjenjive nisu poznate [6]. Prema ovom radu, neke od promjenjivih koje nisu unaprijed poznate su broj, lokacija i veličina DER jedinica. Takođe, profili proizvodnje i potrošnje po čvorovima nisu poznati, a sve navedene promjenjive imaju jak uticaj na proračun HC.

Da bi se uzele u obzir ove neizvjesnosti koristi se probabilistički (stohastički) proračun tokova snaga. Ovakav pristup podrazumijeva da se izvodi veliki broj proračuna tokova snaga sa različitim vrijednostima promjenjivih, kako bi se dobili odgovarajući izlazni rezultati. Koraci ovog postupka su sljedeći:

- kreiranje slučajnih scenarija (broj, lokacija i/ili veličina DER-a),
- proračun tokova snaga,
- provjera mrežnih veličina u odnosu na granične vrijednosti,
- određivanje HC na osnovu definisanih kriterijuma [24].

Najčešća metoda koja se koristi za generisanje slučajnih scenarija je Monte Carlo simulacija. Ova simulacija može se koristiti za generisanje različitih promjenjivih, kao što je određivanje lokacija, tipa, veličine DER-a, priključne faze u trofaznim distributivnim mrežama, profila proizvodnje ili potrošnje, broja DER jedinica itd.

Stohastička metoda je prema slici 1. najčešće korišćena metoda za određivanje HC, a može se takođe koristiti za predviđanje i analizu osjetljivosti. U okviru ove metode, Monte Carlo je najčešća tehnika koja se koristi za određivanje promjenjivih. Preciznost rezultata ove metode zavisi od razmatranih neizvjesnosti, od broja scenarija koji se analiziraju, odnosno što je taj broj veći, rezultat je pouzdaniji. Vrijeme računanja ove metode takođe zavisi od broja scenarija koji se analiziraju, veći broj scenarija znači i veće vrijeme proračuna.

U radu [25] je primjenom stohastičkog pristupa analizirana HC distributivne mreže za priključenje PV sistema na nivou potrošača. Korišćena je Monte Carlo tehnika za nasumično određivanje lokacije i veličine PV jedinica, a posmatrana su ograničenja prenapona i povratnog toka snage. Slično, i u radu [26] se razmatra HC za priključenje PV tehnologije, ali je umjesto Monte Carlo tehnike korišćena Nataf transformacija za prostorne korelacije između PV jedinica i opterećenja, a umjesto povratnog toka snage usvojeno je termičko ograničenje voda. Nataf transformacija je matematički alat koji se koristi u okviru stohastičkih metoda, a služi da se simuliraju vremenske ili prostorne korelacije između dvije promjenjive, tako što se njihove

originalne raspodjele transformišu u normalni prostor, gdje se jednostavno modelira posmatrana korelacija. Ista ograničenja su posmatrana i u radu [27] gdje je posmatrana HC distributivne mreže za priključenje PV tehnologije i vjetroturbina, a HC je određena uz pomoć tehnike rijetke mreže za procjenu rizika. Ova tehnika značajno smanjuje broj simulacija potrebnih za pouzdanu procjenu, a zadržava visoku tačnost. Umjesto da se analiziraju sve kombinacije ulaznih varijabli, ova tehnika bira one najvažnije i na taj način smanjuje vrijeme proračuna. Rad [28] analizira HC distributivne mreže za priključenje punionica za EV u pojedinačnim čvorovima. U radu se koristi Monte Carlo tehnika, a jedino ograničenje koje je uzeto u obzir je odstupanje napona.

Prednost stohastičkih metoda je ta što uzimaju u obzir više neizvjesnosti, pa se može dobiti realnija slika o HC distributivne mreže. Ono što karakteriše ovu metodu u odnosu na determinističke metode, je što može da razmatra istovremeno priključenje većeg broja DER jedinica za nasumično izabrane lokacije, odnosno ovom metodom moguće je procijeniti decentralizovanu HC distributivne mreže. Mane stohastičkih metoda su velika proračunska složenost, visoko vrijeme proračuna, a sama tačnost rezultata zavisi od usvojenih neizvjesnosti.

### **2.3. Pojednostavljena metoda**

Pojednostavljena metoda je heuristička tehnika razvijena od strane Electric Power Research Institute (EPRI) za procjenu kapaciteta prihvatanja DER jedinica, a nastala je sprovođenjem detaljnih stohastičkih studija na velikom broju vodova i zapažanjem trendova koji su zajednički za integraciju PV sistema u te vodove [6]. Ova metoda razmatra manji broj scenarija i prioritizuje neizvjesnosti kako bi se dobila približna priključna sposobnost sa relativno kratkim vremenom računanja. Iako ova metoda daje brze procjene priključne sposobnosti, tačnost rezultata zavisi od izbora scenarija [5]. Ova metoda sprovodi niz analiza osjetljivosti i daje tri vrijednosti HC:

- realističnu
- optimističnu
- konzervativnu.

Ova metoda se može posmatrati kao poboljšanje stohastičke metode, gdje se umjesto generisanja velikog broja scenarija simulira mali broj scenarija kako bi se dobila procjena HC datog voda. Međutim, ovo poboljšanje odnosi se samo na vrijeme i resurse računanja, a što se tiče rezultata ova metoda ima tendenciju da izračuna netačnu vrijednost HC u slučajevima kada je stvarna HC visoka ili kada vod ima visok diverzitet grana [10]. Upotreba ove metode je ograničena na vrlo mali broj studija, zbog toga što algoritam nije javno dostupan, već je dostupan u vidu softvera "Distribution Resource Integration and Value Estimation (DRIVE)".

## 2.4. Nedovoljno istražena pitanja i analize u literaturi

Pregledom navedenih radova, kao i analizom velikog broja radova čije su osnovne karakteristike opisane u radovima [5] i [6], ustanovljena su sljedeća pitanja i analize gdje postoji potreba za dodatnim istraživanjem::

- Većina radova razmatra samo određena ograničenja, a za objektivnu analizu neophodno je uzeti u obzir istovremeno višestruka ograničenja. Ograničenje koje se najčešće analizira je odstupanje napona, a većina radova se bavi priključenjem PV tehnologije u mrežu. Mali broj radova razmatra priključenje punionica za EV u distributivnu mrežu sa aspekta harmonijske distorzije, a i radovi koji se bave ovom tematikom, uglavnom razmatraju samo to jedno ograničenje. S toga da bi se dobila realna i pouzdana procjena HC distributivne mreže za priključenje punionica za EV, u ovom radu uzeta su u obzir ograničenja odstupanja napona, varijacije napona, individualne harmonijske distorzije struje i totalne harmonijske distorzije napona, kao i termičko opterećenje vodova.
- Pregledani radovi u najvećem broju bave se HC distributivne mreže u pojedinačnim čvorovima, odnosno za određivanje centralizovane HC distributivne mreže. Radovi koji razmatraju HC distributivne mreže istovremeno za veći broj lokacija, odnosno za određivanje decentralizovane HC uglavnom razmatraju nekoliko nasumično odabranih kombinacija lokacija. Na osnovu toga, u ovom radu je pored određivanja centralizovane HC, određena i decentralizovana HC distributivne mreže za priključenje punionica za EV i to na način da je određena kombinacija lokacija čvorova pri kojoj je ta HC maksimalna. Takođe, za fiksnu snagu punionica za EV koje se priključuju u veći broj čvorova, određena je i najbolja kombinacija lokacija čvorova tako da gubici u mreži budu minimalni.

### 3. Metodologije proračuna harmonijskih tokova snaga

Proračuni tokova snaga predstavljaju osnovu analize elektroenergetskih sistema. Rezultati ovih proračuna omogućavaju dalje proračune, koji su važni za projektne proračune i širu analizu. Tradicionalni proračuni tokova snaga formulirani su na osnovu pretpostavke da su izvori energije generatori sistema, a potrošači opterećenja. Međutim, studije harmonijskog toka snage su opštije, jer uzimaju u obzir da i opterećenja mogu biti izvori harmonijske energije. Sa tim u vezi, metode za proračun harmonijskih tokova snaga razvijene su zbog činjenice da je periodično stacionarno stanje u savremenim sistemima često izobličeno prisustvom harmonika, koji nastaju usljed nelinearnih i vremenski promjenjivih komponenti [29]. Opterećenja, kod kojih su naponski i/ili strujni talasni oblici izobličeni, karakterišu se kao nelinearna, a neke od nelinearnih komponenti su: solarni inverteri, ispravljači, uninterruptible power supply (UPS) sistemi, računari i laptopovi, TV prijemnici, punjači za telefone, punjači za EV, LED i kompaktne fluorescentne sijalice, zavarivačke mašine itd. Prema nekim istraživanjima, u razvijenim zemljama zastupljenost energetskih pretvarača u potrošačkim uređajima iznosi više od 50 %. Energetski prekidači koriste tranzistore koji se brzo uključuju i isključuju, dakle ovi pretvarači rade na prekidačkom principu i usljed toga dolazi do izobličenja talasnih oblika napona i struja, odnosno do generisanja viših harmonika u mrežu.

Proračuni tokova snaga se obično sprovode za osnovnu učestanost, i u slučaju da u posmatranoj mreži nema nelinearnih opterećenja, prividna snaga se računa na uobičajen način:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

Međutim, zbog sve veće upotrebe energetskih pretvarača, odnosno sve veće prisutnosti potrošača koji generišu više harmonike napona i struja u mrežu, neophodno je sprovesti proračun harmonijskih tokova snaga. Uključivanje ovakvih potrošača u proračun često dovodi do složenosti i velikog vremena računanja [30]. U te potrošače, čije se povećano prisustvo u distributivnoj mreži očekuje u narednim godinama, spadaju i punionice za EV. Prisustvo nelinearnih opterećenja podrazumijeva razmatranje i distorzionu snage, koja se računa sljedećom formulom:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2)$$

Nelinearno opterećenje dovodi do nesinusnog ponašanja struje i napona, koji se primjenom Fourieove teoreme mogu predstaviti sljedećim relacijama:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \varphi_k^v) \quad (3)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \varphi_k^i) \quad (4)$$

gdje su  $V_k$  i  $I_k$  efektivne vrijednosti, a  $\varphi_k^v$  i  $\varphi_k^i$  fazni stavovi napona i struje  $k$ -tog harmonika. Veličine koje se najčešće koriste da bi se opisalo izobličenje talasnih oblika napona i struja su individualna  $HDX_k$  i totalna harmonijska distorzija  $THDX_k$ , koje se definišu na sljedeći način:

$$HDX_k[\%] = \frac{X_k}{X_1} 100 \quad (5)$$

$$THDX[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_k^2}}{X_1} 100 \quad (6)$$

### 3.1. Klasifikacija metoda za proračun harmonijskih tokova snaga

Prema [31], pristupi za analizu harmonijskih tokova snaga mogu se podijeliti na metode u frekventnom domenu i u vremenskom domenu.

Metode u vremenskom domenu podrazumijevaju numeričko rješavanje diferencijalnih jednačina koje opisuju ponašanje sistema. Ove metode na jednostavan način uključuju nelinearne uređaje u analizu, tako što se jednačine ovih uređaja dodaju diferencijalnim jednačinama koje opisuju prelazne procese u sistemu. Ove metode se zasnivaju na primjeni talasnih (wavelet) tehnika koje se često koriste pri analizi tranzijentnih procesa u elektroenergetskim sistemima [32]. Mana ovih metoda je visoka proračunska složenost i problem sa skalabilnošću, jer što je mreža sa većim brojem čvorova i što je prisutan veći broj nelinearnih potrošača, to je i veći broj diferencijalnih jednačina koji se razmatra. Prednost ovih metoda je visoka preciznost rezultata, ali zbog svojih nedostataka nisu našle široku primjenu u praksi.

Metode u frekventnom domenu definisane su metodama za proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti koje su proširene sa ciljem uključivanja nelinearnih opterećenja. Ove metode razmatraju stacionarno stanje sistema koje se može opisati nelinearnim algebarskim jednačinama. Rješavanje ovih jednačina omogućava određivanje fazora napona u čvorovima mreže za sve harmonike od interesa i promjenjive stanja nelinearnih uređaja. Potreba za poznavanjem strujno-naponskih karakteristika nelinearnih uređaja u frekventnom domenu predstavlja najveću manu ovih metoda, koje često nije jednostavno odrediti u slučaju prekidačkih uređaja sa kompleksnom upravljačkom logikom.

Takođe, postoje i hibridne metode, koje predstavljaju kombinaciju navedenih metoda, kako bi iskoristile prednosti oba pristupa. Ove metode podrazumijevaju iterativnu primjenu metoda u vremenskom i metoda u frekventnom domenu [29]. Zbog visoke proračunske složenosti, hibridne metode nisu našle široku primjenu u praksi, iako ove metode daju precizniji

rezultat u odnosu na metode u frekventnom domenu. Za definisanje harmonijskog problema najčešće su korišćene metode u frekventnom domenu. U nastavku biće predstavljene dvije metode u frekventnom domenu, i to Spregnuti Newton-Raphsonov i Raspregnuti metod za proračun harmonijskih tokova snaga, a za potrebe ovoga rada biće korišćena druga po redu opisana metoda.

### 3.2. Spregnuti Newton-Raphsonov metod

Kao što je već rečeno, nelinearni potrošači generišu harmoničke signale koji se šire kroz sistem, a usljed njihovog sve većeg prisustva u mreži javlja se potreba da se uticaji tih harmonika uzmu u obzir. Xia i Heydt, autori radova [33] i [34], su prvi uveli harmonijski proračun tokova snaga. Newton-Raphsonova metoda, koja se koristi za proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti, je reformulisana kako bi se uključio i uticaj ovih nelinearnih opterećenja. Tom reformulacijom je nastao Spregnuti Newton-Raphsonov metod za proračun harmonijskih tokova snaga, koji predstavlja jedan od najstarijih metoda koji se bave problemima harmonijskih izobličenja u sistemu. Dakle, navedeni metod za proračun harmonijskih tokova snaga na osnovnoj učestanosti je proširen uključivanjem jednačina nelinearnih uređaja i jednačina injektiranja harmonijskih struja u čvorovima mreže [33].

Reformulacija proračuna tokova snaga podrazumijeva dvije pretpostavke, i to da su tip nelinearnosti i prividna snaga opterećenja u čvorovima nelinearnih potrošača poznati. Poznavanje tipa nelinearnosti predstavlja poznavanje strujno-naponske karakteristike nelinearnog uređaja, kako bi se definisali međusobni odnosi između harmonika. Strujno-naponske karakteristike nelinearnih potrošača se obično definišu u funkciji pojedinačnih komponenti napona i promjenjivih stanja  $\alpha$  i  $\beta$ . Struktura čvorova za proizvoljnu elektrodistributivnu mrežu od  $n$  čvorova se definiše na sljedeći način [33]:

- prvi čvor je balansni čvor,
- od drugog do  $m-1$  čvora su linearni potrošački čvorovi,
- čvorovi indeksa  $m$  do  $n$  su nelinearni potrošački čvorovi,

gdje je  $m < n$ . Kao i za proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti, za balansni čvor se unaprijed definiše moduo i fazni stav napona, a za čvorove u kojima su priključeni linearni potrošači unaprijed su poznate aktivne i reaktivne snage osnovnog harmonika. Kao što je već naglašeno, za čvorove u kojima su priključeni nelinearni potrošači unaprijed su poznati prividna snaga i tip nelinearnosti, a poznata je i vrijednost aktivne snage. Izbor početnih vrijednosti za potrebe proračuna harmonijskih tokova snaga, nešto je složeniji nego za proračune na osnovnoj učestanosti. Razlog leži u tome što je početne vrijednosti amplituda i faznih stavova viših

harmonika mnogo teže procijeniti nego za harmonike prvog reda. Smjernice koje se odnose na izbor početnih vrijednosti su [34]:

- Vrijednosti osnovnog napona i faznih uglova se postavljaju kao i za potrebe proračuna na osnovnoj učestanosti, odnosno  $V^{(1)} = 1,0 pu$ ,  $\varphi^{(1)} = 0^\circ$ ,
- Amplitude napona viših harmonika na sabirnicama u kojima su priključena nelinearna opterećenja postavljaju se na oko  $0,01 pu$ , a u slučaju balansnog čvora, sabirnica u kojima su priključeni linearni potrošači ili za generatorske čvorove, amplituda napona viših harmonika se stavlja na vrlo nisku, ali nenultu vrijednost,
- Fazni uglovi napona viših harmonika se postavljaju na nulu,
- Neophodno je odrediti tip nelinearnosti za sva nelinearna opterećenja, odnosno parametre  $\alpha$  i  $\beta$  koji definišu strujno-naponske karakteristike nelinearnih uređaja.

Krajnji cilj proračuna harmonijskih tokova snaga je određivanje vektora stanja  $U$  koji se definiše sljedećom relacijom [35]:

$$U = (V^{(1)}, V^{(2)}, \dots, V^{(K)}, \gamma)^T \quad (7)$$

gdje su  $V^{(1)} = (V_2^{(1)}, \varphi_2^{(1)}, \dots, V_n^{(1)}, \varphi_n^{(1)})$  i  $V^{(k)} = (V_1^{(k)}, \varphi_1^{(k)}, \dots, V_n^{(k)}, \varphi_n^{(k)})$  vektori modula i faznih stavova napona osnovnog i  $k$ -tog harmonika u čvorovima posmatrane mreže, a  $\gamma = (\alpha_m, \beta_m, \dots, \alpha_n, \beta_n)$  predstavlja vektor parametara nelinearnih elemenata mreže. Neka je  $k = 1, 3, 5, 7 \dots$ , odnosno  $K$  je ukupan broj posmatranih harmonika, a pregled svih promjenjivih je predstavljen u tabeli 2.

