



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

LAZAR VUČINIĆ

**Optimizacija tehničkih uslova za priključenje
distribuiranih izvora energije**

-MASTER RAD-

Podgorica, oktobar 2025. godine

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

LAZAR VUČINIĆ

**Optimizacija tehničkih uslova za priključenje
distribuiranih izvora energije**

-MASTER RAD-

Podgorica, oktobar 2025. godine

PODACI O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Lazar Vučinić

Datum i mjesto rođenja: 13.12.1996. godine, Podgorica

Naziv završenog studijskog programa i godina završetka studija: Energetika i automatika, Elektroenergetski sistemi, 2021. godina

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 07.03.2024. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 30.04.2024. godine

Mentor: Prof. dr Zoran Miljanić

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica, predsjednik

Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica, mentor

Doc. dr Snežana Vujošević, ETF Podgorica, član

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica, predsjednik

Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica, mentor

Doc. dr Snežana Vujošević, ETF Podgorica, član

Datum odbrane:

Izjava o autorstvu

Potpisani **Lazar Vučinić**

Broj indeksa/upisa **1018/21 EES**

Izjavljujem

da je master rad pod nazivom

"Optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije"

- 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, 06.10.2025. godine

Potpis magistranda



Predgovor

Savremeni elektroenergetski sistemi suočavaju se sa brзом tranzicijom ka sistemima koji su decentralizovani i održivi. Sve značajnije mjesto u takvim sistemima zauzimaju distribuirani izvori električne energije koji su bazirani na obnovljivim izvorima energije. Porast nivoa integracije takvih sistema predstavlja ozbiljan tehnički izazov za postojeću mrežnu infrastrukturu.

Navedena situacija zahtijeva pristup koji omogućava da se postojeća mrežna infrastruktura iskoristi na najbolji način, čime bi se smanjili investicioni troškovi i kupilo vrijeme za adekvatno planiranje budućih mreža. Jedan od takvih pristupa jeste optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije.

Njihov značaj se ogleda u načinu na koje se oni mogu optimizovati sa ciljem očuvanja stabilnosti i pouzdanosti mreže, smanjenja gubitaka, povećanja kapaciteta integracije distribuiranih izvora i povećanja kvaliteta električne energije a sve to uz usklađenost sa međunarodnim standardima i nacionalnim propisima.

Analiziranjem postojećih tehničkih preporuka, međunarodnih standarda i nacionalnih propisa, uočava se značajan prostor za unaprjeđenje koje treba da prati potrebe potrošača i radi u cilju poboljšanja uslova cjelokupnog sistema.

Poseban značaj u savremenim elektroenergetskim sistemima ima i napredna mjerna infrastruktura koja prikupljanjem podataka pruža osnovu za precizno modelovanje rada mreže i mogućnost izvođenja simulacija za željene situacije. Podaci se prikupljaju automatski, u tačno definisanom vremenu intervalu i pružaju uvid u potrošnju, stanje napona, aktivnu/reaktivnu snagu i druge parametre na nivou krajnjeg korisnika distributivnog sistema. Upravo su ti podaci, prikupljeni pomoću napredne mjerne infrastrukture, zajedno sa podacima o fizičkim karakteristikama mreže, osnova za analize sprovedene u ovom radu.

Nakon obavljenih analiza, predstavljeni su rezultati i preložena rješenja za uočene probleme čiji je cilj lakše, brže i tehnički pogodnije priključenje distribuiranih izvora električne energije na mrežu.

Preložena rješenja, osim pojednostavljivanja postupka, optimizacijom tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije, koji su bazirani na obnovljivim izvorima energije, dovode do smanjenja troškova, povećanja efikasnosti sistema i maksimizovanju stepena iskorišćenja postojeće infrastrukture uz sve benefite koje pruža.

Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Zoranu Miljaniću na korisnim sugestijama tokom izrade ovog magistarskog rada.

Izvod rada

Ekspanzija distribuirane proizvodnje električne energije je ključna za povećanje energetske efikasnosti i dekarbonizaciju energetskog sektora. Integracija distribuiranih izvora predstavlja izazov za postojeće mreže koje nijesu prvobitno projektovane za dinamične uslove priključenja i dvosmjerne tokove energije prostorno raširenih malih proizvođača. Jedan od načina kojima se može dati doprinos savladavanju uočenih izazova jeste optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije.

Optimizacijom tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije povećava se stepen iskorišćenja postojeće infrastrukture što omogućava veću efikasnost sistema uz poboljšanje pogonskih karakteristika mreže. To dovodi do mogućnosti veće integracije obnovljivih izvora energije čime bi se smanjili troškovi kako za mrežne operatore tako i za korisnike.

Predmet istraživanja ovog rada jeste određivanje uticaja tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije na pogonske parametre mreže, kao i optimizacija tih uslova, uzimajući u obzir tehničko-regulatorne okvire, koristeći realne sistemске podatke iz crnogorskog elektrodistributivnog sistema, sa ciljem postizanja efikasnijeg i sigurnijeg rada sistema.

Rezultat istraživanja pokazuje kako se optimalnim odabirom parametara postiže optimizovano stanje mreže pri priključenju distribuiranih izvora električne energije uz poštovanje tehničkih ograničenja postojeće mrežne infrastrukture. Dobijeni rezultati pružaju mogućnost boljeg usklađivanja lokalne proizvodnje i potrošnje i pružaju mogućnost preciznijeg projektovanja kapaciteta mreže uz povećanje njene fleksibilnosti i smanjenje investicionih troškova.

Podaci koji se koriste u ovom radu su realni podaci izvoda seoske i gradske mreže crnogorskog elektrodistributivnog sistema, posmatrani za tačno definisan vremenski trenutak van ekstremnih vremenskih uslova, u normalnom režimu rada. Dobijeni rezultati istraživanja su prikazani tabelarno i grafički jasno prikazujući razlike između karakterističnih slučajeva analize seoske i gradske mreže. Zaključno poglavlje pruža uvid u doprinose i ograničenja sprovedenih istraživanja uz prijedlog o budućim pravcima istog.

Ključne riječi: optimizacija, tehnički uslovi, ograničenja, planiranje, distribuirani izvori

Abstract

The expansion of distributed electricity generation is key to increasing energy efficiency and decarbonizing the energy sector. The integration of distributed sources is a challenge for existing networks that were not originally designed for dynamic connection conditions and two-way energy flows of spatially spread small producers. One of the ways to contribute to overcoming the perceived challenges is the optimization of technical conditions for connecting distributed sources of electricity.

By optimizing the technical conditions for the connection of distributed sources of electricity, the degree of utilization of the existing infrastructure increases, which enables greater efficiency of the system while improving the operating characteristics of the network. This leads to the possibility of greater integration of renewable energy sources, which would reduce costs for both network operators and users.

The subject of this research is the determination of the influence of technical conditions for the connection of distributed sources of electricity on the operating parameters of the network, as well as the optimization of those conditions, taking into account technical and regulatory frameworks, using real system data from the Montenegrin electricity distribution system, with the aim of achieving more efficient and safer operation of the system.

The result of the research shows how the optimal selection of parameters achieves an optimized state of the network when connecting distributed sources of electricity while respecting the technical limitations of the existing network infrastructure. The obtained results provide the possibility of better coordination of local production and consumption and provide the possibility of more precise design of network capacity while increasing its flexibility and reducing investment costs.

The data used in this work are real data from the rural and urban network of the Montenegrin electrical distribution system, observed for a precisely defined moment in time outside of extreme weather conditions, in normal operating mode. The obtained results of the research are presented tabularly and graphically, clearly showing the differences between the characteristic cases of rural and urban network analysis. The concluding chapter provides an insight into the contributions and limitations of the conducted research with a proposal on its future directions.

Keywords: optimization, technical conditions, limitations, planning, distributed sources

Sadržaj

1. Uvod	10
2. Tehnički uslovi za priključenje distribuiranih izvora električne energije	12
2.1. Značaj tehničkih uslova za priključenje	12
2.2. Osvrt na tehničke uslove u Crnoj Gori i svijetu	14
2.3. Mogućnosti i izazovi optimizacije tehničkih uslova za priključenje	18
3. Prikupljanje podataka pomoću napredne mjerne infrastrukture	21
3.1. Napredne elektroenergetske mreže i napredna mjerna infrastruktura	21
3.2. Prednosti i mane napredne mjerne infrastrukture	24
3.3. Pametna brojila	25
3.4. Poteškoće pri implementaciji napredne mjerne infrastrukture	28
4. Strategija i mogućnosti optimizacije tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije	31
4.1. Značaj optimizacije tehničkih uslova za priključenje	31
4.2. Prihvatna sposobnost mreže za distribuiranu proizvodnju	32
4.3. Proračun tokova snaga	35
4.3.1. Determinističke metode proračuna tokova snaga	36
4.3.2. Probabilističke metode proračuna tokova snaga	36
4.4. Proračun tokova snaga u distributivnim mrežama	37
4.4.1. Newton – Raphson	37
4.4.2. Gauss-Seidell	39
4.4.3. Shirmohammadijev metod	39
4.4.4. DistFlow metod	40
5. Primjer implementacije PSS SINCAL u cilju optimizacije tehničkih uslova za priključenje	41
5.1. Seoska mreža	43
5.2. Gradska mreža	57
6. Zaključak	72
Literatura	74