**Tabela 2.** Pregled nepoznatih veličina na početku proračuna

Moduli i fazni stavovi napona osnovne učestanosti u svim čvorovima osim balansnog čvora	$2(n - 1)$
Moduli i fazni stavovi napona za sve više harmonike u svim čvorovima	$2n(K - 1)$
Parametri nelinearnih opterećenja	$2(n - m + 1)$
<b>Ukupan broj nepoznatih veličina</b>	<b><math>2n(K + 1) - 2m</math></b>

Za proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti primjenom Newton-Raphsonovog metoda, potrebno je formirati i riješiti sistem nelinearnih jednačina injektiranja aktivne i reaktivne snage osnovne učestanosti, koje se mogu formirati za sve čvorove osim balansnog:

$$P_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{(1)} V_i^{(1)} V_j^{(1)} \cos(\varphi_i^{(1)} - \varphi_j^{(1)} - \theta_{ij}^{(1)}) \quad (8)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{(1)} V_i^{(1)} V_j^{(1)} \sin(\varphi_i^{(1)} - \varphi_j^{(1)} - \theta_{ij}^{(1)}) \quad (9)$$

gdje  $V_i^{(1)}$  i  $V_j^{(1)}$  predstavljaju module, a  $\varphi_i^{(1)}$  i  $\varphi_j^{(1)}$  fazne stavove osnovne učestanosti u čvorovima  $i$  i  $j$ .  $Y_{ij}^{(k)}$  i  $\theta_{ij}^{(k)}$  predstavljaju moduo i fazni stav elementa na poziciji  $(i, j)$  matrice admitansi nezavisnih čvorova. Međutim, za harmonijsku analizu neophodno je ovaj sistem proširiti, jer je injektiranje aktivne i reaktivne snage unaprijed poznato samo za linearne potrošačke čvorove, pa bi bilo nemoguće sa samo  $2(m-2)$  jednačina riješiti harmonijski problem. Prva grupa jednačina koja se dodatno razmatra su jednačine koje će omogućiti da se definiše injektiranje struje osnovne učestanosti, i to odvojeno realne i imaginarnе komponente, u nelinearnim čvorovima, koristeći strujno-naponske karakteristika potrošača priključenih u ovim čvorovima [35]:

$$I_{r,i}^{(1)} = -q_{r,i}^{(1)}(V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, \dots, V_i^{(K)}, \alpha_i, \beta_i) \quad (10)$$

$$I_{i,i}^{(1)} = -q_{i,i}^{(1)}(V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, \dots, V_i^{(K)}, \alpha_i, \beta_i) \quad (11)$$

gdje  $q_{r,i}^{(1)}$  i  $q_{i,i}^{(1)}$  predstavljaju strujno-naponske karakteristike nelinearnih uređaja za osnovnu učestanost, pri čemu se  $q_{r,i}^{(1)}$  odnosi na realno,  $q_{i,i}^{(1)}$  imaginarno injektiranje. Ove struje se računaju u odnosu na napon balansnog čvora, a znak  $-$  u relacijama ukazuje na usvojenu aktivnu konvenciju. Osim za osnovnu učestanost, sličnim relacijama se može dalje proširiti sistem i odrediti injektiranje struje viših harmonika u svim nelinearnim potrošačkim čvorovima, jer je ovakvo injektiranje u ostalim čvorovima jednako nuli:

$$I_{r,i}^{(k)} = -q_{r,i}^{(k)}(V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, \dots, V_i^{(K)}, \alpha_i, \beta_i) \quad (12)$$

$$I_{i,i}^{(k)} = -q_{i,i}^{(k)}(V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, \dots, V_i^{(K)}, \alpha_i, \beta_i) \quad (13)$$

za  $i = m, \dots, n$ . Zavisnost struja injektiranja  $k$ -tog harmonika od pojedinačnih harmonika napona ukazuju zašto se ovaj metod naziva spregnutim. Ove struje injektiranja, za bilo koju učestanost, je moguće izraziti koristeći i metod napona nezavisnih čvorova:

$$I_{r,i}^{(k)} = \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{(k)} V_j^{(k)} \cos(\varphi_j^{(k)} - \theta_{ij}^{(k)}) \quad (14)$$

$$I_{i,i}^{(k)} = \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{(k)} V_j^{(k)} \sin(\varphi_j^{(k)} - \theta_{ij}^{(k)}) \quad (15)$$

gdje  $V_j^{(k)}$  predstavlja moduo, a  $\varphi_j^{(k)}$  fazni stav napona u čvoru  $j$  za  $k$ -ti harmonik, a  $Y_{ij}^{(k)}$  i  $\theta_{ij}^{(k)}$  predstavljaju moduo i fazni stav elementa na poziciji  $(i, j)$  matrice admitansi nezavisnih čvorova, koja je prilagođena posmatranoj učestanosti. Ova matrica za više učestanosti se računa na sličan način kao za osnovnu učestanost, uz prilagođavanje admitansi mrežnih elemenata posmatranom harmoniku. Za harmonike većeg reda, vodovi se predstavljaju  $\pi$  zamjenskom šemom, čija se redna impedansa i otočna admitansa, za posmatrani harmonik, računaju na sljedeći način:

$$Z_{\pi}^{(k)} = \sqrt{k}R_{\pi} + jkX_{\pi} \quad (16)$$

$$Y_{\pi}^{(k)} = jkB_{\pi} \quad (17)$$

gdje su  $R_{\pi}$ ,  $X_{\pi}$  i  $B_{\pi}$  otpornost, reaktansa i susceptansa voda na osnovnoj učestanosti. U posljednjim relacijama je uzet u obzir skin efekat, a zanemarena je odvodnost vodova. Matrica admitansi čvorova viših učestanosti uključuje i admitanse linearnih potrošača, koje se određuju sljedećom formulom:

$$Y_{Li}^{(k)} = \frac{P_i^{(1)}}{V_i^{(1)2}} - j \frac{Q_i^{(1)}}{kV_i^{(1)2}} \quad (18)$$

gdje  $P_i^{(1)}$  i  $Q_i^{(1)}$  predstavljaju aktivnu i reaktivnu snagu osnovne učestanosti u čvoru  $i$ , a  $V_i^{(1)}$  predstavlja moduo napona čvora  $i$  osnovne učestanosti. Posljednja grupa jednačina, kojom je neophodno proširiti osnovni sistem jednačina, predstavljaju ukupna injektiranja aktivne i reaktivne snage u nelinearnim potrošačkim čvorovima:

$$P_i = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{(k)} V_i^{(k)} V_j^{(k)} \cos(\varphi_i^{(k)} - \varphi_j^{(k)} - \theta_{ij}^{(k)}) \quad (19)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{(k)} V_i^{(k)} V_j^{(k)} \sin(\varphi_i^{(k)} - \varphi_j^{(k)} - \theta_{ij}^{(k)}) \quad (20)$$

U tabeli 3 je prikazan pregled nelinearnih jednačina neophodnih za sprovođenje proračuna harmonijskih tokova snaga, gdje ukupan broj jednačina odgovara broju nepoznatih

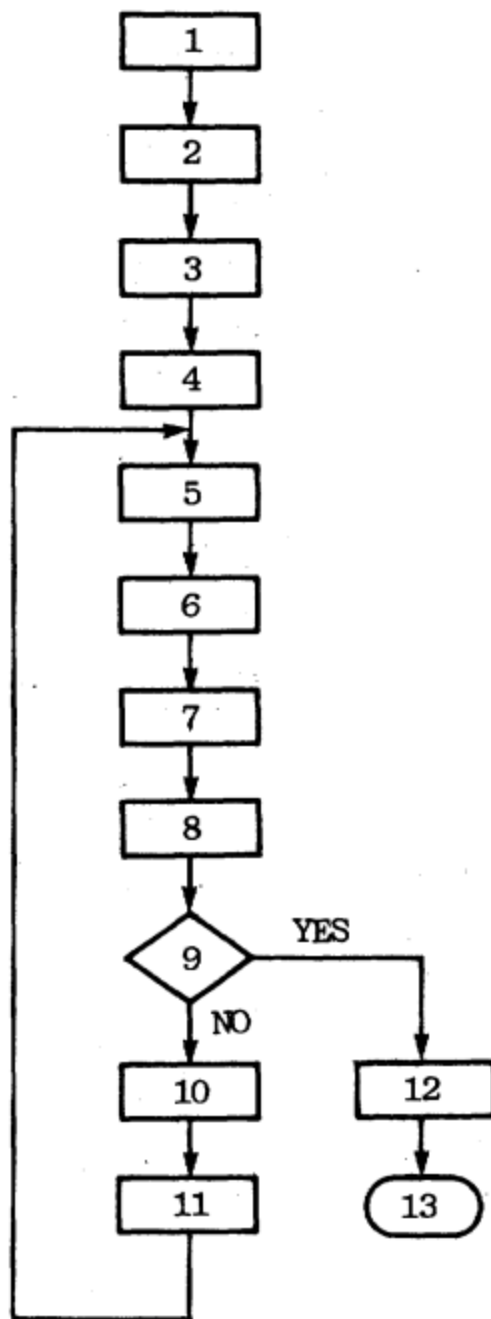
veličina. Ovaj sistem nelinearnih jednačina se razvojem u Tejlloreve red prevodi na sistem linearnih jednačina, koji povezuje promjene injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima mreže  $\Delta W$  i odstupanja injektiranja struje pojedinačnih harmonika  $\Delta I^{(k)}$  sa promjenama modula i faznih stavova napona pojedinačnih čvorova  $\Delta V^{(k)}$  i sa vektorom promjena parametara nelinearnih elemenata mreže  $\Delta \gamma$  [35]:

$$\begin{pmatrix} \Delta W \\ \Delta I^{(1)} \\ \Delta I^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta I^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J^{(1)} & J^{(2)} & J^{(3)} & \dots & J^{(K)} & 0 \\ YG^{(1,1)} & YG^{(1,2)} & YG^{(1,3)} & \dots & YG^{(1,K)} & H^{(1)} \\ YG^{(2,1)} & YG^{(2,2)} & YG^{(2,3)} & \dots & YG^{(2,K)} & H^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ YG^{(K,1)} & YG^{(K,2)} & YG^{(K,3)} & \dots & YG^{(K,K)} & H^{(K)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V^{(1)} \\ \Delta V^{(2)} \\ \vdots \\ \Delta V^{(K)} \\ \Delta \gamma \end{pmatrix} \quad (21)$$

gdje je  $J^{(k)}$  blok matrica Jakobijana koja kvantifikuje osjetljivost promjene injektiranja aktivne i reaktivne snage u čvorovima sistema na promjene modula i faznih stavova napona  $k$ -tog harmonika,  $YG^{(k,j)}$  blok matrica Jakobijana koja definiše osjetljivost promjene injektiranja realne i imaginarnu komponente struje  $k$ -tog harmonika u čvorovima sistema na promjenu modula i faznih stavova napona  $j$ -tog harmonika, a  $H^{(k)}$  je matrica koja predstavlja parcijalne izvode realnih i imaginarnih struja nelinearnih opterećenja u odnosu na parametre  $\alpha$  i  $\beta$ . U tabeli 3 predstavljene su sve neophodne jednačine za rješavanje problema harmonijskih tokova snaga. Na slici 2 predstavljeni su koraci algoritma za sprovođenje Newton-Raphsonovog metoda [34].

**Tabela 3.** Pregled jednačina neophodnih za rješavanje problema harmonijskih tokova snaga

Jednačine injektiranja aktivne i reaktivne snage u linearnim potrošačkim čvorovima	$2(m - 2)$
Jednačine injektiranja struja osnovne učestanosti u nelinearnim potrošačkim čvorovima	$2(n - m + 1)$
Jednačine injektiranja struja viših harmonika u svim čvorovima sistema	$2n(K - 1)$
Jednačine injektiranja ukupne aktivne i reaktivne snage u nelinearnim potrošačkim čvorovima	$2(n - m + 1)$
<b>Ukupan broj jednačina</b>	<b><math>2n(K + 1) - 2m</math></b>



**Slika 2.** Dijagram toka algoritma spregnutog Newton-Raphsonovog metoda

Objašnjenja koraka navedenog algoritma su [34]:

1. Učitati informacije i podatke o posmatranoj mreži,
2. Formirati admitansnu matricu,

3. Postaviti početne vrijednosti,
4. *Iteracija* = 1,
5. Formirati  $\Delta W$  i  $J^{(k)}$ , za  $k = 1, 3, 5, 7 \dots$ ,
6. Definirati svako pojedinačno nelinearno opterećenje, izračunati  $q_{r,i}^{(k)}$ ,  $q_{i,i}^{(k)}$  i  $D_i$ , gdje  $D_i$  predstavlja distorzionu snagu nelinearnih potrošačkih čvorova. Takođe, izračunati i  $G^{(k,j)}$  i  $H^{(k)}$ , gdje je  $G^{(k,j)}$  blok matrica Jakobijana koja predstavlja osjetljivost promjene injektiranja realne i imaginarnе komponente struje  $k$ -tog harmonika u čvorovima sistema na promjenu modula i faznih stavova napona  $j$ -tog harmonika, za  $k = 1, 3, 5, 7 \dots$  i  $i = m, \dots, n$ ,
7. Formirati  $\Delta I^{(k)}$  i  $YG^{(k,j)}$ , za  $k, j = 1, 3, 5, 7 \dots$ ,
8. Riješiti sistem simultanih jednačina i ažurirati napone čvorova za svaku učestanost, kao i parametre  $\alpha$  i  $\beta$  koji definišu strujno-naponske karakteristike.
9. Provjeriti da li je postignuta konvergencija, i ako jeste, idi direktno na korak 12, a ako nije idi na sljedeći korak.
10. Ažurirati reaktivnu snagu  $Q_i$  za sve potrošačke čvorove,  $i = m, \dots, n$ ,
11. *Iteracija* = *Iteracija* + 1, a nakon ovog koraka vrati se opet na 5 korak,
12. Ispisati dobijene rezultate,
13. Kraj.

Pri primjeni navedenog metoda za proračun harmonijskih tokova snaga, tri faktora utiču negativno na brzinu konvergencije [34]:

- Procijenjene vrijednosti amplituda i faznih uglova napona viših harmonika su često daleko od stvarnih vrijednosti. Posebno je složeno procijeniti fazne stavove, jer vrijednosti ovih uglova mogu varirati u čitavom opsegu od 0 do  $2\pi$ ,
- Usvojene aproksimacije pri formiranju matrice  $G^{(k,j)}$  mogu dovesti do sporije konvergencije,
- Zadate prividne snage na potrošačkim čvorovima, zahtijevaju primjenu linearno-iterativno podešavanje između reaktivne i prividne snage, što takođe može dovesti do sporijeg približavanja rješenju.

Nedostaci spregnutog Newton-Raphsonovog metoda za proračun harmonijskih tokova snaga su sljedeći [35]:

- Primjena ovoga metoda podrazumijeva definisanje i inverziju matrice Jakobijana u svakoj iteraciji. Za velike sisteme ova metoda može zahtijevati računare sa velikom memorijom i snagom. Dakle, što je broj čvorova, broj nelinearnih uređaja, kao i broj posmatranih harmonika veći, zahtjevi za jačim računarskim resursima rastu.
- Konvergencija ovoga metoda zavisi od usvojenih početnih vrijednosti, odnosno ukoliko se početno rješenje nalazi u određenoj okolini stvarnog rješenja. Najveći izazov predstavlja definisanje početnih vrijednosti fazora napona viših harmonika, pa je u pojedinim slučajevima ovaj metod podložan divergenciji.
- Ovaj metod zahtijeva detaljno poznavanje strujno-naponskih karakteristika nelinearnih uređaja. Eksplicitno određivanje ovih karakteristika uglavnom nije moguće, pa se one najčešće određuju analizom mjerenih podataka, ostvarenih u određenom vremenskom periodu.

Uključivanje nelinearnih potrošača u proračun dovodi do složenih matematičkih modela i potrebe za velikom računarskom snagom. Iz svega navedenog, spregnuti metod je praktično neprimjenjiv za moderne elektrodistributivne mreže. Veliki broj radova se bavi razvijanjem približnih metoda za rješavanje harmonijskih tokova snaga, koje bi nadomjestile navedene nedostatke. U sljedećem podpoglavlju predstavljen je jedan takav metod, koji će biti korišćen za dobijanje rezultata u ovom radu.

### 3.3. Raspregnuti metod

U prethodnom podpoglavlju navedeni su ključni nedostaci za praktičnu primjenu spregnutog Newton-Raphsonovog metoda. Iz toga razloga, razvijene su približne metode koje se bave rješavanjem harmonijskih problema, a jedan od najčešće korišćenih je raspregnuti metod za proračun harmonijskih tokova snaga. Osnovna razlika raspregnutog u odnosu na spregnuti metod je ta što se kod približnog metoda zanemaruju međusobne veze između harmonika. To omogućava poseban proračun za svaki red harmonika, pa se na taj način složenost i računarska opterećenost značajno smanjuju, a to je i cilj približnog metoda. Naravno, primjena svakog približnog metoda utiče na tačnost rezultata, pa tako i zanemarivanje veze između viših harmonika utiče na krajnji rezultat. Iako nije 100% precizan, i takav rezultat dovoljno je pouzdan da se donesu odgovarajući zaključci neophodni za dalju analizu sistema. Prednost raspregnutog metoda je i ta što se nelinearni potrošači mogu jednostavno modelovati kao izvori harmonijskih struja ili napona, a to se postiže primjenom mjerenih nesinusoidalnih talasnih oblika [36, 37].

Početne pretpostavke raspregnutog metoda se ne poklapaju u potpunosti sa spregnutim metodom. Pretpostavke za balansni i generatorske čvorove ostaju iste, dok postoji razlika kod potrošačkih čvorova, kod kojih se sada i za linearne i za nelinearne potrošačke čvorove

pretpostavljaju početne vrijednosti aktivne i reaktivne snage osnovnog harmonika. To omogućava da se izvrši proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti primjenom neke od ustaljenih metoda. Takođe, za nelinearne uređaje se na početku definiše i odgovarajući harmonijski spektar koji ih opisuje  $C_i$ , a koji omogućava proračun struja viših učestanosti nelinearnih potrošača. Harmonijski spektar je za većinu potrošača unaprijed poznat, a u slučaju potrebe moguće ga je i proračunati Furijeovom analizom mjerenih talasnih oblika posmatranog potrošača [35, 37].

U cilju rješavanja harmonijskog proračuna, posmatrani sistem se analizira kao linearni pasivni višekrajnik, za koji se naponi u čvorovima, bilo koje učestanosti od interesa, mogu odrediti primjenom metoda napona nezavisnih čvorova [38]:

$$I_B^{(k)} = Y_B^{(k)} V_B^{(k)} \quad (22)$$

gdje  $I_B^{(k)}$  i  $V_B^{(k)}$  predstavljaju vektore injektiranja struje i napona nezavisnih čvorova k-tog harmonika, a  $Y_B^{(k)}$  predstavlja matricu admitansi nezavisnih čvorova prilagođenu k-tom harmoniku. Ažuriranje matrice admitansi se vrši na isti način kao i u slučaju spregnutog Newton-Raphsonovog metoda. Injektiranje struje k-te učestanosti u čvoru  $i$  računa se na sljedeći način:

$$I_i^{(k)} = -C_i^{(h)} \left( \frac{P_i^{(1)} + jQ_i^{(1)}}{V_i^{(1)}} \right)^* \quad (23)$$

gdje  $P_i^{(1)}$  i  $Q_i^{(1)}$  predstavljaju aktivnu i rektivnu snagu, a  $V_i^{(1)}$  napon u čvoru  $i$  osnovne učestanosti. Vrijednosti napona osnovne učestanosti, u svim čvorovima, određeni su primjenom neke od konvencionalnih metoda za proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti.

Proračunom vektora injektiranja struja i matrice admitansi, napravljeni su preduslovi za rješavanje matrice jednačine (22) i određivanje vektora napona za k-tu učestanost u svim čvorovima  $V_B^{(k)}$ . Kada se sprovedu proračuni za sve harmonike od interesa, efektivna vrijednost napona u čvoru  $i$  računa se sljedećom relacijom [37]:

$$V_{i,rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (V_i^{(k)})^2} \quad (24)$$

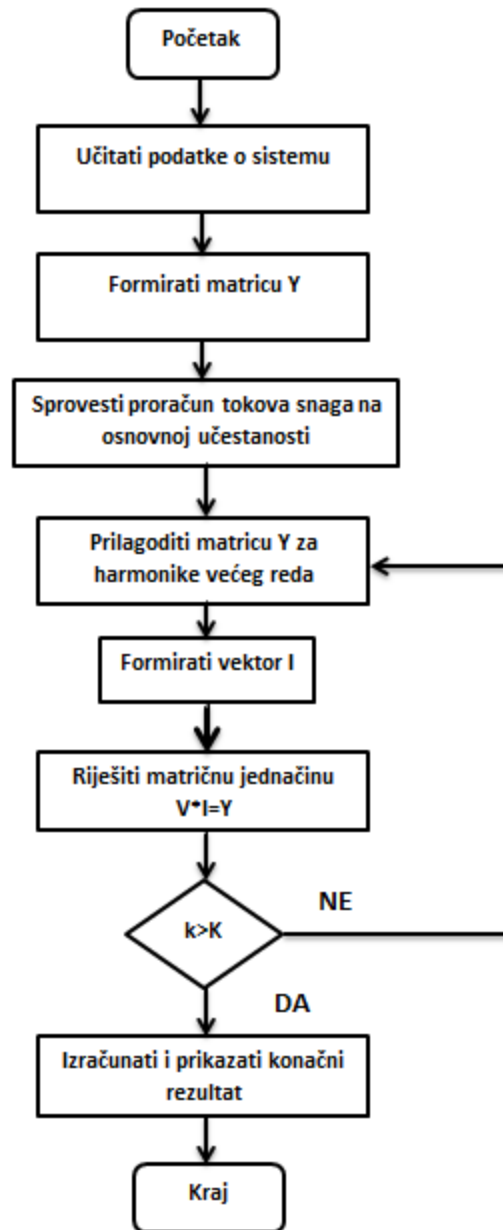
Svi koraci neophodni za sprovođenje harmonijskog proračuna tokova snaga primjenom predstavljenog metoda su prikazani na slici 3. Dakle, ovaj metod omogućava iterativno rješavanje harmonijskog problema, što značajno smanjuje računarsko opterećenje i matematičko modelovanje u odnosu na spregnuti metod. Dobijeni rezultati na kraju proračuna, primjenom relacija (5) i (6), omogućavaju dalji proračun karakterističnih pokazatelja harmonijskog izobličenja. Mana ovakvog metoda je potreba za inverzijom matrice admitansi pri svakoj novoj

iteraciji. Što je broj čvorova posmatrane mreže veći, to je veća i potreba za memorijom i opterećenjem računara. U sljedećoj tabeli 4. predstavljeno je poređenje spregnutog i približnog metoda za proračun harmonijskih tokova snaga.