Skraćenice

EES - Elektroenergetski sistem

EDS - Elektrodistributivni sistem

DIE - Distribuirani izvor energije

ANSI - American National Standards Institute

SVC - Static VAR Compensator

STATCOM - Static Synchronous Compensator

ISO - International Organization for Standardization

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

DC - Direct Current

AC - Alternating Current

DG - Distributed Generation

UPS - Uninterruptible Power Supply

EUEM - End User Energy Management

AMI - Advanced Metering Infrastructure

HC - Hosting Capacity

FDLF - Fast Decoupled Load Flow

PV - Photo Voltaic

ODS - Operator Distributivnog Sistema

MDSM - Meter Data Management System

1. Uvod

Usljed rasta stanovništva, urbanizacije i društveno-ekonomskog razvoja, globalna potražnja za energijom doživljava brzi rast. Nasuprot rastu potražnje za energijom, konvencionalne rezerve fosilnih goriva doživljavaju trend iscrpljivanja. Cijene energije često variraju i predstavljaju izazove za mase, a to uključuje i energetske bezbjednosne rizike povezane sa snabdijevanjem iz geopolitički nestabilnih zemalja i regiona. Klimatske promjene su još jedan veliki izazov koji je povezan sa energetske pejzažom budući da se korišćenje fosilnih goriva smatra glavnim izvorom emisije gasova staklene bašte [1].

Ono čemu razvijena društva 21. vijeka teže jeste energetska efikasnost, povoljni tehnološki rezultati i pojednostavljivanje procedura kojima bi se sve to postiglo. Svakim novim priključenjem na mrežu, javljaju se negativni uticaji na pogonske parametre sistema koji se umanjuju optimizacijom tehničkih uslova za priključenje. Distribuirani izvori električne energije doprinose decentralizaciji energetskih sistema, poboljšavaju kvalitet snabdijevanja i sve to uz smanjeni štetni uticaj na okolinu igrajući ključnu ulogu kao održivijim i efikasnijim elektroenergetskim sistemima. Njihovim priključenjem na distributivnu mrežu, blizu potrošača, smanjuju se gubici u prenosnom sistemu čime se poboljšava ekonomski rezultat. Pored decentralizacije, priključenjem distribuiranih izvora, koji su zasnovani na obnovljivim izvorima energije, na mrežu, doprinosi se dekarbonizaciji sistema. Elektroenergetski sistem se transformiše u cjelinu koja se sve manje oslanja na načine proizvodnje električne energije koji podrazumijevaju korišćenje uglja i ostalih fosilnih goriva a sve više na korišćenje vjetra i sunca. Distribuirani izvori energije su dio koji bilježi najbrži rast primjene i predstavlja najveći dio uticaja na prethodno navedene informacije [2].

U ovom radu prikazuje se korišćenje raznih metoda i softverskih alata u cilju optimizacije tehničkih uslova za priključenje na mrežu. Sve to doprinosi bolje organizovanom energetske sistemu na svim nivoima, od proceduralnih do tehničkih aspekata, kao i energetske efikasnosti koja je jedan od prioriteta današnjice. Kada je Crna Gora u pitanju, tehničke uslove za priključenje određuje Crnogorski elektrodistributivni sistem u skladu sa propisima koje donosi nadležno ministarstvo i Regulatorna agencija za energetiku a sve to poštujući zakon o energetici Crne Gore. Cilj izdavanja tih uslova jeste pravilno priključenje na distributivnu mrežu, što se ogleda u bezbjednosti, zaštiti uređaja i opreme, standardizaciji procesa kao i generalnoj efikasnosti rada mreže.

Motiv ovog istraživanja je poboljšanje tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije kako bi se postigla efikasnija eksploatacija elektrodistributivne mreže i kako bi planiranje iste bilo jednostavnije i preciznije čime bi se omogućila optimalna ekspanzija distribuiranih izvora baziranih na obnovljivim izvorima energije. Glavni nedostatak postojećih tehničkih uslova za priključenje u crnogorskom elektrodistributivnom sistemu je u tome što uskom selekcijom parametara koji se kontrolišu izostaje šira slika potencijalnih problema. Danas, napretkom tehnologije, razvijanjem i širokom implementacijom sistema pametnih mreža, moguće je mjerenje u realnom vremenu svih parametara od značaja i daljnje reagovanje u slučaju pojave određenih poremećaja.

Pomoću svega gore navedenog, što se posebno odnosi na naprednu mjernu infrastrukturu, danas postoji mogućnost da se vrlo precizno odrede uslovi kojima će se maksimizovati instalisane snage svih generatora koji se priključuju. Rezultati istraživanja, koja su u ovom radu sprovedena na osnovu velikog broja podataka i ogleda iz različitih naučnih izvora i sprovedenih

analiza, ukazuju na načine kojima se mogu poboljšati tehnički uslovi za priključenje distribuiranih izvora električne energije zarad cjelokupnog unaprjeđenja sistema. To podrazumijeva traženje svih uticaja pri priključenju distribuiranih izvora energije na parametre pogonskih elemenata i iznalaženje najboljeg rješenja u smislu ublažavanja poremećaja parametara pri istom.

U drugom poglavlju predstavljen je značaj tehničkih uslova za priključenje, kako u crnogorskom elektrodistributivnom sistemu tako i u sistemima širom svijeta, njihova struktura i način na koji se njima može upravljati.

Treće poglavlje će približiti koncept pametne mreže i napredne mjerne infrastrukture, način na koji funkcionišu kao i njihovu primjenu u današnjim distributivnim mrežama.

Četvrto poglavlje obuhvata metode i softverske alate koji se koriste za proračun pogonskih parametara u cilju optimizacije tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije.

U petom poglavlju se prikazuje implementacija PSS SINICAL, gdje se obrađuju razne situacije priključenja DIE na mrežu, prateći i analizirajući sve parametre sistema. U zaključku su prikazani rezultati istraživačkog rada i njihova analiza, uz prijedlog o mogućim budućim istraživanjima.

2. Tehnički uslovi za priključenje distribuiranih izvora električne energije

Napon i učestanost su dva najznačajnija aspekta pogona elektroenergetske mreže koji zauzimaju važno mjesto u eksploataciji elektroenergetskih sistema (EES). Učestanost je globalni pokazatelj čija je vrijednost konstantna u svim djelovima sistema čiji su generatori u sinhronizmu. Stoga se njena regulacija može ostvariti uspostavljanjem globalne ravnoteže između proizvedene i utrošene aktivne energije na nivou sistema. Sa druge strane, napon je lokalna karakteristika mreže. U svakom EES postoji više naponskih mreža različite vrijednosti nominalnog napona, povezanih posredstvom energetskih transformatora, ali osim toga i u okviru mreža istog naponskog nivoa mogu da postoje izvjesne razlike u vrijednosti napona. Razlog tome su padovi napona koji se javljaju usljed tokova aktivnih i reaktivnih snaga kroz induktivne i kapacitivne elemente mreže. Diversifikacija i koordinisano djelovanje naponsko reaktivnih regulacionih sredstava omogućava da se kompenzacijom padova napona, naponi u pojedinim tačkama elektroenergetskog sistema održavaju u zadatim granicama.

2.1. Značaj tehničkih uslova za priključenje

Usljed sve veće potrebe za kvalitetnim napajanjem, zaštitom životne sredine i rastuće nestabilnosti cijene električne energije na svjetskom tržištu proteklih godina, distribuirani izvori energije se nameću kao jedno od rješenja gore navedenih problema. Pored toga, problemi vezani za nedostatke tehničkih uslova za priključenje, kako u Evropi tako i u Americi, se rješavaju integracijom novih tehnologija (to podrazumijeva korišćenje modernih softvera za modelovanje mreže i simulacije), pojednostavljivanjem procedure za priključenje, adekvatnom selekcijom parametara koji se kontrolišu a čiji broj se povećava porastom broja priključenih potrošača/proizvođača i kvalitetnim održavanjem i unaprjeđivanjem postojeće mrežne infrastrukture.

Akcent se posebno stavlja na kvalitet električne energije koji je krucijalan aspekt za namjensko funkcionisanje svih potrošača i proizvođača koji su dio jednog elektroenergetskog sistema.

Kvalitet električne energije se definiše kao sposobnost električnog sistema da održava sinusoidne talasne oblike napona i struja na nominalnoj veličini i frekvenciji u sistemu. Marginalni ili loš kvalitet električne energije doprinosi brojnim negativnim efektima kako na rad opreme prenosnog tako i distributivnog sistema, a posebno utiče na potrošačke uređaje. Električni poremećaji uključuju oscilacije, varijacije napona, treperenje, harmonike, brze smetnje (prelazne pojave), padove napona izazvane greškom i faznu neravnotežu. Mnogi poremećaji kvaliteta električne energije su lokalizovani, posebno harmonici napona i struje i određeni parametri definisani ANSI (American National Standards Institute) rejtingom koji određuje odstupanje vrijednosti nekog parametra bez izazivanja problema u sistemu. Manji broj problema sa kvalitetom električne energije je vidljiv u cijelom sistemu kao što su varijabilnost frekvencije, određeni harmonici i povremeno visoki, niski ili neuravnoteženi naponski nivoi [3].

Problemi porasta napona smatraju se najznačajnijim faktorom za visoku penetraciju distribuiranih generatora. Vjeruje se da su tehnike kontrole reaktivne snage najefikasnije metode za ublažavanje prenapona kod operatora distributivnog sistema i krajnjih korisnika. Mogu se koristiti različite tehnike kontrole snage, kao što su šant i serija kondenzatora, SVC,

STATCOM i distribuirani generatori kontrolisani pametnim invertorima [4]. Brojni su indikatori kvaliteta električne energije. U tabeli 1 su prikazani neki od njih [51].