**Tabela 4.** Poređenje performansi spregnutog i raspregnutog metoda

Metoda	Složenost	Potreba za memorijom	Preciznost rezultata	Vrijeme računanja
Spregnuta	Složena	Velika	Velika	Veliko
Raspregnuta	Jednostavna	Srednja	Približna	Malo

Raspregnuti metod pravi kompromis između složenosti proračuna i potrebe za memorijom sa jedne strane, i preciznosti rezultata sa druge strane. I pored toga što se zanemaruju međusobne veze između viših harmonika, ovaj metod daje rezultat koji je približan rezultatu dobijenom od strane spregnutog metoda, odnosno rezultat koji je mjerodavan za dalje proračune i analize. Iz toga razloga, proračuni harmonijskih tokova snaga, za potrebe ovog istraživanja, biće sprovedeni primjenom Raspregnutog metoda, a na slici 3 predstavljeni su koraci za sprovođenje ovog metoda.



Slika 3. Dijagram toka algoritma Raspregnutog metoda

### 3.3. Shirmohammadi metod

Jedan od početnih koraka raspregnutog metoda, nakon učitavanja podataka i formiranja matrice admitansi nezavisnih čvorova  $Y^{(1)}$ , je proračun tokova snaga za osnovnu učestanost. Kako će se u ovom radu posmatrati radijalna mreža, najpogodniji metod, koji se i najčešće primjenjuje za radijalne i slaboupetljane mreže, jeste kompenzacioni (Shirmohammadijev) metod, koji je 1988. godine razvio Shirmohammadi. Ovaj metod karakteriše jednostavnost,

pouzdanost i velika brzina konvergencije, čak i za mreže velikih dimenzija. U slučaju proračuna vezanog za slaboupetljane mreže, matematički model se dodatno usložnjava, jer je neophodna konverzija slaboupetljane u radijalnu mrežu [39].

Ovaj metod zasniva se na direktnoj primjeni Prvog i Drugog Kirhofovog zakona, odnosno za razliku od tradicionalnih proračuna tokova snaga koji se zasnivaju na čvorovima, konvencionalni metod je zasnovan na granama. Numeracija grana vrši se od napojnog čvora, a na startu vrši se i pretpostavka početnih vrijednosti napona, za sve čvorova osim napojnog, čija je vrijednost unaprijed poznata. Naredni korak predstavlja proračun struja injektiranja u čvorovima mreže na osnovu početnih pretpostavki, odnosno na osnovu vrijednosti dobijenih u prethodnoj iteraciji, pa se za  $h$ -tu iteraciju, struje injektiranja računaju na sljedeći način [38]:

$$I_i^{(h)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(h-1)}}\right)^* - Y_i V_i^{(h-1)} \quad (25)$$

gdje je  $S_i$  zadata kompleksna snaga injektiranja u čvoru  $i$ ,  $V_i^{(h-1)}$  fazor napona u čvoru  $i$  iz prethodne iteracije, a  $Y_i$  suma svih otočnih admitansi u čvoru  $i$ . U trećem koraku, polazeći sada od krajnjih čvorova ka napojnom, vrši proračun struja po granama mreže, pa je struja grane  $L$  u  $h$ -toj iteraciji data relacijom (26):

$$J_L^{(h)} = -I_{L2}^{(h)} + \sum_{j \in \alpha} J_j^{(h)} \quad (26)$$

gdje je  $I_{L2}^{(h)}$  struja injektiranja u prijemnom čvoru grane  $L$ , a  $\alpha$  skup grana incidentnih sa čvorom  $L2$ , koje se nalaze nizvodno od posmatrane grane. Ovakav način proračuna struja grana naziva se backward sweep. U narednom koraku vrši se računanje napona čvorova, polazeći sada od napojnog čvora ka krajevima mreže, a ovaj proračun napona naziva se forward sweep. Napon na prijemnom čvoru grane  $L$  određuje se sljedećom formulom:

$$V_{L2}^{(h)} = V_{L1}^{(h)} - Z_L J_L^{(h)} \quad (27)$$

gdje je  $Z_L$  impedansa grane  $L$ . Ovi koraci se sprovode dok se ne zadovolji uslov konvergencije  $\varepsilon$ .

## 4. Procjena prihvatne sposobnosti elektrodistributivne mreže

Kao što je već naglašeno u prvom poglavlju, priključna sposobnost elektrodistributivne mreže predstavlja maksimalnu količinu distribuirane proizvodnje i/ili potrošnje koja se može priključiti na posmatranu mrežu bez narušavanja dozvoljenih tehničkih i operativnih ograničenja. U ovom radu razmatrat će se priključna sposobnost elektrodistributivne mreže sa aspekta tehničkih ograničenja. Tehnička ograničenja kvalifikuju šta sistem može podnijeti bez oštećenja i bez narušavanja kvaliteta električne energije. U tehnička ograničenja spadaju:

- naponska ograničenja,
- termička ograničenja,
- ograničenja kvaliteta električne energije,
- ograničenja sistema zaštite.

Operativna ograničenja odnose se na upravljanje mreže sa ciljem obezbjeđivanja stabilnosti i bezbjednosti sistema. U operativna ograničenja spadaju:

- balansiranje između proizvodnje i potrošnje,
- stabilnost napona i sistema,
- upravljanje tokom energije,
- ograničenja naponske regulacije i reaktivne snage.

### 4.1. Tehnička ograničenja

Povećana integracija punionica za EV ima različite efekte na tehničke karakteristike sistema, kao što su uticaji na stabilnost i odstupanje napona, povećanje maksimalnog opterećenja, preopterećenje elemenata, problem kvaliteta električne energije, uticaj na druge komponente mreže, povećanih gubitaka aktivne snage itd [3]. Tehnički aspekti često se smatraju ključnim faktorima prilikom planiranja razvoja elektroenergetskog sistema, pa tako i pri planiranju priključenja novih punionica za EV na mrežu. Mnoge elektrodistributivne mreže, da bi olakšale uvažavanje tehničkih ograničenja, usvajaju odgovarajuće granice koje su propisane IEC standardima. U ovom radu prilikom određivanja kapaciteta elektrodistributivne mreže za priključenje stanica za punjenje EV posmatraju se ograničenja odstupanja i varijacija efektivne

vrijednosti napona, termička ograničenja mrežnih elemenata i harmonijska distorzija napona i struje, koja su u nastavku predstavljena.

Najveći broj radova, koji se bave problematikom priključne sposobnosti, analiziraju priključenje distribuiranih izvora energije uzimajući u obzir ograničenje odstupanja napona. Granice odstupanja napona u ovom radu uzeta su u obzir prema evropskom standardu EN 50160, a prema njemu maksimalno odstupanje, za sredjenaponsku i niskonaponsku mrežu, iznosi  $\pm 10\%$  nominalnog napona. Ovaj standard važi za sve punionice za EV, bez obzira na tip ili snagu punjača. Ovo ograničenje se matematički zapisuje sljedećom formulom:

$$0,9V_{in} \leq \sqrt{\sum_{k=1}^K V_i^{(k)2}} \leq 1,1V_{in} \quad (28)$$

gdje  $V_{in}$  predstavlja nominalnu vrijednost napona u čvoru  $i$ , a  $V_i^{(k)}$  predstavlja napon  $k$ -tog harmonika čvora  $i$ . Prema navedenom standardu, ovo ograničenje je zadovoljeno ukoliko se efektivna vrijednost napona nalazi u dozvoljenim granicama za slučaj 95% desetominutnih usrednjenih vrijednosti napona za period posmatranja od jedne sedmice.

Ograničenje varijacija napona predstavlja razliku napona nakon i prije uključenja uređaja na mrežu, koje u slučaju punionica za EV može varirati u zavisnosti od snage punjača. Za AC punjače male snage, čija je struja po fazi manja od 16A, ovo ograničenje se definiše prema IEC 61000-3-3 standardu i da bi bilo zadovoljeno mora biti manje od 3,3%. Za AC punjače veće snage i DC punjače, čija je struja veća od 16A i manja od 75A, primjenjuje se IEC 61000-3-11 standard, koji propisuje da ovo ograničenje mora biti manje od 3%. Za brze DC punjače, koje karakteriše struja preko 75A, koristi se kombinacija IEC 61851-23 i VDE-AR-N 4105 standarada, a granica se ponovo postavlja na najviše 3%. U ovom radu analizirat će se priključenje brzih DC punionica, pa se proračun ograničenja varijacija napona vrši na sljedeći način:

$$\Delta V^0 = \left| \frac{V_i - V_i^0}{V_{in}} \right| 100 \leq 3\% \quad (29)$$

Harmonijska distorzija napona i struje može se posmatrati kao individualna, kada se računa distorzija za svaki harmonik pojedinačno i kao totalna, kada jedna veličina odražava harmonijsku distorziju svih harmonika u odnosu na osnovnu učestanost. Formule prema kojima se računaju individualna harmonijska distorzija struje ( $HDI_k$ ) i totalna harmonijska distorzija napona ( $THDU_k$ ) date su relacijama (27) i (28).

$$HDI_k[\%] = \frac{I_k}{I_1} 100 \quad (30)$$

$$THDU_k[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} 100 \quad (31)$$

Prema IEC 61851-21-2 i VDE-AR-N 4100/4105 standardima, preporuka je da THDU bude ispod 5%. Prilikom analize priključenja punionica za EV, a prema standardima EN 50160 i IEC 61000-2-2, dovoljno je fokusirati se na neparne harmonike i to do 15 harmonika, čije su granične vrijednosti date u tabeli 5. Harmonici iznad 15 reda obično su mali, ispod 0,5%, i analiziraju se ako mreža ima specifične ili osjetljive korisnike.

**Tabela 5.** Granične vrijednosti individualnih harmonika napona

Harmonik	Standard	Granica $HDU_k[\%]$
3.	EN 50160/ IEC 61000-2-2	$\leq 3\%$
5.	EN 50160/ IEC 61000-2-2	$\leq 4\%$
7.	EN 50160/ IEC 61000-2-2	$\leq 3\%$
9.	EN 50160	$\leq 1\%$
11.	EN 50160	$\leq 2\%$
13.	EN 50160	$\leq 2\%$
15.	EN 50160	$\leq 1\%$

Termičko ograničenje mrežnih elemenata definiše se preko naznačene struje, odnosno struja koju punionica povlači, ili daje mreži u slučaju da radi u V2G režimu, mora biti manja od naznačene struje mrežnog elementa. Ovo ograničenje definiše se sljedećim matematičkim izrazom:

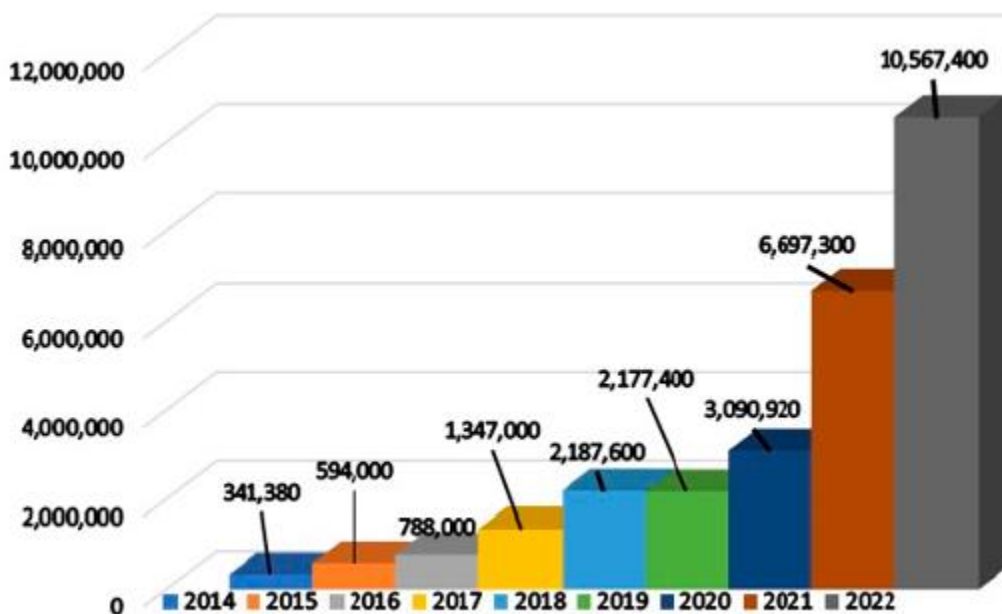
$$\sqrt{\sum_{k=1}^K I_i^{(h)2}} \leq I_{in} \quad (32)$$

gdje  $\sqrt{\sum_{k=1}^K I_i^{(k)2}}$  i  $I_{in}$  predstavljaju efektivnu i naznačenu struju  $i$ -tog elementa posmatrane mreže.

## 4.2. Podjela punjača za EV i izazovi za razvoj EV

U ovom podpoglavlju biće predstavljene osnovne podjele punjača za EV, kao i glavni izazovi koji su usporili popularnost EV.

Razvoj tehnologije EV i namjere da se u budućnosti totalno pređe sa vozila sa unutrašnjim sagorijevanjem na zeleniji oblik transporta doprinosi smanjenju emisije CO<sub>2</sub>, buke, poboljšanju kvaliteta vazduha itd. Naravno, cilj je i da se EV napajaju električnom energijom koja je proizvedena iz čistih izvora, odnosno energije koja pri generisanju ne dovodi do emisije CO<sub>2</sub>. Na slici 4 prikazane su informacije o prodaji EV za period od 2014. do 2022. godine, a ti podaci jasno ukazuju na popularnost EV u svijetu i na trend da će u budućnosti zamijeniti tradicionalna vozila koja emituju CO<sub>2</sub> [40].



Slika 4. Broj prodanih električnih vozila u svijetu za period od 2014-2022

Međutim, i dalje postoje određeni izazovi koji utiču na dalji razvoj i veću popularnost EV, a među njima se ističu infrastruktura, troškovi i domet vožnje [3]. Rad [40] navodi sljedeće prepreke:

- Različiti modeli EV ne podržavaju sve vrste punjenja, niti svaka stanica nudi sve vrste punjenja. Zbog toga se javljaju izazovi kod vozača da pronađu odgovarajući punjač na određenoj teritoriji. Do veće popularnosti EV bi došlo, ukoliko bi svaka punionica podržavala sve tipove punjenja.

- Stanice za punjenje se uglavnom nalaze u gradskom području, dok ih je nedovoljno na autoputevima. Sa druge strane, jedna od prepreka za postavljanje punionica u gradu, koje se integrišu sa obnovljivim izvorima, je obezbjeđivanje slobodnog zemljišta, koje se može lako obezbjeđiti na prostoru autoputeva.
- Svaka zemlja ima usvojen svoj standard za proizvođače uređaja za punjenje EV. Kada bi ovaj standard bio jedinstven za sve zemlje, troškovi punjača za EV značajno bi se smanjili.

Osnovna podjela punjača za EV je na AC i DC punjače, a glavne karakteristike i detaljnija klasifikacija ovih topologija predstavljena je u tabeli 6 [3]. AC punjači su skuplji i sporiji od DC punjača, međutim mana DC punjača je što nisu kompatibilni sa svim tipovima vozila. Prema smjeru protoka snage, punjač može biti jednosmjernan ili dvosmjernan. Jednosmjerni punjači omogućavaju samo punjenja baterija vozila, dok dvosmjerni punjači, pored punjenja, mogu i vraćati energiju u mrežu, odnosno danas se dvosmjerni punjači mogu klasifikovati na sljedeći način [41]:

- Vehicle to grid (V2G): mogućnost vraćanja energije iz vozila u mrežu,
- Vehicle to home/building (V2H/V2B): mogućnost prenosa energije iz vozila u domaćinstva ili poslovne objekte,
- Vehicle to vehicle (V2V): mogućnost prenosa energije iz jednog u drugo vozilo.

**Tabela 6.** Klasifikacija punjača za EV

Tip	AC			DC		
	Sporo	Srednje brzo	Brzo	Brzo		
Level	Level 1	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2	Level 3
Max U	120 V-AC	240 V-AC	-	200-500 V-DC	200-500 V-DC	200-600 V-DC
Max I	12A	16A	-	80A	200A	400A
Max P	2 kW	20 kW	>20 kW	40 kW	100 kW	240 kW
Ugrađeni/Spoljni punjač	Ugrađeni	Ugrađeni	-	Spoljni	Spoljni	Spoljni
Broj faza potrebnih za punjenje	Jedna faza	Jedna faza ili tri faze	-	Tri faze	Tri faze	Tri faze
Vrijeme punjenja	17 h	1.2 h	-	1.2 h	20 min	< 20 min

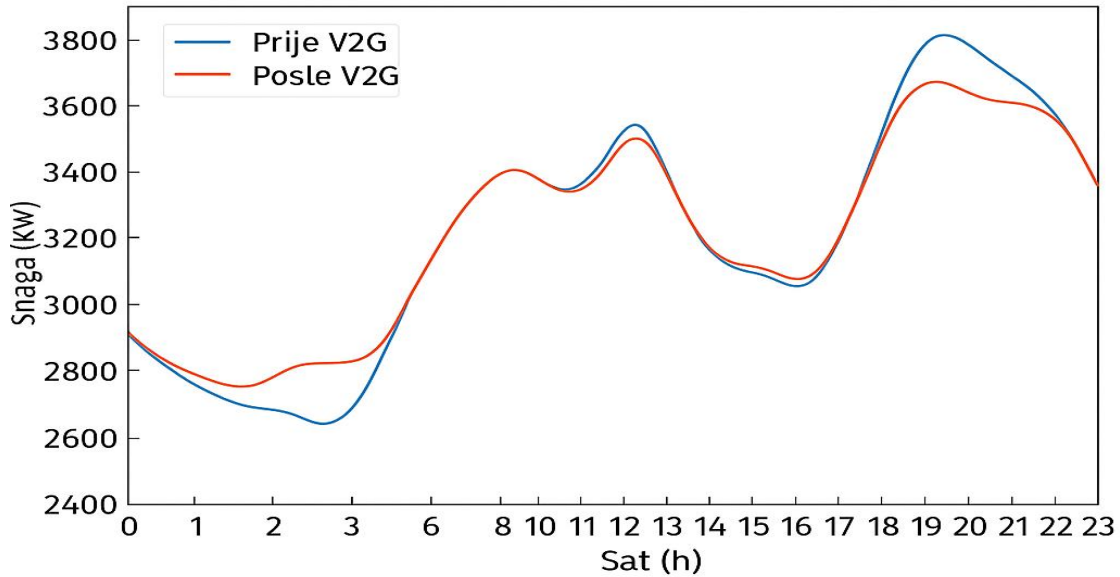
### 4.3. Rad EV u V2G režimu

Baterije u EV se mogu koristiti i za isporuku energije nazad u mrežu, što predstavlja opciju V2G. Ovaj režim podrazumijeva da se vozila pune u periodu niskog i srednjeg opterećenja konzuma, dok u časovima maksimalnog opterećenja ova vozila vraćaju energiju u mrežu i na taj način pomažu sistem da savlada probleme vršnog opterećenja. Dakle, ovaj režim može uticati pozitivno na sistem sa aspekta vršnog opterećenja, odnosno može doprinijeti ravanju dnevnog dijagrama opterećenja. Rad [42] analizira uticaj rada EV u V2G režimu na ravanje dijagrama opterećenja, a rezultati iz toga rada predstavljeni su na slici 5, gdje se gornji grafik (a) odnosi na slučaj niskonaponskih-stambenih oblasti, a donji grafik (b) na niskonaponske-industrijske oblasti, prije i nakon V2G režima. Za ova dva slučaja, uzeto je da 75% punionica radi u V2G, a ostatak samo u režimu potrošnje. Da se ne bi narušile potrebe vozača EV za narednu vožnju i izbjegao naredni pik potrošnje, prilikom punjenja EV u V2G režimu, primjenjuje se strategija “prvo pražnjenje, zatim punjenje”.