Tabela 1. Neki indikatori kvaliteta električne energije

Indikator	Definicija	Glavna primjena
Ukupna harmonijska distorzija (THDU, THDI)	$\sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_1^2}}, \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}}$	Opisivanje nivoa viših harmonika, standardi
Individualna harmonijska distorzija (HD Uh, HD Ih)	$\frac{U_h}{U_1}, \frac{I_h}{I_1}$	Opisivanje nivoa viših harmonika, standardi
Faktor snage (PF, λ)	$P_{tot}/ U_{eff} \cdot I_{eff} $	Naplata reaktivne i harmonijske snage (mogućnost)
Fliker faktor	$\Delta U/ U $	Opis uticaja nelinearnih potrošača preko neregularnog rada sijalica
Faktor varijacije napona (efekt. vrijednost i trajanje)	$U_{eff}/U_{nom} \cdot 100 [\%]$ Δt	Varijacije napona, propadi ili skokovi napona, podnaponi, prenaponi, beznaponske pauze
Faktor nesimetrije	$ U_- / U_+ $	Nesimetrija trofaznih mreža
Krest faktor	U_{peak}/U_{eff}	Vijek trajanja dielektrika

Pravo pitanje sa kojim se svijet suočava jeste da li se može održati i unaprijediti pouzdanost električnih mreža bez izgradnje velikog broja novih dalekovoda i elektrana. Jedina realna alternativa za tako masivne građevinske projekte je da se sistem proizvodnje električne energije proširi, zajedno sa ulaganjem značajnih napora u ostvarivanju što veće energetske efikasnosti. Tržišta električne energije će morati da dožive ekspanziju i da postanu otvorena za prilagođavanje novonastalim situacijama i izazovima koji je čekaju. Sve to, naravno, podrazumijeva nove tehničke standarde sa jasno definisanim tehničkim uslovima za priključenje i neke nove forme regulacije [5].

Energetski sistemi današnjice prolaze kroz suštinske promjene usled decentralizacije i smanjenja sirovinskih zaliha tradicionalnih izvora električne energije kao i zbog zabrinutosti povezane sa klimatskim promjenama. Od početka 21. vijeka, razvijanjem informaciono-komunikacione tehnologije prepoznala se šansa za modernizacijom postojećih energetskih mreža što se podudaralo sa razmišljanjem da se dekarbonizacija određenog nivoa može postići uz adekvatan monitoring i kontrolu.

Svi prethodno navedeni razlozi otvorili su put ka razvijanju i implementaciji obnovljivih izvora energije. Koliko je taj put otvoren, govori primjetan porast integracije distribuiranih izvora električne energije na distributivnom nivou.

Da bi se na neki način suprotstavili uticaju priključenja distribuiranih izvora električne energije na pouzdanost i stabilnost energetskih sistema, vrše se izmjene tehničkih uslova za priključenje i pravila za funkcionisanje kako distributivnog tako i prenosnog sistema.

Tehnički uslovi za priključenje postoje već duže vrijeme i prvobitno su svoju ulogu ostvarili u prenosim sistemima električne energije kao set tehničkih i operativnih specifikacija sa kojima su se proizvođači morali uskladiti. Razlike u tehničkim uslovima za priključenje su bile uslovljene zakonima država u kojima su postojali i karakteristikama energetskih sistema.

Početak njihove primjene u distributivnim sistemima poslužio je operatorima distributivnih sistema za planiranje i dalje razvijanje postojećih sistema uzimajući u obzir krajnjeg korisnika.

U današnje vrijeme, kad se proizvodnja električne energije odvija i na naponskom nivou distribucije, opterećenje je postalo aktivno a sistemi energetske i informacione bidirekionalni. To je stvorilo dosta problema sistemima koji su građeni i planirani za neko prošlo vrijeme u okviru klasičnog shvatanja energetske sistema koje je danas prevaziđeno. Nekada, početkom primjene distribuiranih izvora električne energije, nijesu se vršile opsežne provjere i proračuni zato što je ukupan broj integrisanih sistema bio mali, tj. u tolikoj mjeri da ne može izazvati promjene koje su zahtijevale naročitu pažnju i obazrivost. Danas, kada je broj integrisanih sistema distribuiranih izvora električne energije porastao do te mjere da polako preuzima primat u odnosu na tradicionalne sisteme, javlja se potreba za revizijom postojećih i usvajanjem novih pravila za funkcionisanje distributivnih sistema i tehničkih uslova za priključenje istih u cilju stabilnosti i pouzdanosti rada kako postojećih tako i budućih sistema.

Tehničke uslove za priključenje na niskonaponsku mrežu izdaje operator distributivnog sistema kroz nediskriminatorni pristup na osnovu kojih se izdaje saglasnost za priključenje. Svrha izdavanja tehničkih uslova za priključenje, od kojih se kao najkritičniji izdvajaju trajna maksimalno dozvoljena struja i vrijednost napona u tački priključenja, jeste pronalaženje najboljeg tehno-ekonomskog rješenja u postojećoj ili planiranoj infrastrukturi. Ono što sprječava punu primjenu postojećih tehničkih uslova za priključenje jeste nedovoljna automatizacija mreže, ograničeni kapaciteti sa često jednosmjernim mjerenjem protoka električne energije, nedostatak kontrole i fleksibilnosti samog sistema, međusobna neusklađenost tehničkih i pravnih standarda i regulative, nedovoljna implementacija napredne mjerne infrastrukture kao dijela naprednih elektroenergetskih sistema kao i ograničenja u ekonomskom smislu.