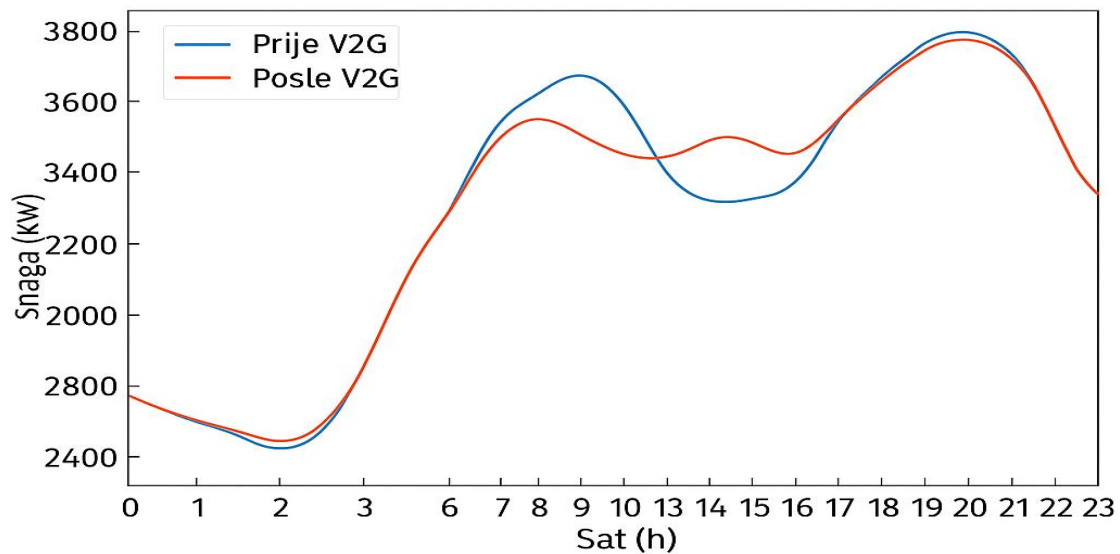
Rad EV u V2G izaziva i pozitivne efekte i na veću integraciju obnovljivih izvora energije (OIE), jer jedna od barijera za veću integraciju OIE predstavljaju i zahtjevi za instaliranjem sistema za skladištenje energije, koji su sa finansijske strane veoma zahtjevne komponente. U tom slučaju baterije EV mogu da posluže kao dinamički sistemi za skladištenje energije, posebno znajući činjenicu da EV dnevno u prosjeku provedu oko 22h parkirana. Mana V2G režima predstavlja uticaj na degradaciju baterija EV, što se na neki način može kompenzovati različitim podsticajima za korisnike. Takođe, EV u ovom režimu mogu obezbijediti i pomoćne mrežne usluge, kao što su regulacija napona, regulacija frekvencije, rezerva u radu itd. Istraživanja su pokazala, da primjena V2G režima za potrebe pomoćnih mrežnih usluga je daleko značajnije od uticaja ovog režima na smanjenje vršnog opterećenja [40]. Primjena V2G režima podrazumijeva i instaliranje odgovarajuće komunikacione mreže, kako bi se omogućile sljedeće funkcije [43]:

- Identifikacija vozila i olakšavanje procesa naplate,
- Minimizacija troškova punjenja izborom najpogodnijeg vremena punjenja sa aspekta cijene,
- Podrška radu mreže tokom časova vršnog opterećenja, kao i optimizacija opterećenja mreže kontrolom struje punjača u skladu sa potrebama mreže.

Za potrebe ovoga rada, analizirat će se kapacitet elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za EV, koje rade u V2G režimu.



(a)



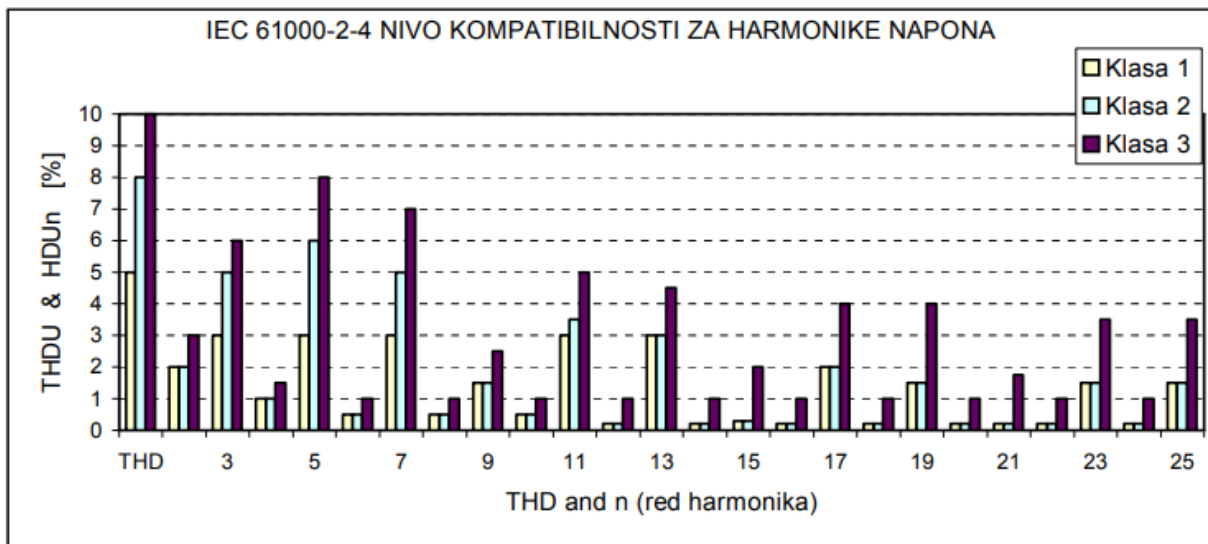
(b)

Slika 5. Dnevni dijagram opterećenja prije i posle V2G režima

#### 4.4. Harmonijska analiza

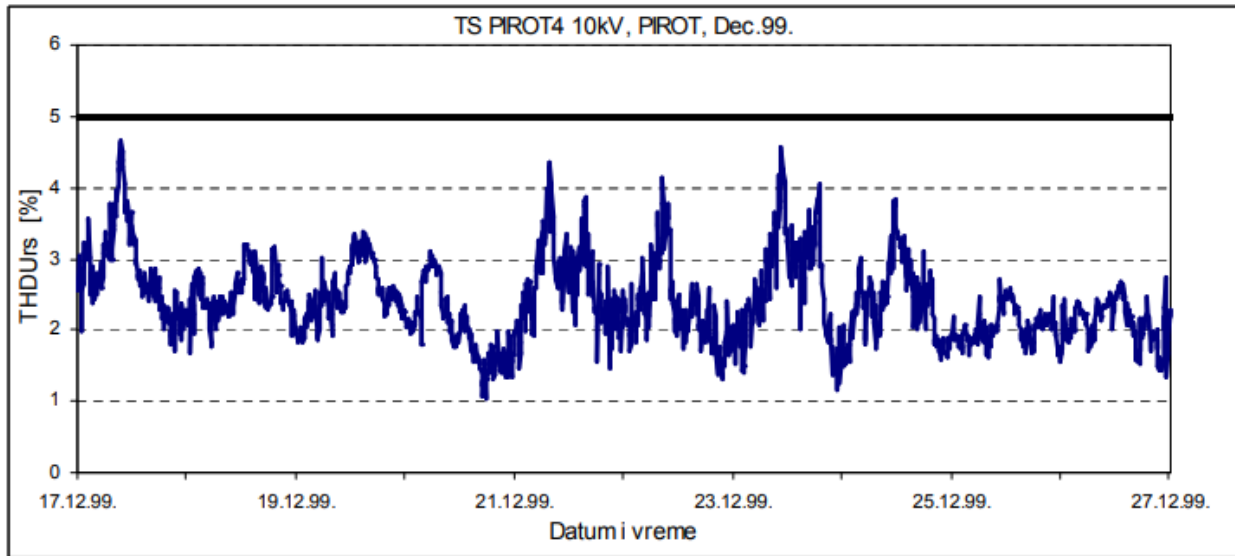
Prema IEC 61000-2-4 standardu, koji važi za naponski nivo do 35 kV, limiti viših harmonika napona za tri klase potrošača predstavljeni su na slici 6, sa koje se zaključuje da su granice, koje se odnose na klasu 1, najstrožije. Klasa 1 odgovara osjetljivim potrošačima, klasa 2 se odnosi na sabirnice prema javnoj mreži, a klasa 3 predstavlja industrijske potrošače [44]. U osjetljive potrošače spadaju data centri, mjerni i laboratorijski sistemi, medicinska oprema,

kontrolni sistemi i automatika visoke preciznosti, UPS, inverteri, regulatori itd. Čeličane, livnice, pogoni sa velikim motorima i frekventnim pretvaračima, veliki pogoni sa ispravljačima i pretvaračima, zavarivački pogoni, cementare, rudnici, hemijska industrija, brodogradilišta i druge industrije, spadaju u grupu potrošača sa najširim limitima harmonijske distorzije napona.

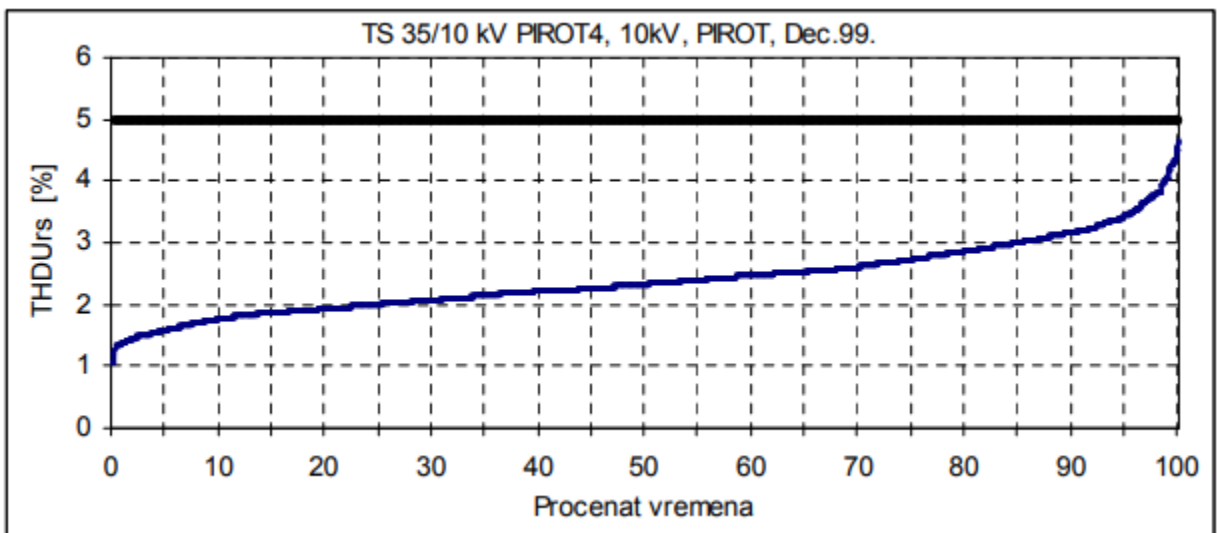


**Slika 6.** Limiti harmonika napona prema IEC 61000-2-4

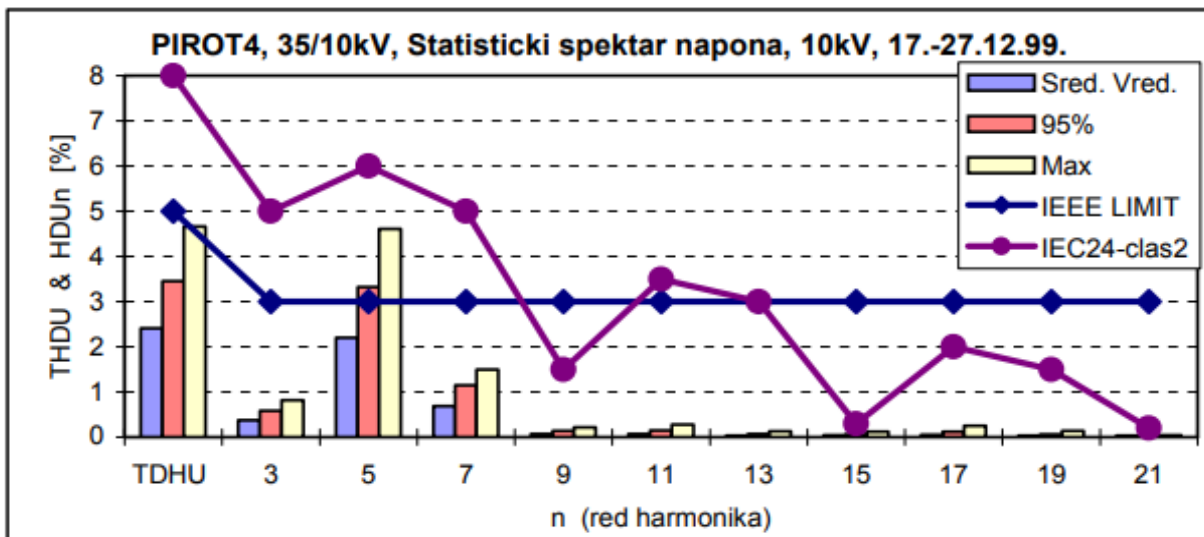
Na slici 11 predstavljeni su rezultati mjerenja *THDU* na sabirnicama, 10 kV naponskog nivoa TS PIROT4 [44]. Vremenska promjena *THDU*, prikazana na navedenoj slici, odnosi se na mjerni ciklus od 10 dana, što predstavlja veliki broj podataka. Veliki broj podataka podrazumijeva upotrebu statističke analize, kako bi se rezultati jednostavnije prikazali i protumačili. Bitni rezultati u slučaju harmonijske distorzije, a ovo važi na sličan način i za druga ograničenja, su, da li je premašen određeni nivo ili ne, a ako jeste, u kom procentu, kolika je srednja vrijednost i sl. Podrazumijeva se da ograničenja harmonijske distorzije nisu narušena, ukoliko su vrijednosti mjerenja u 95% vremena ispod postavljenih limita. Dakle, zanemarivanjem kratkotrajnih skokova dobijaju se precizniji podaci o tome da li su narušena ograničenja. Slika 8 predstavlja statistički prikaz *THDU* za rezultate mjerenja sa slike 7, a sa ovog dijagrama, za cijeli posmatrani period, vrijednosti mjerenja su ispod dozvoljenih limita. Takođe, kombinovani statističko-frekventni dijagram, koji je predstavljen na slici 9 za industriju Tigar, predstavlja dobru osnovu za donošenje zaključaka. Sa ovoga dijagrama vidi se da su svi posmatrani rezultati ispod limita postavljenih prema IEC 61000-2-4 standardu [44]. Na slici 10 predstavljene su procentualne vrijednosti struja viših učestanosti u odnosu na osnovni harmonik za industrijski potrošač [44]. Kako će se u ovom radu za određeno priključenje punionica u mreži, posmatrati mjerenja samo u jednom trenutku, to dovodi do zaključka da će se dobiti konzervativniji rezultati priključne sposobnosti, ali takav pristup sa druge strane utiče na manju proračunsku složenost.



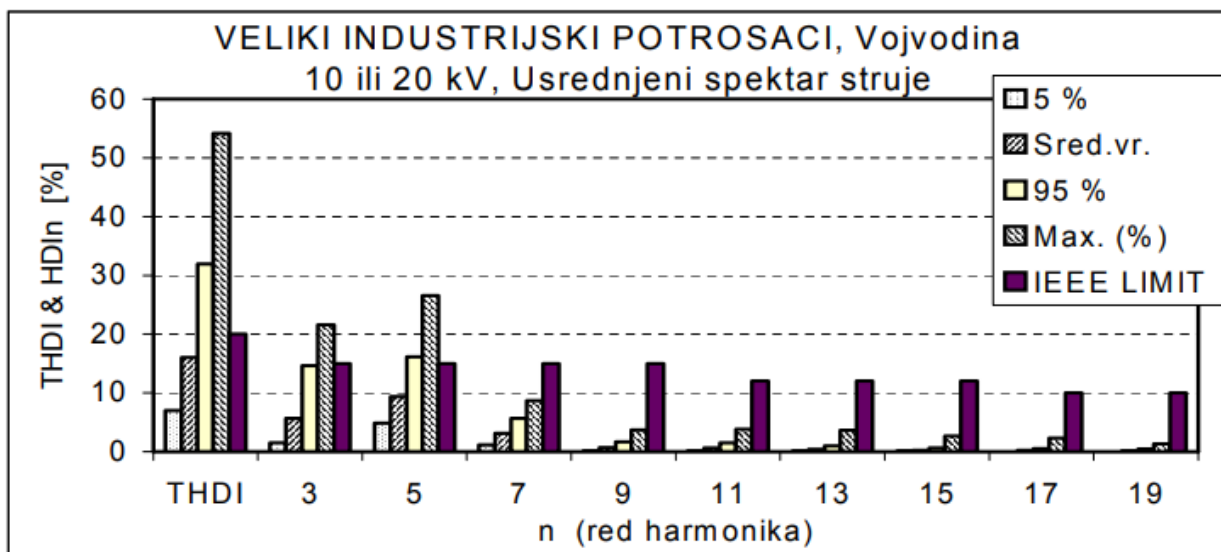
**Slika 7.** Vremenska promjena harmonika napona na sabirnicama 10 kV



**Slika 8.** Kumulativna vjerovatnoća THDU sa slike 10



Slika 9. Podaci o harmonijskoj distorziji napona na sabirnicama industrije “Tigar”, Pirot



Slika 10. Procentualne vrijednosti struja viših učestanosti industrijskog potrošača

## 4.5. Harmonijska analiza punjača za EV

Kao što je već naglašeno u prethodnim poglavljima, punjači za EV, kada su aktivni, predstavljaju izvore harmonijskih struja u mreži. Analiza emisije harmoničnih struja iz punionica za EV u niskonaponskoj mreži izvršena je u radu [45], u kome se ispituje uticaj dvije različite stanice za brzo punjenje, snage 50 kW, na kvalitet električne energije. Ispitivanje kvaliteta električne energije sprovedeno je za tri različite faze procesa punjenja, i to za fazu početka

punjenja, punjenje pri punoj struji i faza završetka punjenja. Pokazuje se da je harmonijski sadržaj, koji emituju punionice za EV, mnogo više izražen pri manjoj struji nego pri maksimalnoj struji tokom punjenja, koja za analizirana punjenja iznosi 51.2 A. Početno punjenje karakteriše i tranzijentna struja koja dostiže vrijednost i do 250 A, nakon koje slijedi nagli pad i postepeno povećavanje struje do vrijednosti pune struje. Ovo istraživanje pokazuje da emisije uglavnom ostaju u okviru dozvoljenih granica pri punom opterećenju, a dominantni su neparni harmonici i to petog, sedmog i jedanaestog reda. Zaključeno je i da različiti fazni uglovi struja dovode do poništavanja pojedinačnih harmonika između aktivnih punjača ili drugih generatora viših harmonika.

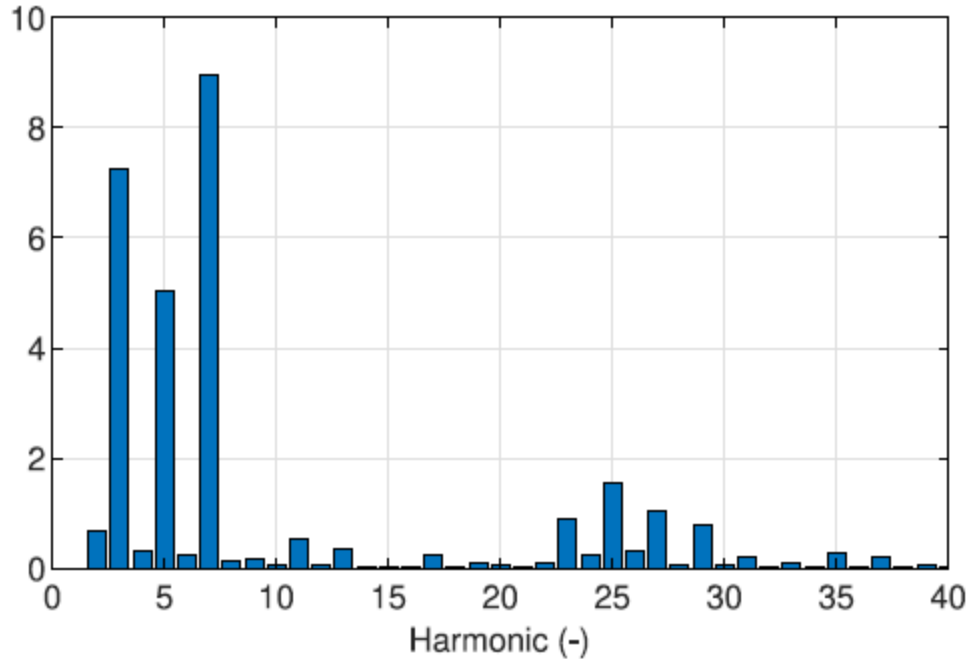
U radu [46] takođe je analiziran uticaj stanica za brzo punjenje na mrežu u pogledu harmonika i superharmonika. Analiza se bazira na mjerenju u instalaciji sa četiri brza punjača snage po 350 kW, pri čemu se broj aktivnih punjača u toku istraživanja mijenja. Punjači su priključeni na distributivni transformator napona 10/0,4 kV, a karakteristike punjača date su u tabeli 7. Na ovaj transformator nisu priključeni drugi potrošači. Ovo istraživanje pokazalo je da emisija harmonika zavisi od broja aktivnih punjača, odnosno da ta emisija ne raste proporcionalno broju punjača u radu, već se emisija usporava kako raste broj aktivnih punjača, tako da se dio emisije odvija između susjednih punjača ili drugih povezanih uređaja. Zbog toga se definiše faktor raznovrsnosti  $DF_k$ , koji opisuje način na koji se harmonijske struje sabiraju u jednoj instalaciji. Njegova vrijednost može biti između 0 i 1, u zavisnosti od faznih uglova struja viših harmonika pojedinih uređaja. Njegova vrijednost računa se prema sljedećoj formuli [46]:

$$DF_k = \frac{I_{sk,tot}}{\sum I_{sk,i}} \quad (33)$$

gdje je  $I_{sk,tot}$  ukupna izmjerena harmonijska struja, a  $\sum I_{sk,i}$  predstavlja sumu harmonijskih struja pojedinačnih uređaja. Na slici 11 prikazane su vrijednosti struja viših harmonika koje generiše punjač u slučaju da je opterećenje aktivnog punjača 300 kW [46]. Ovaj rad pokazuje da procentualne vrijednosti viših harmonika u odnosu na efektivnu vrijednost struje osnovne učestanosti ostaju na skoro istom nivou i za snagu punjenja od 300 kW i za opterećenje od 50 kW.