Usljed pojave i implementacije pametnih mreža, jedna od najbitnijih stvari za razvoj elektrodistributivnih mreža jeste proračun tokova snaga kako bi se zadovoljilo sigurno, pouzdano i kvalitetno napajanje električnom energijom svih potrošača [6].

2.2. Osvrt na tehničke uslove u Crnoj Gori i svijetu

Glavna razlika između tehničkih uslova u Crnoj Gori i npr. Evropskoj uniji je u tome što je u Crnoj Gori priključenje na elektro mrežu regulisano Tehničkom preporukom za priključenje, Pravilima za funkcionisanje distributivnog sistema električne energije i odredbama Regulatorne agencije za energetiku kroz zakon o energetici koji uslovljava i njeno poslovanje, dok je u EU regulativa određena različitim direktivama koje izdaje Evropska komisija kroz razne energetske pakete koji promovišu fer konkurenciju. Kada su u pitanju standardi koji se koriste, Evropska unija koristi EN standarde usklađene sa međunarodnim ISO i IEC standardima dok Crna Gora koristi određene međunarodne standarde, u većini slučajeva, dok u nekim specifičnim slučajevima mogu postojati posebne nacionalne odredbe.

Razlozi zbog kojih se u nekim slučajevima koriste nacionalne odredbe a ne međunarodni standardi najčešće su pitanje nerazvijenosti samog sistema i tehničke mogućnosti implementacije istih kao i političke volje za usklađivanjem sa standardima i principima EU.

Normirane granične vrijednosti analizirane su prema njemačkom VDE-AR-N 4105, američkom IEEE 1547 standardu za priključenje distribuiranih generatora, ali i evropskom standardu o kvalitetu električne energije EN 50160 [7].

U svijetu, pored prethodno navedenih standarda, široko su rasprostranjeni još i američki standard ANSI C84.1, australijski i kanadski standard (CSO). Prethodno navedeni standardi se

razlikuju u graničnim vrijednostima nominalnog napona i to za američki standard iznosi $\pm 5\%$ U_n , za australijski $-6/+10\%$ U_n i za kanadski $\pm 6\%$ U_n [8]. U tabeli 2 prikazane su granice parametara NN mreže po EN 50160 [51].

Tabela 2. Pogonski parametri NN mreže po EN 50160

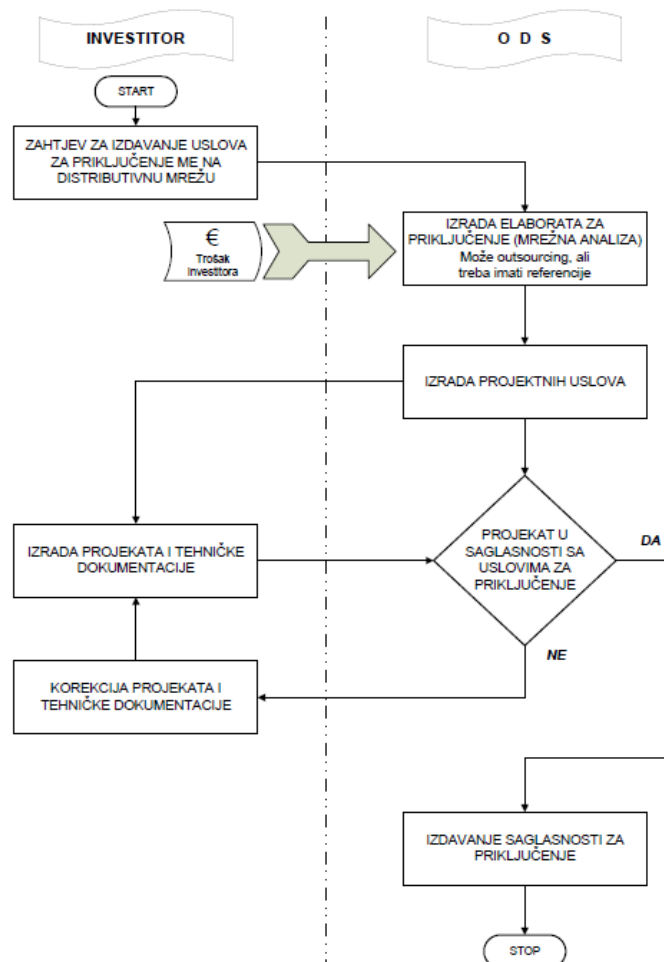
Karakteristika	Granične vrijednosti	Interval mjerenja	Period posmatranja	Procentat prihvatanja
Frekvencija	49,5Hz – 50,5Hz	10s	7 dana	95%
	47Hz – 52Hz			100%
Napon	230V \pm 10%	10min	7 dana	95%
Propadi napona (≤ 1 min)	10-1000 puta god. <85% U_n	10ms	1 godina	100%
Kratki prekidi (≤ 3 min)	10-100 puta god. <1% U_n	10ms	1 godina	100%
Prekidi (> 3 min)	10-50 puta god. <1% U_n	10ms	1 godina	100%
Povremeni prenaponi	$U < 1,5kV$	10ms	/	100%
Tranzijenti prenaponi	$U < 6kV$	/	/	100%
Nesimetrija	2% povremeno 3%	10min	7 dana	95%
Viši harmonici	THD < 8%	10min	7 dana	95%