**Tabela 7.** Karakteristike brzog DC punjača analiziranog u radu [46]

<b>Vrijednost izlaznog DC napona</b>	460-800 V
<b>Maksimalna vrijednost izlazne DC struje</b>	700 A
<b>Maksimalna vrijednost DC snage</b>	350 kW
<b>Topologija</b>	2-level AFE
<b>Frekvencija prekidanja</b>	3.6 kHz
<b>Efikasnost</b>	96%
<b>Faktor snage (&gt; 50% opterećenja)</b>	0.99



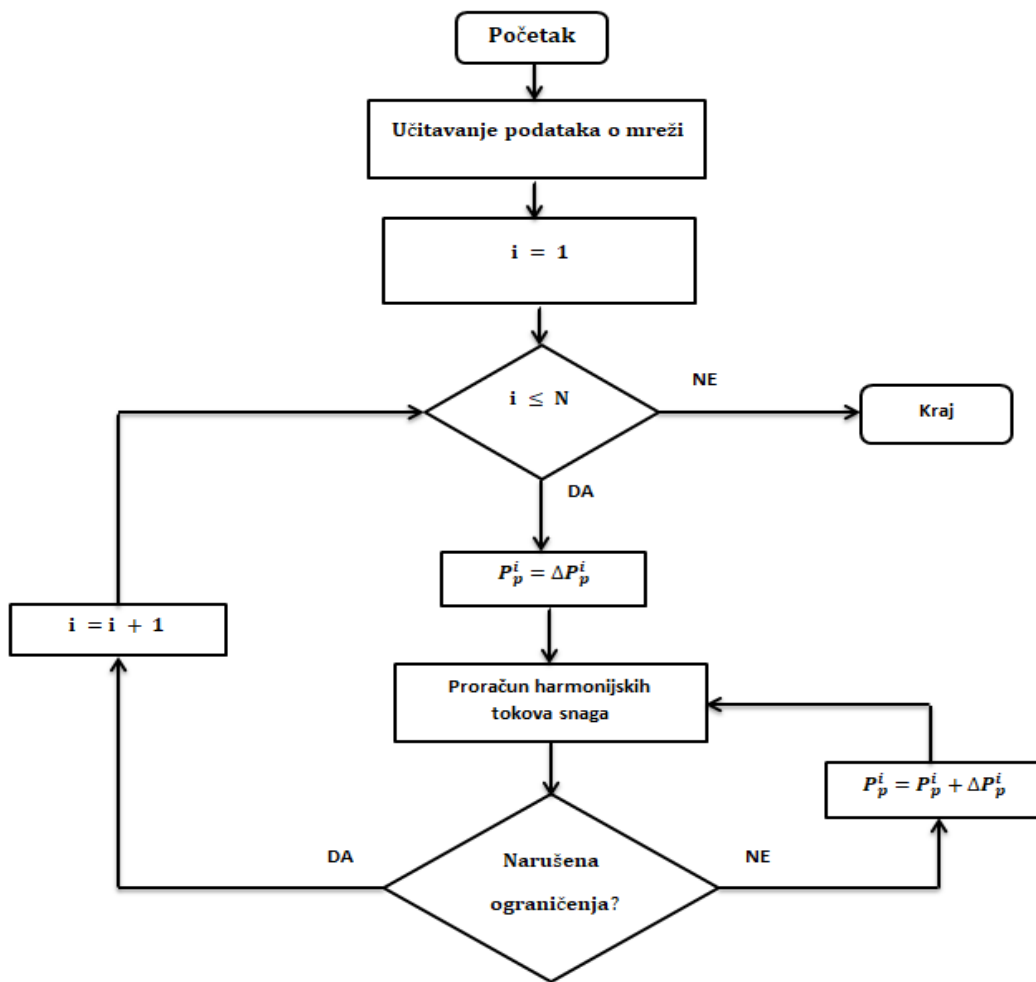
**Slika 11.** Spektar harmonijskih struja punjača

## 4.6. Centralizovana priključna sposobnost

Centralizovana priključna sposobnost elektrodistributivne mreže odnosi se na pojedinačne čvorove posmatrane mreže, a za njeno određivanje biće primijenjena deterministička metoda. Ovakva metodologija, kao što je već naglašeno u drugom poglavlju, sastoji se iz dvije faze. U prvoj fazi vrši se proračun harmonijskih tokova snaga primjenom raspregnutog metoda, a na osnovu ovog proračuna, u drugoj fazi, vrši se proračun priključne sposobnosti svakog pojedinačnog čvora za priključenje punionica za EV. Ovaj priključni kapacitet računa se na način što se snaga punionica postepeno povećava dok se ne naruše posmatrana ograničenja, odnosno maksimalna snaga koja ne dovodi do narušavanja ograničenja predstavlja priključnu sposobnost za posmatrani čvor.

Postoji veliki broj scenarija proizvodnje i potrošnje koje je neophodno podvrgnuti provjeri narušavanja ograničenja normalnog pogona. Sprovođenje proračuna harmonijskih tokova snaga za sve scenarije značajno povećava proračunsku složenost, pa u tom slučaju ovakva metodologija praktično ne bi bila primjenjiva za realne distributivne mreže. Međutim, kako je uzeta pretpostavka da punionice rade u V2G režimu, dovoljno je posmatrati dva scenarija. Prvom scenariju odgovara srednje ili nisko opterećenje konzuma i rad punionica kao potrošača energije. U drugom scenariju posmatra se vršno opterećenje i rad punionica u generatorskom modu.

Koraci algoritma za određivanje centralizovane priključne sposobnosti prikazani su na slici 12. Sa dijagrama jasno je da se priključna sposobnost računa za svaki čvor posmatrane mreže. U  $i$ -tom čvoru postepeno se povećava snaga punionica za unaprijed definisani korak  $\Delta P_p^i$ , i za svako novo povećanje računaju se harmonijski tokovi snaga i provjeravaju posmatrana ograničenja. Prvi put kada se naruše ograničenja, prelazi se na novi čvor  $i$  sve tako do posljednjeg čvora.



Slika 12. Dijagram toka algoritma za proračun centralizovane priključne sposobnosti

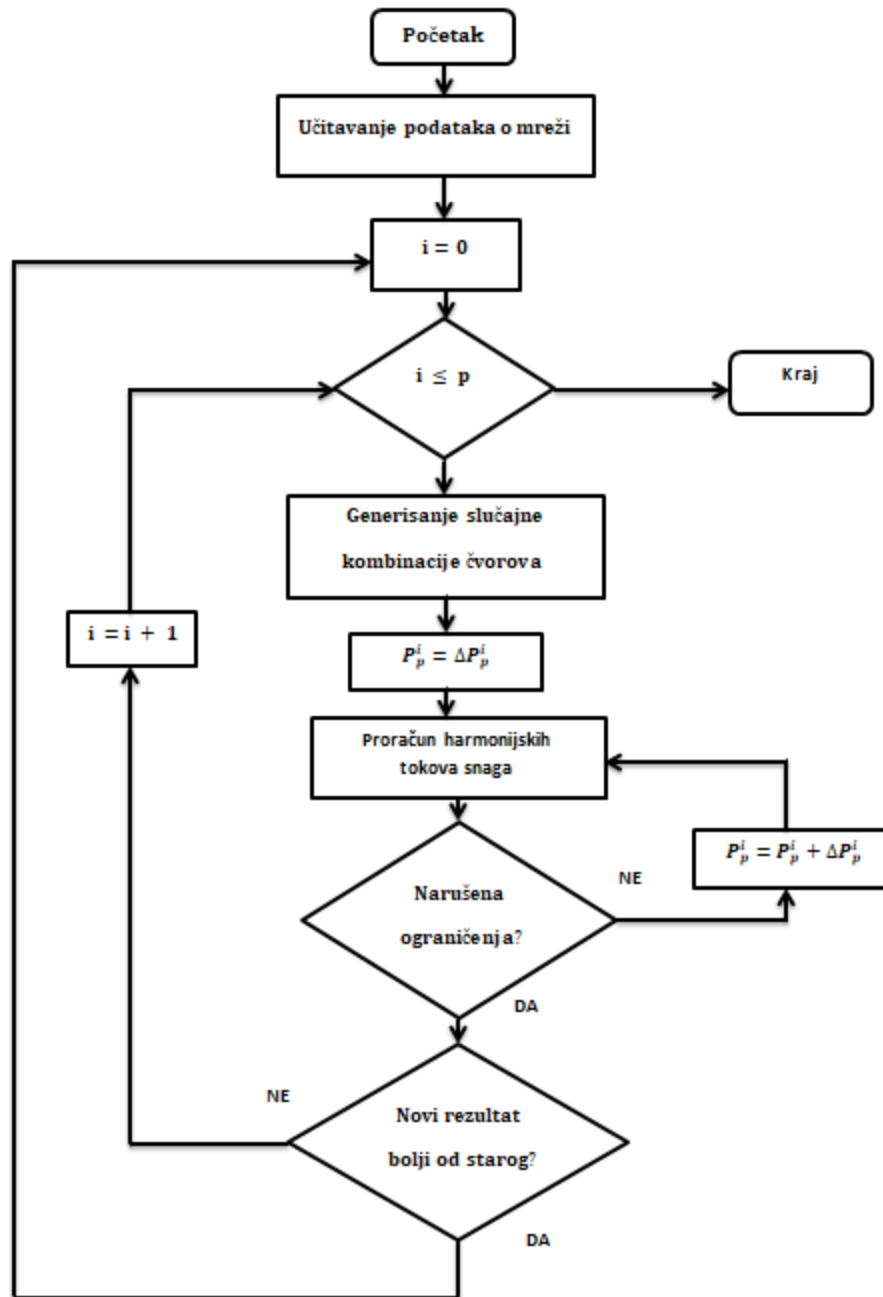
## 4.7. Decentralizovana priključna sposobnost

Za razliku od centralizovane, decentralizovana priključna sposobnost odnosi se na više čvorova posmatrane mreže. Decentralizovana priključna sposobnost predstavlja maksimalnu snagu koja se može priključiti u određenom broju čvorova posmatrane mreže, a da ograničenja

normalnog pogona budu zadovoljena. U ovom radu, decentralizovana priključna sposobnost biće računata na dva načina, odnosno primjenom stohastičkih pristupa. Izbor broja lokacija može biti proizvoljan, ali za potrebe ovoga istraživanja pretpostavljeno je da se punionice priključuju u tri čvora. Takođe, pretpostavljeno je da su snage, koje se mogu priključiti, jednake u sva tri čvora.

Prvi način određivanja maksimalne snage punionica primjenom stohastičkog pristupa oslanja se na primjenu Monte Carlo tehnike. Na početku usvaja se broj kombinacija lokacija za priključenje punionica, koji će se razmatrati. Što je ovaj usvojeni broj veći to je preciznost rezultata veća, ali se proporcionalno tom broju i računarsko opterećenje povećava. Na primjer, za mrežu od 33 čvora, broj mogućih slučajno generisanih kombinacija od tri čvora je 5456, što znači da je neophodno razmotriti navedeni broj scenarija da bi se dobio pouzdan rezultat. Ni ovaj broj kombinacija ne može garantovati tačan rezultat, jer se neke slučajno generisane kombinacije mogu ponavljati. Za posmatranu kombinaciju lokacija, slično kao u slučaju centralizovane priključne sposobnosti, povećava se postepeno snaga punionica, u svim čvorovima jednako. Prvi put kada se naruše ograničenja, u bilo kojem čvoru, prelazi se na generisanje naredne kombinacije. Ona kombinacija čvorova, koja obezbjeđuje najveću snagu priključenja punionica, usvaja se kao najbolja kombinacija lokacija za posmatrani nivo opterećenja konzuma sa aspekta decentralizovane priključne sposobnosti.

Drugi način takođe podrazumijeva stohastički pristup, a ovakva metodologija proračuna decentralizovane priključne sposobnosti nije korišćena u pregledanoj literaturi. Ponovo se posmatraju slučajno generisane kombinacije lokacija čvorova, a i sada se usvaja pretpostavka da se u sva tri čvora, posmatrane kombinacije, postepeno dodaju jednake snage punionica. Sljedeći korak se razlikuje od prošle metodologije, jer se sada rezultat posmatrane kombinacije poredi sa prošlom najboljom kombinacijom. Ukoliko je novi rezultat bolji od do tada najboljeg rezultata, usvaja se novi najbolji rezultat, a ukoliko nije, najbolji rezultat ostaje isti. Na početku se pretpostavlja broj  $p$ , koji se bira na osnovu broja mogućih kombinacija, a što je  $p$  veći to je rezultat precizniji. Ovaj broj definiše koliko puta uzastupno stara kombinacija mora biti bolja od svake nove, a ukoliko se dobije novi bolji rezultat, brojač  $p$  vraća se na nulu. Da bi se dobio krajnji rezultat, brojač mora da dostigne vrijednost  $p$ . Koliko će vrijeme proračuna biti, zavisi od usvojenog broja  $p$ , dimenzionalnosti posmatrane mreže, ali i od slučajnog generisanja kombinacija. Ukoliko se na početku generiše najbolja kombinacija, vrijeme proračuna će biti mnogo manje nego da se ta kombinacija generiše pri kraju proračuna. Na slici 13 prikazani su koraci ove metodologije za određivanje decentralizovane priključne sposobnosti.



Slika 13. Dijagram toka algoritma za proračun decentralizovane priključne sposobnosti

## 5. Analiza rezultata proračuna centralizovane i decentralizovane priključne sposobnosti

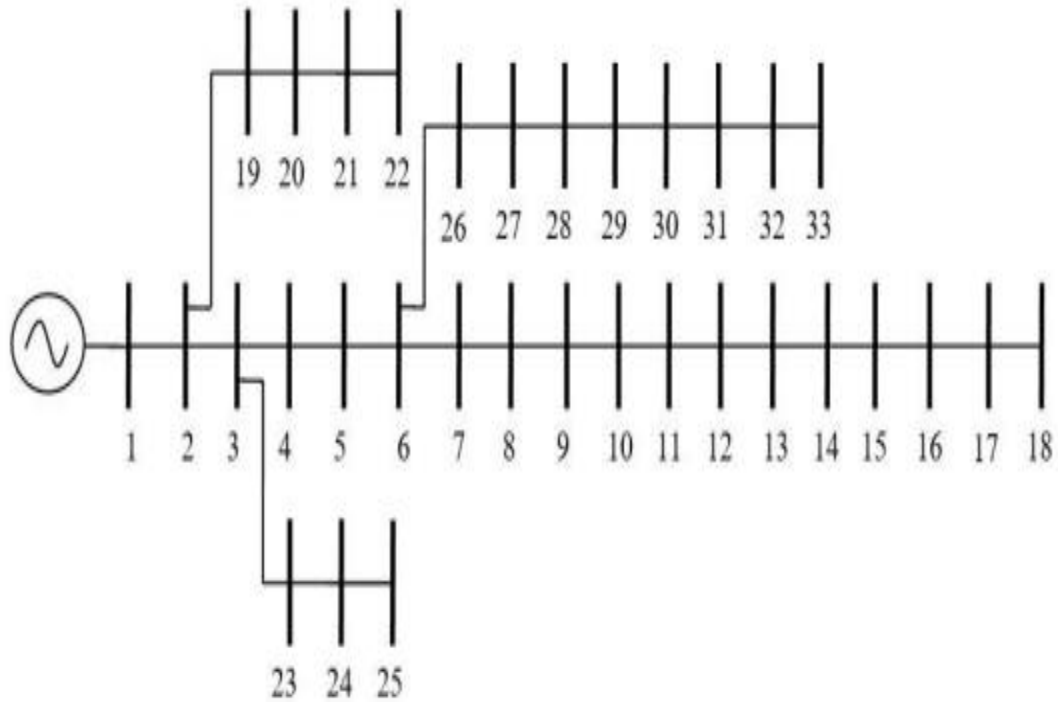
U ovom poglavlju predstavljani su rezultati proračuna centralizovane i decentralizovane priključne sposobnosti testne elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za EV primjenom razvijenih metodologija. Takođe, biće predstavljani rezultati odgovarajuće kombinacije lokacija čvorova u kojima se priključuje fiksna snaga punionica za EV, a najbolja kombinacija je ona pri kojoj su gubici u mreži minimalni. Ovaj proračun se sprovodi primjenom sličnih algoritama kao u slučaju decentralizovane priključne sposobnosti.

### 5.1. Testna elektrodistributivna mreža

U ovom istraživanju analiza je sprovedena na IEEE testnoj elektrodistributivnoj mreži, čija je jednopolna šema prikazana na slici 14. Radi se o radijalnoj distributivnoj mreži naponskog nivoa 12,66 kV, koja se sastoji od 33 čvora i 32 grane. Ukupno opterećenje sistema prije priključenja punionica za EV iznosi 3,715 MW i 2,3 MVAR, ukupni gubici aktivne snage su 202,677 kW, a minimalni napon, koji iznosi 0,9038 p.u., je u 18. čvoru [1]. Pojedinačni izvodi odgovaraju različitim tipovima potrošača, čija se opterećenja kreću od 45 kW do 420 kW. U čvorovima 7, 25 i 30 priključeni su industrijski potrošači, a u ostalim stambeni objekti, domaćinstva i sl. Svi proračuni sprovode se u jediničnim vrijednostima, bazna snaga iznosi 10 MVA, a snaga trolnog kratkog spoja jake mreže podešena je na 1000 MVA, pomoću koje je modelovana impedansa kratkog spoja ostatka sistema. Pri proračunu uzet je u obzir i skin efekat, koji se za srednjenaponske vodove može približno aproksimirati sljedećom formulom:

$$R_k = \sqrt{k} R \quad (34)$$

gdje  $R$  predstavlja otpornost grana mreže na osnovnoj učestanosti, a  $R_k$  otpornost za  $k$ -ti harmonik.



**Slika 14.** Jednopolna šema testne elektrodistributivne mreže

U radu [47] predstavljena su terenska mjerenja struja viših učestanosti za stambeni objekat, koji je povezan na niskonaponsku mrežu. Na osnovu ovog i drugih navedenih istraživanja, kao i na osnovu topologije mreže, u tabeli 8, predstavljene su procentualne vrijednosti struja viših učestanosti rezidencijalnih potrošača u odnosu na osnovni harmonik koje će se koristiti u ovom radu. U tabeli 9 predstavljene su procentualne vrijednosti struja viših harmonika industrijskog opterećenja koje će se koristiti u ovom istraživanju.