Kolone prethodno navedene tabele se odnose na granične vrijednosti (dozvoljeni opseg parametara), interval mjerenja (koliko često se uzima uzorak), period posmatranja (vrijeme za koje se vrši analiza) i procenat prihvatanja koji pokazuje koliko često neki parametar smije biti van granica.

Prema izvještaju Evropske unije o napretku Crne Gore kada je u pitanju energetski sektor, na kraju 2023. godine saopšteno je da je Crna Gora implementirala 83% regulativa i standarda EU kada je u pitanju tržište električne energije. Kada je u pitanju dekarbonizacija energetskog sektora Crne Gore, to je problem koji se aktivno obrađuje tako što se insistira na povećanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora imajući u vidu povećanje sigurnosti napajanja električnom energijom i uticaj na životnu sredinu.

Generalna procedura za priključenje je slična i ona se sastoji od podnošenja zahtjeva, izrade projekta, izvršenja radova i tehničkog pregleda. Ono što se razlikuje sadržano je u svim koracima ove procedure pojedinačno. Potrebno je obratiti pažnju na kvalitet električne energije, na bezbjednost samog priključka i na mjerno mjesto u cjelini. Prije samog potpisivanja ugovora o priključenju (naziv dokumenta se razlikuje u zavisnosti od države koja se posmatra), a u slučaju izgradnje novog ili rekonstrukcije postojećeg objekta, potrebno je predati zahtjev za izdavanje neke vrste tehničkih uslova za priključenje u vidu dokumenta koji odgovara traženom zahtjevu. Zahtjev za izdavanje mišljenja na projekat (vrsta tehničkih uslova), prema važećem zakonu, predaje lokalna samouprava u ime investitora sa pratećom dokumentacijom i ovo mišljenje na neki način predstavlja idejno rješenje priključenja predmetnog objekta koje je podložno izmjenama kroz ugovor o priključenju (trenutno aktuelni dokument je Ugovor o izgradnji infrastrukture za priključenje i priključenju), koji je i zakonski obavezujući. Mišljenje na projekat sadrži informacije o mjestu priključenja, trafo reonu, jednovremenoj snazi objekta za koji se traži mišljenje kao i osnovne podatke o planiranoj lokaciji izgradnje budućeg objekta ili

rekonstrukcije postojećeg i podatke o investitoru. Dokumentacija koja je potrebna za izdavanje mišljenja na projekat zavisi od složenosti i tipa objekta. Nakon dobijanja pozitivnog mišljenja na projekat od strane operatora distributivnog sistema, investitor se nakon završetka radova javlja zahtjevom za potpisivanje ugovora o priključenju na distributivni sistem a zatim i ugovora o snabdijevanju kod izabranog snabdjevača električnom energijom. Na slici 3 je prikazan redosljed postupaka do izdavanja saglasnosti za priključenje male elektrane na EDS [52].



Slika 3. Redosljed postupaka do izdavanja saglasnosti za priključenje ME na EDS

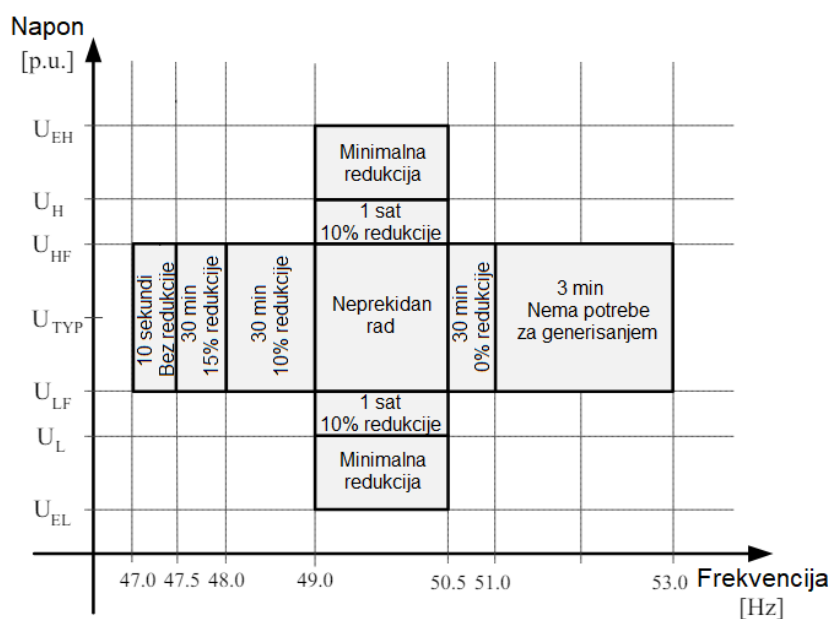
Glavni nedostatak postojećih tehničkih uslova za priključenje u crnogorskom elektrodistributivnom sistemu jeste što uskom selekcijom parametara koji se kontrolišu izostaje šira slika potencijalnih problema. Rješenje tih problema ukazalo bi se kroz proširenje broja parametara koji se kontrolišu, po uzoru na države članice Evropske Unije.