**Tabela 8.** Procentualne vrijednosti struja viših harmonika stambene zgrade

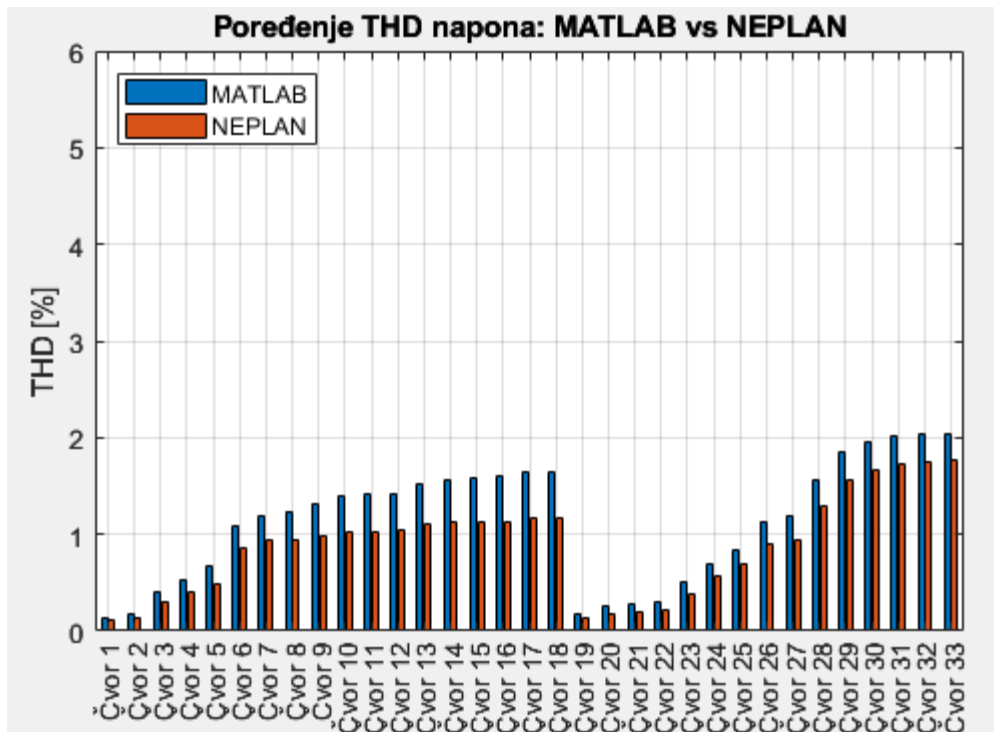
Red harmonika	Procentualna vrijednost
<b>3</b>	3%
<b>5</b>	3%
<b>7</b>	1,5%
<b>9</b>	0,7%
<b>11</b>	0,4%
<b>13</b>	0,2%

**Tabela 9.** Procentualne vrijednosti struja viših harmonika industrijskog potrošača

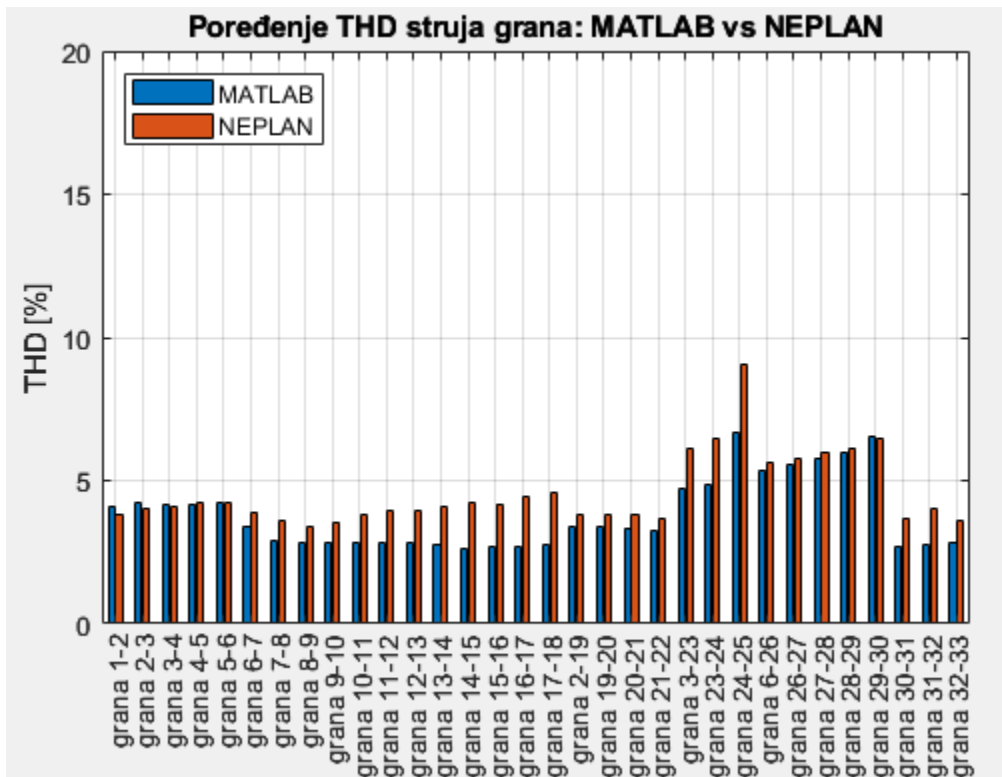
Red harmonika	Procentualna vrijednost
3	4%
5	5,5%
7	3,5%
9	1%
11	2,5%
13	2,5%
15	0,4%
17	1,25%
19	1,5%

## 5.2. Rezultati raspregnutog metoda u Matlabu

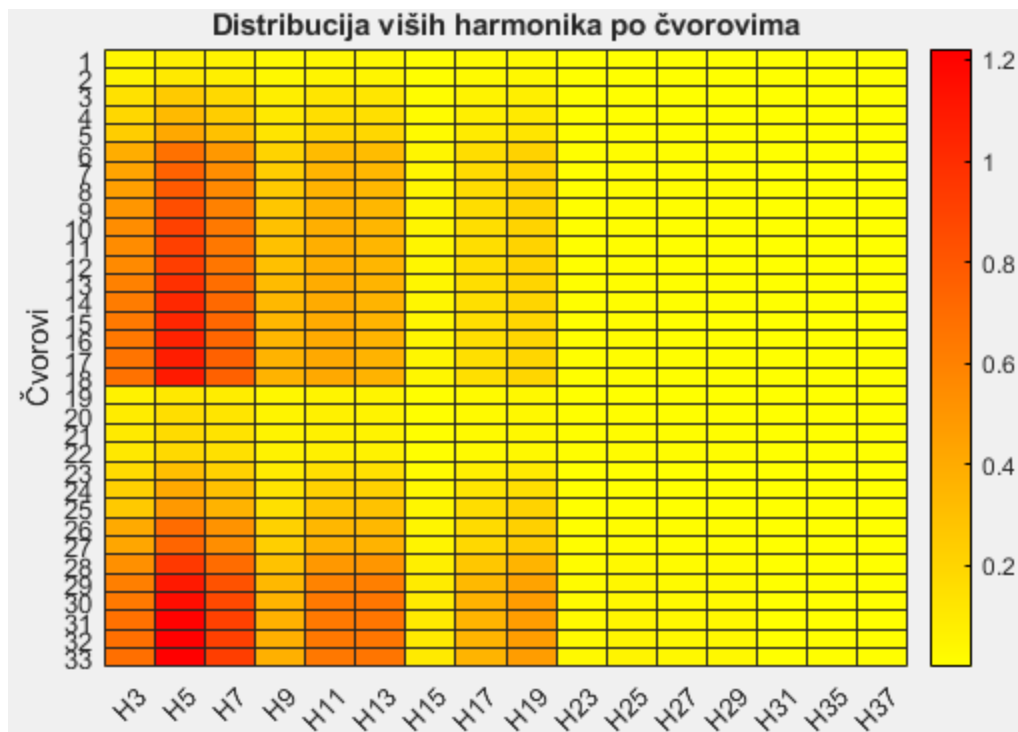
Implementacija raspregnutog metoda za proračun harmonijskih tokova snaga izvršena je u Matlab programskom okruženju. Rezultati raspregnutog metoda upoređeni su sa harmonijskim proračunom dobijenim u programu Neplan, a poređenja *THD* napona i struje, dobijene na ova dva načina, predstavljena su na slikama 15 i 16. Poređenje rezultata sprovedeno je analizirajući navedenu testnu mrežu na koju su priključene tri punionice za EV, u čvorovima 22, 30 i 33, a kojima odgovara snaga od po 100 kW sa faktorom snage od 0.99. Navedenim punionicama odgovara harmonijska distorzija kao sa slike 11, koja predstavlja harmonijsko izobličenje punionice za EV opisane u radu [46]. Slika 15 ukazuje da manje vrijednosti *THD* napona karakterišu početne čvorove, dok se njihova vrijednost povećava kako se ide prema kraju mreže. Isto važi i za razliku između dobijenih rezultata na ova dva načina, ta razlika je najmanja u napojnim čvorovima mreže, a najveća u 18. čvoru. Sa slike 16 vidi se da su vrijednosti *THD* struja, dobijene raspregnutim metodom, po određenim granama veće od proračuna sprovedenog u Neplanu, dok za pojedine grane važi obratno, a najveća razlika u rezultatima je kod grane 24-25. Rezultati distribucije viših harmonika napona po čvorovima predstavljeni su na slici 17, sa koje se zaključuje da su najkritičniji harmonici 5 i 7, što se poklapa sa harmonijskom distorzijom potrošača. Maksimalne vrijednosti individualnih harmonika postižu se u 33. čvoru, a takvi rezultati su i logični, obzirom da se maksimalna vrijednost *THD* napona očitava u tom čvoru.



Slika 15. Komparacija rezultata THD napona dobijenih raspregnutim metodom i u Neplanu



Slika 16. Komparacija rezultata THD struje dobijenih raspregnutim metodom i u Neplanu

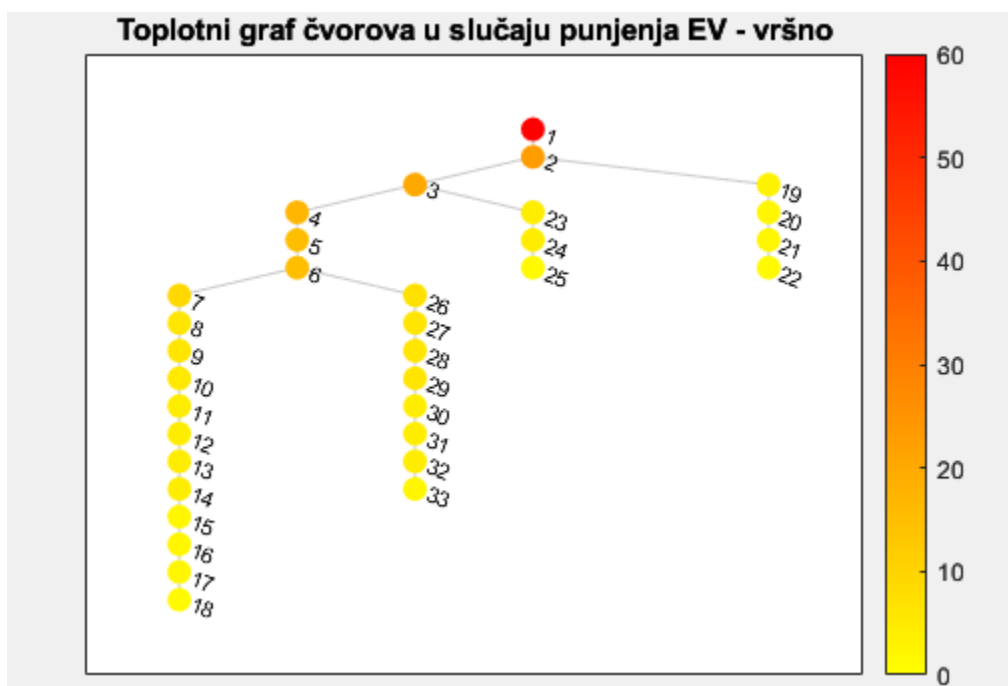


**Slika 17.** Rezultati distribucije viših harmonika dobijenih pomoću raspregnutog metoda

### 5.3. Rezultati centralizovane priključne sposobnosti

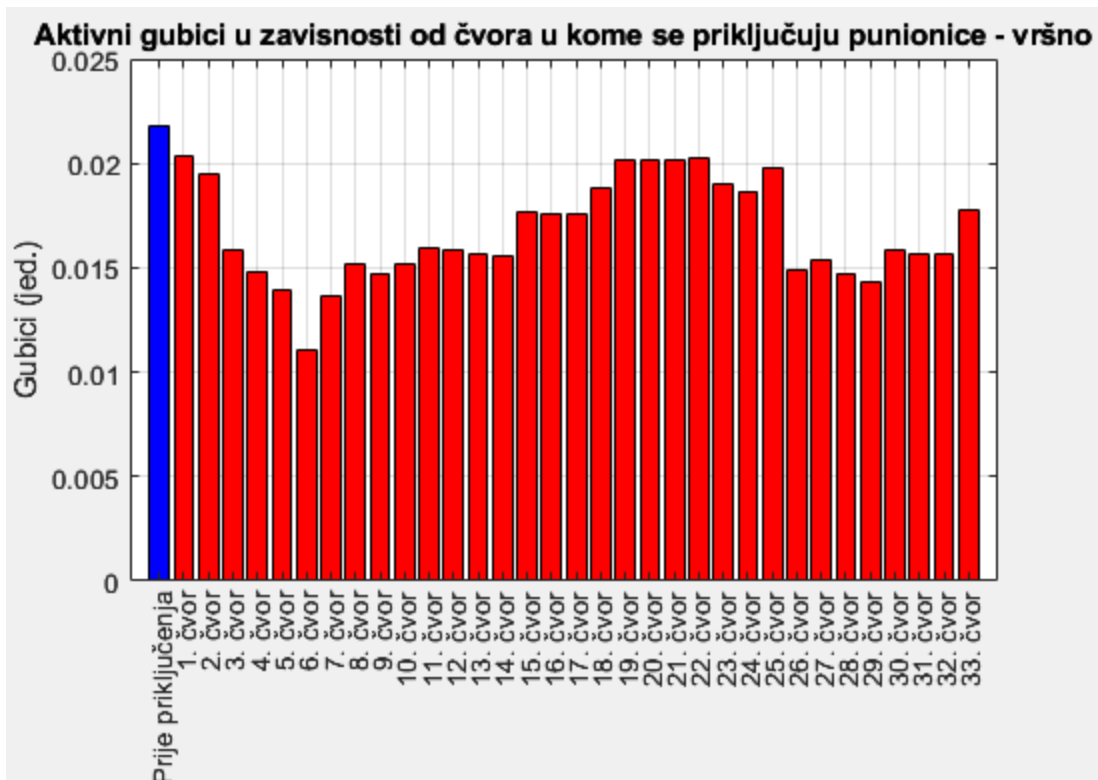
Da bi se odredila centralizovana priključna sposobnost distributivne mreže, neophodno je odrediti maksimalnu snagu punionica koje ne narušavaju tehnička ograničenja navedena u podpoglavlju 4.1. Pretpostaviće se da je prije priključenja novih nelinearnih opterećenja na mrežu, pri vršnom opterećenju, ograničenje termičke opterećenosti vodova zadovoljeno, odnosno da je dozvoljeno povećanje od još 25% po svim granama do kritične vrijednosti. Posmatraće se dva slučaja, i to kada EV rade kao potrošači električne energije i kada baterije EV vraćaju energiju mreži, odnosno posmatraće se rad punionica u V2G režimu. Slučaj kada EV vraćaju energiju u mrežu karakteriše pik opterećenja, pa će se za pik opterećenja uzeti opterećenje potrošača koje je dato IEEE testnom mrežom. Za slučaj kada se baterije EV pune, uzima se situacija da su opterećenja konzuma na 70% vršnog opterećenja, a analiziraće se i priključna sposobnost pri opterećenju od 60% i 80% vršnog konzuma.

Slike 18 i 20 predstavljaju toplotne grafove centralizovane priključne sposobnosti u dva scenarija, i to prvi scenario kada EV vraćaju energiju mreži u toku vršnog opterećenja, a drugi scenario se odnosi na slučaj kada EV uzimaju energiju iz mreže pri 70% opterećenja konzuma. Posmatrajući ove slike utvrđuje se da čvor 1 u oba scenarija ima najveću priključnu sposobnost, a to je i logično, imajući u vidu da se radi o glavnom napojnom čvoru. Sa grafika se uočava i da priključna sposobnost opada kako se ide prema krajevima posmatrane mreže.

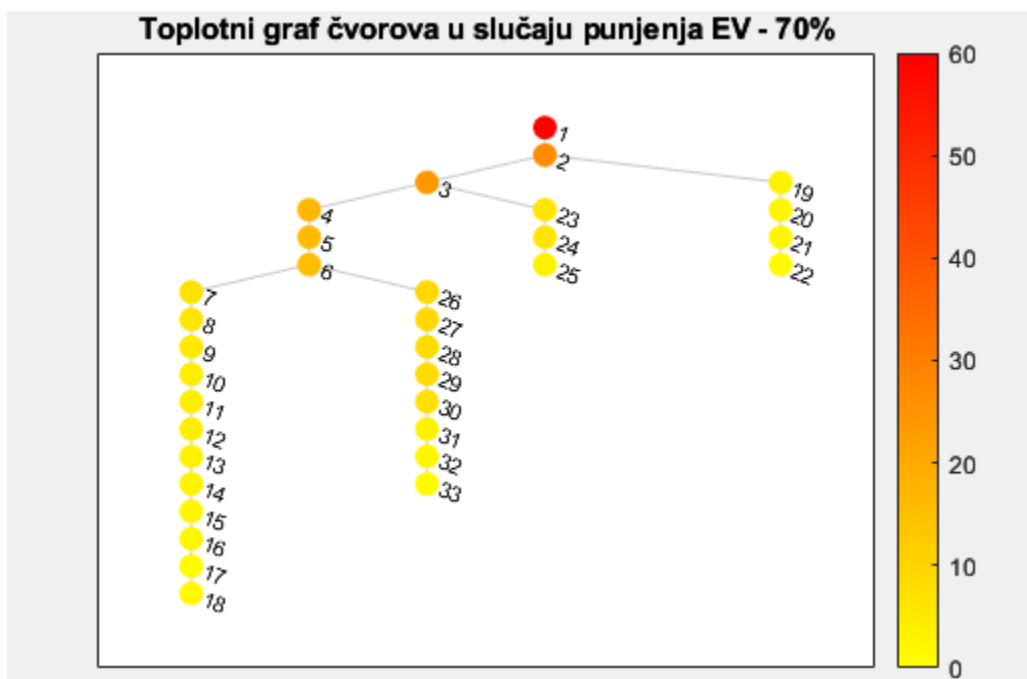


**Slika 18.** Toplotni graf centralizovane priključne sposobnosti kada EV vraću energiju mreži

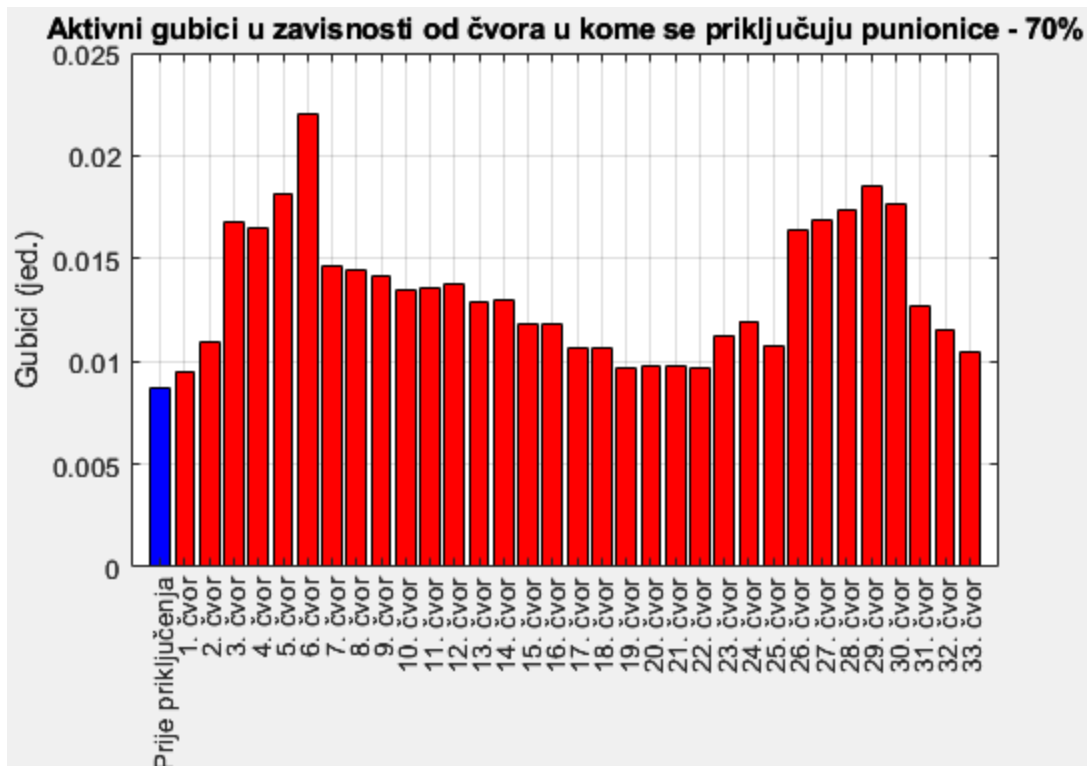
Slike 19 i 21 opisuju gubitke aktivne energije mreže za po 34 scenarija, i to se prvi grafik odnosi na slučaj kada EV vraćaju energiju mreži pri vršnom opterećenju, a drugi grafik kada EV uzimaju energiju za punjenje. Prvi bar odgovara aktivnim gubicima mreže prije priključenja punionica, a ostali barovi odgovaraju slučajevima kada se analiziraju gubici u zavisnosti od čvora u kome se priključuje maksimalna dozvoljena snaga punionica. Proračunati gubici u najvećoj mjeri zavise od priključene snage punionica, od toga da li EV uzimaju ili vraćaju energiju mreži, kao i od lokacije čvora u kome se posmatra priključenje punionica. Sa oba grafika zaključuje se da priključenje punionica u prvom čvoru, bez obzira u kom režimu rade EV, vrlo malo utiče na promjenu aktivnih gubitaka posmatrane mreže u odnosu na gubitke prije priključenja. Najmanji gubici u slučaju kada EV vraćaju energiju, odnosno maksimalni gubici u slučaju kada EV troše energiju postižu se priključenjem punionica u čvoru 6. Ovaj čvor napaja veliki broj drugih potrošača, a karakteriše ga i zavidna priključna sposobnost u odnosu na većinu drugih čvorova.



**Slika 19.** Aktivni gubici mreže kada EV vraćaju energiju mreži

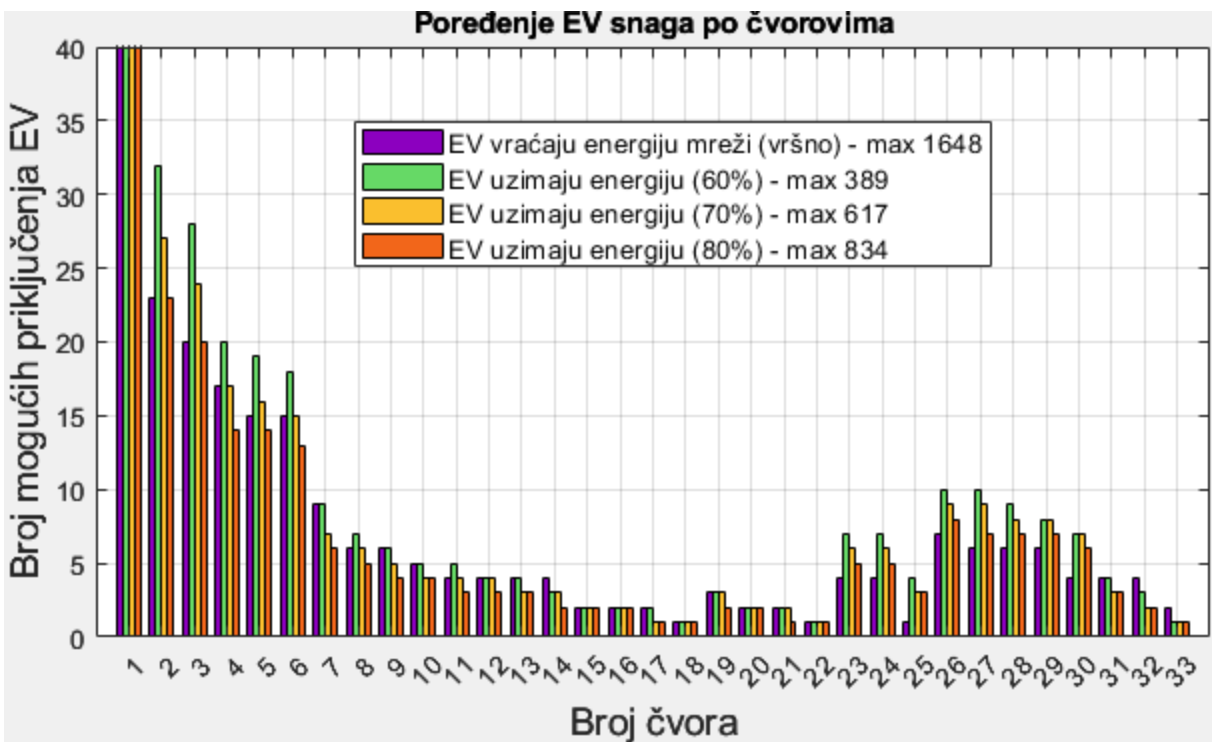


**Slika 20.** Toplotni graf centralizovane priključne sposobnosti u slučaju punjenja EV



**Slika 21.** Aktivni gubici mreže u slučaju punjenja EV

Na slici 22 predstavljena su poređenja rezultata centralizovane priključne sposobnosti u četiri slučaja, dva od četiri navedena su u prošlom pasusu, dok ostala dva odgovaraju slučajevima punjenja EV pri 60% i 80% vršnog opterećenja konzuma. Rezultati pokazuju da za većinu čvorova maksimalna priključna sposobnost postiže se u slučaju 60% opterećenja konzuma, kada EV koriste energiju iz mreže za punjenje baterija. Najmanja priključna sposobnost za najveći broj čvorova dešava se pri opterećenju od 80% vršnog opterećenja konzuma. Tabela 10 opisuje koja bi to ograničenja bila narušena ukoliko bi se u čvorovima priključila veća snaga punionica od proračunatih. U slučaju vršnog opterećenja, ograničenje koje dominantno predstavlja prepreku većoj priključenoj snazi je ograničenje individualne harmonijske distorzije struje viših učestanosti. Kada EV troše energiju, ograničenje termičke preopterećenosti vodova za najveći broj čvorova bilo bi narušeno ukoliko bi se priključila veća snaga od one koja je dobijena proračunom. Ograničenje koje u određenoj mjeri utiče na priključenu snagu punionica jeste i ograničenje varijacije napona, dok ograničenja odstupanja napona i *THDU* ne utiču na opterećenje punionica sa aspekta priključne sposobnosti.



**Slika 22.** Priključna sposobnost po čvorovima za različita opterećenja konzuma

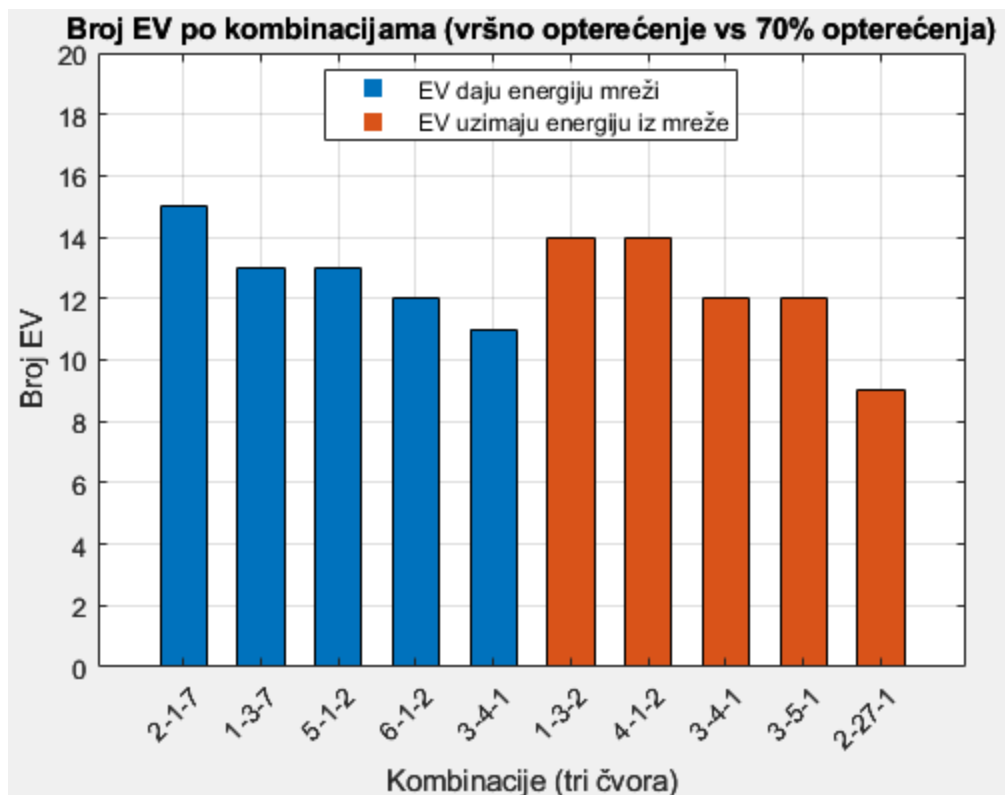
**Tabela 10.** Klasifikacija narušavanja ograničenja u zavisnosti od nivoa opterećenja konzuma

Ograničenja	Odstupanje napona	Varijacija napona	Individualna harmonijska distorzija struje	Termička preopterećenost	Totalna harmonijska distorzija napona
<b>Vršno opterećenje</b>	0	1	31	1	0
<b>60% vršnog opterećenja</b>	0	3	1	29	0
<b>70% vršnog opterećenja</b>	0	2	1	30	0
<b>80% vršnog opterećenja</b>	0	0	1	32	0

## 5.4. Rezultati decentralizovane priključne sposobnosti

Decentralizovana priključna sposobnost, kao što je već rečeno, odnosi se na veći broj čvorova, a u ovom radu razmatra se priključenje punionica u tri čvora, pri čemu se ukupno opterećenje punionica raspoređuje ravnomjerno po izabranim čvorovima. Posmatraće se ista ograničenja i ista dva slučaja kao i prilikom određivanja centralizovane priključne sposobnosti. Određivanje decentralizovane priključne sposobnosti određiće se na dva načina, kako je već objašnjeno u prošlom poglavlju.

Rezultati decentralizovane priključne sposobnosti određene primjenom Monte Carlo pristupa opisani su na narednoj slici. Analizirano je ukupno 20000 slučajno odabranih kombinacija, po 10000 za svaki scenario, a na slici 23 predstavljeni su rezultati kombinacija čvorova u kojima se može priključiti najveća snaga punionica, a da ograničenja budu zadovoljena. Nešto veće maksimalno opterećenje punionica može se priključiti u slučaju vršnog opterećenja, a primjetno je da u svakoj kombinaciji čvorova figuriše čvor 1, što je i razumno znajući da se radi o glavnom napojnom čvoru. Kombinaciji čvorova 3-4-1 u slučaju vršnog opterećenja odgovara snaga od po 9 EV po čvoru, dok u slučaju kada EV rade kao potrošači, snaga od 10 EV po čvoru. Ukoliko bi ova ili neka druga kombinacija čvorova bila od interesa, maksimalna snaga punionica koja se može priključiti ne smije biti veća od maksimalne snage koja se ima u kritičnom slučaju, odnosno za slučaj navedene kombinacije to je snaga od 9 EV po čvoru. Režim vršnog opterećenja nije neophodno posmatrati sa aspekta priključne sposobnosti jedino u slučaju raspolaganja određenim resursima upravljanja opterećenja, koji diktiraju kolika snaga baterija EV se maksimalno može dati mreži u slučaju vršnog opterećenja, a da se ne naruše ograničenja. Da bi se dobio što precizniji rezultat neophodno je razmatrati više različitih nivoa opterećenja konzuma u slučaju kada punionice uzimaju energiju, a kao mjerodavan rezultat odabrati onaj koji odgovara najkritičnijem scenariju opterećenja. Iz toga je jasno, da kombinacija čvorova sa maksimalnom priključnom snagom punionica u jednom scenariju ne mora korespondirati sa dozvoljenom snagom iste kombinacije, koja se dobija u nekom drugom scenariju.



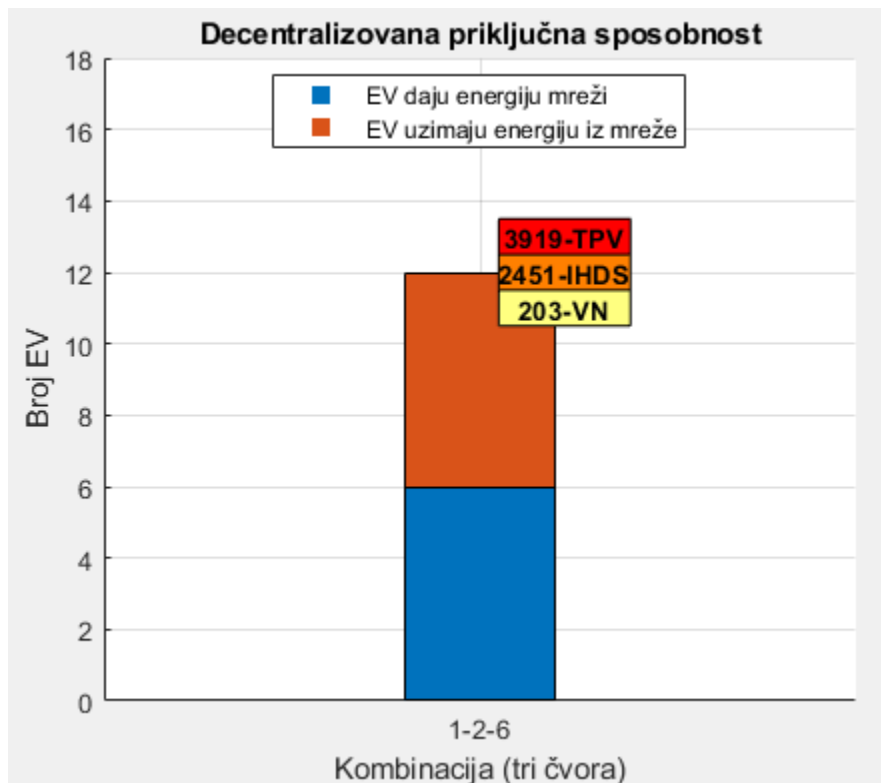
**Slika 23.** Decentralizovana priključna sposobnost određena primjenom Monte Carlo pristupa

Opis drugog pristupa za određivanje decentralizovane priključne sposobnosti predstavljen je u podpoglavlju 4.7, a usvojeno je da broj  $p$  iznosi 4000. Nakon što  $p$  dostigne vrijednost 4000, vjerovatnoća  $q$  da je nova generisana kombinacija bolja od do tada usvojene najbolje kombinacije iznosi [48]:

$$q = \frac{3}{p} 100 = \frac{3}{4000} 100 = 0,075\% \quad (35)$$

i ova relacija važi za pouzdanost rješenja od preko 95%. U ovom proračunu, posmatraju se ista dva scenarija koja su obuhvaćena Monte Carlo pristupom, sa tim da drugi pristup pri određivanju decentralizovane priključne sposobnosti istovremeno posmatra oba scenarija. Za bilo koju generisanu kombinaciju čvorova, upoređuju se rezultati priključne sposobnosti dobijeni u ova dva scenarija. Kao krajnji rezultat za posmatranu kombinaciju uzima se manja vrijednost priključne sposobnosti, kako bi sva ograničenja uvijek bila zadovoljena, bez obzira da li EV daju ili troše energiju. Na slici 24 predstavljen je rezultat koji uzima istovremeno u obzir oba posmatrana slučaja, dakle u čvorovima 1, 2, 6 može se priključiti najveća snaga punionica, a da sva ograničenja posmatrane mreže budu zadovoljena. Sa slike je jasno da je neophodno ispitati manji broj kombinacija priključenja punionica u čvorovima u odnosu na Monte Carlo pristup.

Sve to upućuje da je vrijeme proračuna manje primjenom druge metodologije, a to vrijeme, kao što je već naglašeno, zavisi od izabranog broja  $p$ , topologije mreže i od slučajnog generisanja kombinacija. Što se kombinacija sa najvećom priključnom sposobnošću prije odabere, to je i vrijeme proračuna manje. Ukoliko bi se na početku proračuna, na osnovu iskustva i analiziranih podataka mreže, pretpostavila određena kombinacija sa velikom priključnom sposobnošću sa kojom bi proračun startovao, dovelo bi do zasigurno manjeg vremena proračuna.



**Slika 24.** Decentralizovana priključna sposobnost određena komparacijom oba scenarija

Prema tabeli 11, kao i u slučaju centralizovane priključne sposobnosti, izdvajaju se ista tri ograničenja koja predstavljaju prepreku za priključenje većih snaga punionica od onih koje su dobijene proračunom. Kada EV potpomažu mrežu energijom, ograničenje koje dominantno predstavlja kritični faktor za priključenje veće snage punionica je ograničenje individualne harmonijske distorzije struje. U drugom slučaju, pri 70% vršnog opterećenja konzuma, kada EV troše energiju, glavni ograničavajući faktor za priključenje veće snage punionica predstavlja ograničenje termičke preopterećenosti vodova.

**Tabela 11.** Klasifikacija narušavanja ograničenja za dva različita pristupa računanja

Ograničenja	Odstupanje napona	Varijacija napona	Individualna harmonijska distorzija struje	Termička preopterećenost	Totalna harmonijska distorzija napona
<b>Monte Carlo pristup</b>					
<b>Vršno opterećenje</b>	0	2372	7628	0	0
<b>70% vršnog opterećenja</b>	0	384	759	8857	0
<b>Novi stohastički pristup – zajedno se analiziraju scenariji od interesa</b>					
<b>Vršno opterećenje (p=4000)</b>	0	91	2064	0	0
<b>70% vršnog opterećenja (p=4000)</b>	0	112	387	3919	0
<b>Ukupno (p=4000)</b>	0	203	2451	3919	0

## 5.5. Minimalni aktivni gubici

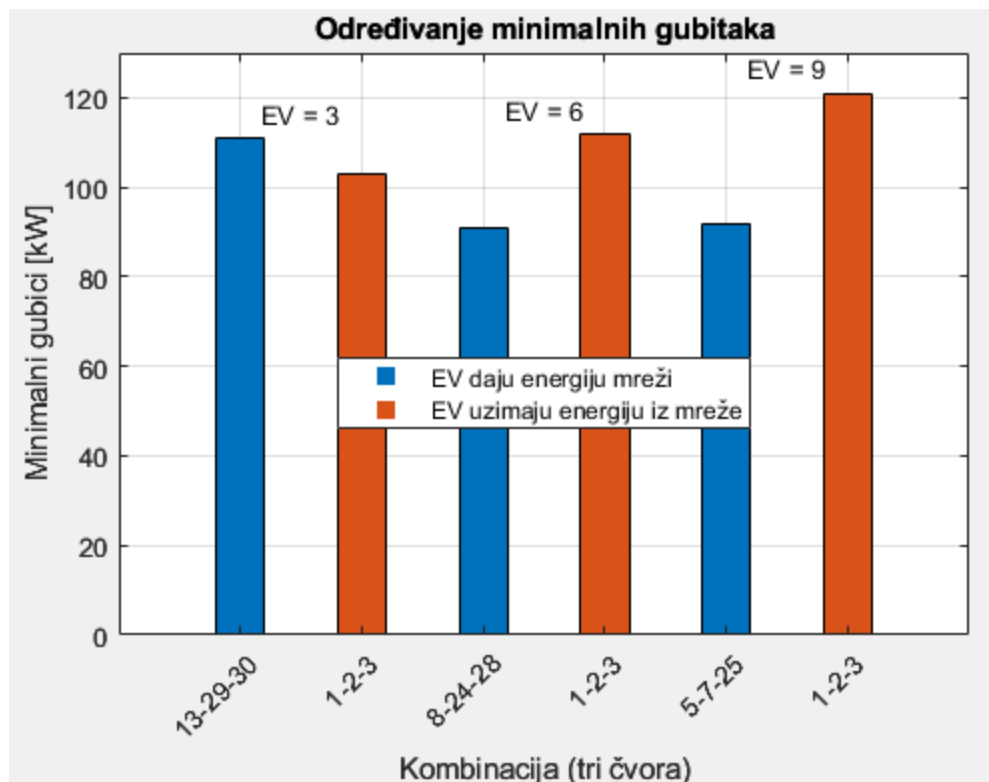
Aktivni gubici distributivne mreže, za čije pokrivanje je odgovorna nadležni operator distributivnog sistema, mogu predstavljati značajno finansijsko opterećenje ukoliko subjekti distributivne mreže nisu na adekvatnim lokacijama instalirani. Zato se teži da se ovi gubici, koliko to različiti uslovi dozvoljavaju, svedu na što je moguće manju vrijednost. Planiranje priključenja određenih potrošača, odnosno generatora električne energije, moguće je posmatrati i sa aspekta gubitaka. Rad [34] navodi da zanemarivanje harmonika pri proračunu dovodi do greške od oko 14% za analiziranu mrežu sa aspekta aktivnih gubitaka. Zato za današnje distributivne mreže, koje imaju veliki broj izvora viših učestanosti, neophodno je pri izračunavanju gubitaka sprovesti harmonijske tokove snaga. U ovom podpoglavlju biće predstavljena analiza priključenja određene snage punionica za EV tako da aktivni gubici budu minimalni.

Za proračun minimalnih gubitaka, veoma je važno poznavati uslove opterećenja pri kojima EV najviše provode vremena priključena na punjače. Brze DC punionice, koje mogu napuniti bateriju EV za 20 minuta, najveći dio radnog vremena provode u režimu punjenja EV i to u dnevnim časovima. To znači da je za ovakve punionice neophodno raspolagati informacijama, koji su to nivoi opterećenja konzuma najkritičniji sa aspekta gubitaka. Za

potrebe ovoga proračuna pretpostaviće se da EV kao potrošači najveći broj sati rade pri opterećenju od 70% vršnog konzuma.

Proračun koji obezbjeđuje kombinaciju čvorova u kojima je najbolje priključiti fiksnu snagu punionica za EV, je veoma sličan novoj metodologiji proračuna decentralizovane priključne sposobnosti. Ovaj proračun odvojeno posmatra scenarije opterećenja potrošača od interesa, a u ovoj analizi pored opterećenja pri kome EV rade kao potrošači, posmatra se i vršno opterećenje pri kome EV predstavljaju generatore električne energije. Na slici 25 predstavljeni su rezultati minimalnih gubitaka pri priključenju fiksnih snaga punionica u tri čvora za tri različita nivoa opterećenja punionica. Ista kombinacija čvorova predstavlja najbolje rješenje za sve tri snage punionica sa aspekta gubitaka, kada je sistem na nivou 70% vršnog opterećenja. Sa ove slike zaključuje se da minimalni gubici rastu kako opterećenje punionica raste u slučaju kada se EV ponašaju kao potrošači električne energiju. Tabela 12 opisuje koja su ograničenja i u kojoj mjeri narušena pri ispitivanju priključenja punionica u različitim kombinacijama čvorova sa aspekta minimalnih gubitaka.

Pri proračunu priključenja punionica najmanje snage, kada EV vraćaju energiju mreži, ograničenje koje je najviše puta pogođeno priključenjem punionica u različitim kombinacijama čvorova je ograničenje individualne harmonijske distorzije struje. Za druga dva nivoa opterećenja punionica, kao ograničenje koje je najkritičnije, izdvaja se ograničenje varijacije napona. Ograničenja odstupanja napona i *THDU* ne utiču na izbor optimalne kombinacije sa aspekta gubitaka, kada se analizira scenario vršnog opterećenja. Kada se priključuju punionice najmanjeg opterećenja, u režimu kada se EV pune, ograničenje koje je najviše puta prekoračeno je ograničenje termičke preopterećenosti vodova. Druga dva slučaja, kada se priključuju veća opterećenja punionica, karakteriše ograničenje odstupanja napona kao najosjetljivije sa aspekta prekoračenja u toku proračuna.



Slika 25. Rezultati minimalnih gubitaka određenih novim stohastičkim pristupom

Tabela 12. Klasifikacija narušavanja ograničenja za različite usvojene snage punionica

Ograničenja	Odstupanje napona	Varijacija napona	Individualna harmonijska distorzija struje	Termička preopterećenost	Totalna harmonijska distorzija napona
<b>Novi stohastički pristup – odvojeno se analiziraju scenariji od interesa</b>					
<b>p=4000, broj EV po čvoru kombinacije=3</b>					
Vršno opterećenje (Pg=111 kW)	0	1078	1593	167	0
70% vršnog opterećenja (Pg=103 kW)	602	1355	418	3802	0
<b>p=4000, broj EV po čvoru kombinacije=6</b>					
Vršno opterećenje (Pg=91 kW)	0	4794	627	284	0
70% vršnog opterećenja (Pg=112 kW)	4910	1646	82	1502	0

<b>p=4000, broj EV po čvoru kombinacije=9</b>					
<b>Vršno opterećenje (Pg=92 kW)</b>	0	4745	380	103	0
<b>70% vršnog opterećenja (Pg=121 kW)</b>	10685	992	0	1174	0

## 6. Zaključak

Jasno je da popularnost EV raste iz godine u godinu, a samim tim i potreba za instaliranjem većeg broja punionica za EV. Punionice, posebno one koje sadrže brze DC punjače, predstavljaju značajnu distribuiranu komponentu sa aspekta snage i generisanja viših harmonika u mrežu. Sve to podrazumijeva proračun kapaciteta mreže za priključenje punionica za EV, a da bi rezultat bio što približniji stvarnom rezultatu neophodno je sprovesti proračun harmonijskih tokova snaga. Metodologija koja je realizovana i sprovedena u ovom istraživanju, na sličan način može se primijeniti i za analize priključne sposobnosti koje se odnose na druge distribuirane izvore energije, ili čak na kombinacije različitih distribuiranih komponenti. Dok većina naučnih radova, koji se bave problematikom priključne sposobnosti, uzimaju u obzir svega par ograničenja, i to najčešće ograničenja odstupanja napona i termičke opterećenosti mrežnih elemenata primjenom proračuna na osnovnoj učestanosti, ovaj rad uzima u obzir veći broj ograničenja. Obzirom da se radi o približnom metodu za proračun harmonijskih tokova snaga i usljed nedostatka podataka o faznim uglovima viših harmonika, konačni rezultat je nešto konzervativniji od stvarnog. Međutim, dobija se rezultat koji sa zadovoljavajućom tačnošću može pomoći operatoru distributivne mreže da odabere odgovarajuću lokaciju i snagu za priključenje novih distribuiranih elemenata.

Glavni zaključci, koji su proizašli na osnovu analize i rezultata priključne sposobnosti punionica za EV, su:

- Jasno je da proračun tokova snaga na osnovnoj učestanosti ne može uzeti u obzir harmonijsku distorziju pri proračunu priključne sposobnosti. Jedno od ograničenja koje značajno utiče na dozvoljenu priključnu snagu za razmatranu mrežu je ograničenje individualne harmonijske distorzije struje. Prema tome, sprovođenje proračuna harmonijskih tokova snaga značajno utiče na preciznost i realnost rezultata. Dakle, posebno za mrežu koju karakteriše veliki broj generatora viših harmonika, neophodno je sprovesti harmonijsku analizu u cilju dobijanja preciznih rezultata sa aspekta priključne sposobnosti. Harmonijski proračuni utiču i na preciznije određivanje drugih veličina, koje su takođe bitne u dobijanju pouzdanih rješenja. Implementacijom Shirmohammadi proračuna u raspregnutom metodu za proračun harmonijskih tokova snaga, dobijaju se rezultati harmonijske analize koji su približni proračunu sprovedenom u programu Neplan.
- Rezultati koji su dobijeni blago su konzervativni obzirom da je posmatrano nekoliko scenarija, i da nisu uzeti u obzir fazni uglovi viših harmonika i faktor raznovrsnosti  $DF_k$ . Usljed nedostupnosti podataka za posmatranu mrežu, opterećenje konzuma za sve posmatrane slučajeve ravnomjerno je skalirano u svim čvorovima, što ne korespondira sa realnim mjerenjima. Takođe, kao što je navedeno u prošlom poglavlju, dozvoljena

su narušavanja ograničenja u 95% posmatranih scenarija, a to nije bilo moguće primijeniti u ovom radu obzirom na broj posmatranih slučajeva.

- Pri sprovođenju proračuna harmonijskih tokova snaga, neophodno je uzeti u obzir skin efekat, a ignorisanje ovog uticaja dovodi do osjetno različitih rezultata u odnosu na slučaj kada se ovaj efekat uvažava.
- Da bi se odredio koristan rezultat decentralizovane priključne sposobnosti, neophodno je pri proračunu posmatrati istovremeno sve od interesa scenarije opterećenja konzuma. Proračun priključne sposobnosti za jedan scenario ne znači ništa ukoliko nije upoređen sa svim ostalim scenarijima, jer za određenu kombinaciju čvorova dobija se različit rezultat za različite uslove opterećenja konzuma. Takav koristan rezultat obezbjeđuje novi razvijeni pristup za proračun decentralizovane priključne sposobnosti.
- Najveća mana razvijene metodologije za proračun decentralizovane priključne sposobnosti predstavlja vrijeme proračuna. Međutim, vrlo često nisu ni svi čvorovi od interesa sa aspekta maksimalne priključne sposobnosti ili minimalnih gubitaka. To znači da je moguće smanjiti broj posmatranih čvorova analizirane mreže, a to dalje vodi ka manjem vremenu proračuna i računarskom rasterećenju.

Rezultati ovoga rada, u kome je posmatrano nekoliko scenarija opterećenja konzuma, pružaju dobru osnovu za optimizaciju planiranja punionica i integraciju elektromobilnosti u distributivne mreže. Neki budući radovi, uz pomoć ovoga rada, mogu posmatrati priključnu sposobnost punionica za EV zajedno sa drugim varijabilnim proizvođačima električne energije, kao što su solarne ili vjetro elektrane, kao i priključnu sposobnost kada se analizira više punjača sa različitim karakteristikama. Takođe, u slučajevima kada je harmonijska distorzija ozbiljna prepreka za priključenje većeg opterećenja, može se istražiti uticaj instaliranja odgovarajućih filtra na priključnu sposobnost, uz korišćenje proračuna priključne sposobnosti datog ovim istraživanjem. Proračuni centralizovane i decentralizovane priključne sposobnosti, kao i proračun minimalnih gubitaka, primjenom navedenih metodologija, mogu se koristiti i pri planiranju razvoja elektrodistributivne mreže.

## Literatura

- [1] Talal Guia, Benalia M'Hamdi, Ali Khechekhouche, "Electric vehicle charging stations load impact on the distribution network", *The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC*, Vol. 10 N. 09, (2024.)
- [2] Sanip S. Yeole, Prakash G. Burade, "Metaheuristic-Based Optimization for Electric Vehicle Charging Station Deployment in the Electrical Distribution Networks", *Electrical and Electronics Engineering, SOET, Sandip University*, (2025.)
- [3] M. S. Arjun, N. Mohan, K. R. Satish, Arunkumar Patil, D. P. Somashekar, "Review on optimal planning and operation of charging stations for electric vehicles", *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, (2025.)
- [4] Arpan Koirala, Tom Van Acker, Reinhilde D'hulst, Dirk Van Hertem, "Hosting capacity of photovoltaic systems in low voltage distribution systems: A benchmark of deterministic and stochastic approaches", (2022.)
- [5] Ashish Kumar Karmaker, Krishneel Prakash, Md Nazrul Islam Siddique, Md Alamgir Hossain, Hemanshu Pota, "Electric vehicle hosting capacity analysis: Challenges and solutions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 189, (2024.)
- [6] Mohammad Zain ul Abideen, Omar Ellabban, Luluwah Al-Fagih, "A Review of the Tools and Methods for Distribution Networks' Hosting Capacity Calculation", (2020.)
- [7] A. Rajabi, S. Elphick, J. David, A. Pors, D. Robinson, "Innovative approaches for assessing and enhancing the hosting capacity of PV-rich distribution networks: An Australian perspective", (2022.)
- [8] Magdalena Bartecka, Grazia Barchi, Józef Paska, "Time-Series PV Hosting Capacity Assessment with Storage Deployment", (2020.)
- [9] Chihota MJ, Bekker B, Gaunt T, "A stochastic analytic-probabilistic approach to distributed generation hosting capacity evaluation of active feeders", *Int J Power Energy Syst* 2022;136:107598, (2022.)
- [10] Rylander M, Smith J, Sunderman W, "Streamlined method for determining distribution system hosting capacity", *IEEE Trans Ind Appl* 2015;52(1):105–11, (2015.)
- [11] Xu X, Gunda J, Dowling R, Djokic S, "A two-stage approach for renewable hosting capacity assessment", In: 2019 IEEE PES innovative smart grid technologies europe (ISGT-Europe), (2019.)

- [12] D Chathurangi, U Jayatunga, S Perera, A Agalgaonkar, “Evaluation of Maximum Solar PV Penetration: Deterministic Approach for Over Voltage Curtailments”, Electrical and Electronics Engineering, SOET, Sandip University, IEEE PES innovative smart grid technologies europe (ISGT-Europe), (2019.)
- [13] McNab S, Schipper J, Yuyin K, “Modelling the hosting capacity of orion’s low voltage network for EV charging”, In: Wellington: EEA conference 2021, (2021.)
- [14] Hossam H. H. Mousa, Karar Mahmoud, (Senior Member, IEEE), Matti Lehtonen, “A Comprehensive Review on Recent Developments of Hosting Capacity Estimation and Optimization for Active Distribution Networks”, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2024.3359431, (2021.)
- [15] Jouni Peppanen, Mobolaji Bello, Matthew Rylander, “Service Entrance Hosting Capacity”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 94304, USA, (2018.)
- [16] Naciri Soukaina, EL Moussaoui Hassan, Elmarkhi Hassane, Lamhamdi Tijani, “Hosting Capacity Estimation of Underground Distribution Feeder in Urbain Areas”, 978-1-5386-7850-3/19/\$31.00 ©2019 IEEE, (2019.)
- [17] Matthew J. Reno, Robert J. Broderick, “Statistical Analysis of Feeder and Locational PV Hosting Capacity for 216 Feeders”, Electric Power Systems Research Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, USA, (2016.)
- [18] V. Quintero-Molina, Miguel Romero-L, Andrés Pavas, “Assessment of the hosting capacity in distribution networks with different DG location”, 2017 IEEE Manchester PowerTech, (2017.)
- [19] Limuel Khin L. Estorque, Michael Angelo A. Pedrasa, “Utility-scale DG Planning using Location-specific Hosting Capacity Analysis”, Electrical and Electronics Engineering Institute University of the Philippines Diliman Quezon City, Philippines, (2016.)
- [20] Anrich Frederik Willem Steyn, “Modelling the technical influence of randomly distributed solar PV uptake on electrical distribution networks”, the degree of Master of Engineering (Electrical) in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University, (2019.)
- [21] Rosvando M. Gonzaga; Julio A. D. Massigan; João Bosco A. LondonPedrasa, “Analysis of the Hosting Capacity of a Real Distribution Feeder with Wind Generation”, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), (2019.)

- [22] D. Chaturangi, U. Jayatunga, M. Rathnayake, A. Wickramasinghe, A. Agalgaonkar, S. Perera, “Potential Power Quality Impacts on LV Distribution Networks With High Penetration Levels of Solar PV”, 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), (2018.)
- [23] Ismaël Adam Essackjee; Robert T.F. Ah King, “Maximum Rooftop Photovoltaic Hosting Capacity with Harmonics as Limiting Factor – Case Study for Mauritius”, 2019 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD), (2019.)
- [24] Marco Rossi, Giacomo Viganò, Diana Moneta, Daniele Clerici, “Stochastic evaluation of distribution network hosting capacity: Evaluation of the benefits introduced by smart grid technology”, 2017 AEIT International Annual Conference, (2017.)
- [25] Hamidreza Sadeghian, Zhifang Wang, “A Novel Impact-Assessment Framework for Distributed PV Installations in LowVoltage Secondary Networks”, *Renew. Energy* 2020, (2019.)
- [26] Al-saadi H., Al-sarawi S., Zivanovic R., Abood H.G., “Hourly-Assessment of Grid Hosting Capacity for Active Distribution Network”, In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Boise, ID, USA, 24–28 June 2018; pp. 1–7. (2018.)
- [27] Al-Saadi H., Zivanovic R., Al-Sarawi S.F., “Probabilistic Hosting Capacity for Active Distribution Networks”, *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017, 13, 2519–2532., (2017.)
- [28] Wang S., Li C., Pan Z., Wang J., “Probabilistic method for distribution network electric vehicle hosting capacity assessment based on combined cumulants and gram-charlier expansion”, *Energy Procedia* 2019, 158, 5067–5072, (2019.)
- [29] A.Semlyen, M.Shlash, “Principles of modular harmonic power flow methodology”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 147, No. 1., (2000.)
- [30] A. Ulinuha, M.A.S. Masoum, S.M. Islam, “Harmonic Power Flow Calculations for a Large Power System with Multiple Nonlinear Loads Using Decoupled Approach”, 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference , (2007.)
- [31] S. Herraiz, L. Sainz, and J. Clua, “Review of harmonic load flow formulations,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3. pp. 1079–1087, Jul. 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2003.813604., (2003.)

- [32] G. T. Heydt, A. W. Galli, "Transient Power Quality Problems Analyzed Using Wavelets", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, (1997.)
- [33] Daozhi Xia, G. T. Heydt, "HARMONIC POWER FLOW STUDIES PART I - FORMULATION AND SOLUTION", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, (1982.)
- [34] Daozhi Xia, G. T. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies - Part II Implementation and Practical Application", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, (1982.)
- [35] Lazar Šćekić, "Procjena maksimalne sposobnosti niskonaponske elektrodistributivne mreže za priključenje distribuirane proizvodnje na bazi metoda za proračun tokova snaga za neizbalansirane mreže", Magistarski rad, (2022.)
- [36] Y. Baghzouz, "Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No., (1991.)
- [37] A. Ulinuha, M.A.S. Masoum, S.M. Islam, "Harmonic Power Flow Calculations for a Large Power System with Multiple Nonlinear Loads Using Decoupled Approach", IEEE, Australasian Universities Power Engineering Conference, (2007.)
- [38] C. A. Desoer, E. S. Kuh, Basic Circuit Theory. USA: McGraw-Hill Inc., (1969)
- [39] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, G.X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", IEEE Transactions on Power Systems ( Volume: 3, Issue: 2, May 1988), (1988.)
- [40] Madhav Kumar, Kaibalya Prasad Panda, Ramasamy T. Naayagi, Ritula Thakur, Gayadhar Panda, "Comprehensive Review of Electric Vehicle Technology and Its Impacts: Detailed Investigation of Charging Infrastructure, Power Management, and Control Techniques", Applied Sciences, vol. 13, no. 15, p. 8919, (2023.)
- [41] Asaad Mohammad, Ramon Zamora, Tek Tjing Lie, "Integration of Electric Vehicles in the Distribution Network: A Review of PV Based Electric Vehicle Modelling", Energies 2020, 13, 4541, (2020.)

- [42] Wei Chen, Lei Zheng, Hengjie Li, Xiping Pei, “An Assessment Method for the Impact of Electric Vehicle Participation in V2G on the Voltage Quality of the Distribution Network”, *Energies* 2022, 15, 4170., (2022.)
- [43] Shubham Mishra, Shrey Verma, Subhankar Chowdhury, Ambar Gaur, Subhashree Mohapatra, Gaurav Dwivedi, Puneet Verma, “A Comprehensive Review on Developments in Electric Vehicle Charging Station Infrastructure and Present Scenario of India”, *Sustainability*, (2021.)
- [44] Vladimir Katić, Amir Tokić, Tatjana Konjić, “KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE”, EU TEMPUS PROJECT CD JEP-18126-2003, (2007.)
- [45] Francisc Zavoda, Rosmery Rozas Puertas, Jean-Luc Dupré, “IMPACT OF FAST CHARGING STATIONS ON GRID QUALITY”, 25th International Conference on Electricity Distribution, (2019.)
- [46] Tim Slangen, Vladimir Čuk , Sjef Cobben, “Summation of supraharmonic currents (2–150 kHz) from EV fast charging stations”, *Electric Power Systems Research*, (2023.)
- [47] Hooman E. Mazin, Edwin E. Nino, Wilsun Xu Fellow, Jing Yong, “A Study on the Harmonic Contributions of Residential Loads”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 26, NO. 3, (2011.)
- [48] Lonnie Turpin, Jeanne-Claire Patin, William Jens, Morgan Turpin, “A modified rule of three for the one-sided binomial confidence interval”, (2023.)

## Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora: Veselin Ostojić

Broj indeksa/upisa: 7/23

Studijski program: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Procjena kapaciteta elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za električna vozila primjenom proračuna harmonijskih tokova snaga

Mentor: Prof. dr Vladan Radulović

Komentor: Prof. dr Jadranka Radović

Potpisani: Veselin Ostojić

Izjavljujem da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva master nauka, odnosno zvanja master umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

Potpis magistranda

U Podgorici, 19.12.2025. godine

Besir Ostojić

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom: **Procjena kapaciteta elektrodistributivne mreže za priključenje punionica za električna vozila primjenom proračuna harmonijskih tokova snaga**

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Potpis magistranda

U Podgorici, 19.12.2025. godine

Becerrut Cvetković