Postojeća mjerenja opterećenja pojedinih elemenata crnogorskog elektrodistributivnog sistema, usljed nedovoljno tehnološki razvijene infrastrukture, ne prikazuju pravo stanje zbog nedostatka informacije o trajanju i učestalosti maksimalnih opterećenja istih. Osim toga što mjerenja znaju biti nepotpuna, vrlo često su nedovoljno precizna i periodično neadekvatna a to za sobom povlači nepouzdana planiranja što umnogome utiče na razvoj elektroenergetskog sistema u cjelini. Nedostatak adekvatnih mjerenja je i usporio napredak u ovoj oblasti zato što nije bilo moguće adekvatno optimizovati tehničke uslove za priključenje na osnovu nepotpunih podataka i podataka upitne tačnosti da bi se ostvarila planirana optimizacija u punom opsegu.

Pod optimizacijom se misli na optimizaciju pogonskih parametara koji se moraju pažljivo analizirati, kao što su: odstupanje napona i frekvencije, talasni oblik i nesimetrija napona,

uzemljenje i izolacija, parametri kratkog spoja, faktor snage i dr. Sve te uslove jedan potrošač/proizvođač mora da zadovolji da bi se priključio na mrežu [9, 10, 11, 12].

Tehnički uslovi za priključenje na distributivni sistem električne energije razlikuju se po broju i vrsti parametara koje obuhvataju u zavisnosti od regiona u kojem se posmatraju. Kao primjer tolerancije određenih odstupanja gore navedenih parametara mogu se navesti primjeri iz država EU koje tolerišu frekvenciju od 47Hz do 53Hz i napon od $0.9U_n$ do $1.1U_n$ (U_n je nominalni napon mreže). Analiza poremećaja pri priključenju distribuiranih izvora na mrežu dovela je do promjene u provjeri tehničkih uslova. Provjera se vrši u ustaljenom režimu i u režimu poremećaja. U ustaljenom stanju se provjerava opseg napona i frekvencije kao i aktivna i reaktivna snaga. U režimu poremećaja se posmatra reagovanje mreže, mogućnost reagovanja i oscilacije [13, 14]. Na slici 4 su prikazani uslovi rada i opseg napon-frekvencija [13].



Slika 4. Uslovi rada i opseg napon-frekvencija

Kada je u pitanju struja, u državama EU ta tolerancija izgleda ovako: najveća vrijednost injektirane DC struje ne smije premašiti vrijednost od 20mA i 0.25% izlazne AC struje po fazi. U Velikoj Britaniji (u skladu sa Central Electricity Board), a i u većini država Evrope, tehnički uslovi koji se moraju ispuniti podrazumijevaju, pored opsega napona i frekvencije, karakteristike struje kratkog spoja što uključuje i maksimalno vrijeme njenog trajanja kao i određene parametre zaštitne opreme. Svi tehnički uslovi za priključenje, i načini njihove provjere, moraju biti u skladu sa energetske zakonima i propisima te države kao i u skladu sa IEC i IEEE [15]. Kratko poređenje pokazuje da u crnogorskom distributivnom sistemu, tehnički uslovi za priključenje obuhvataju provjeru sljedećih ograničenja: odobrena priključna snaga, vrijednost napona u tački priključenja (varijacija, nesimetrija, prelazne promjene, mogućnost regulacije, harmonici, šumovi i dr.), struja kratkog spoja, opterećenje elemenata distributivnog sistema iznad granica i ostalih infrastrukturnih ograničenja [9]. U državama EU, pored gore navedenih uslova, spadaju još i način uzemljenja, uslovi paralelnog pogona, raspon faktora snage, pouzdanost i dr. [13].

Iako Pravilnik o funkcionisanju distributivnog sistema Crne Gore predlaže provjeru prethodnih parametara i njihovo uklapanje u određene vrijednosti, činjenica je ta da usljed neadekvatnog funkcionisanja tog postupka iz razloga logističke prirode (nedostatak opreme i ljudstva), veliki broj parametara se zanemaruje pa se ta analiza svede samo na osnovne informacije u većini

slučajeva. Pored toga, u državama EU cijeli proces, počevši od prikupljanja dokumentacije pa sve do samog izdavanja traženih rješenja, je digitalizovan, što poboljšava efikasnost i transparentnost cijelog postupka.

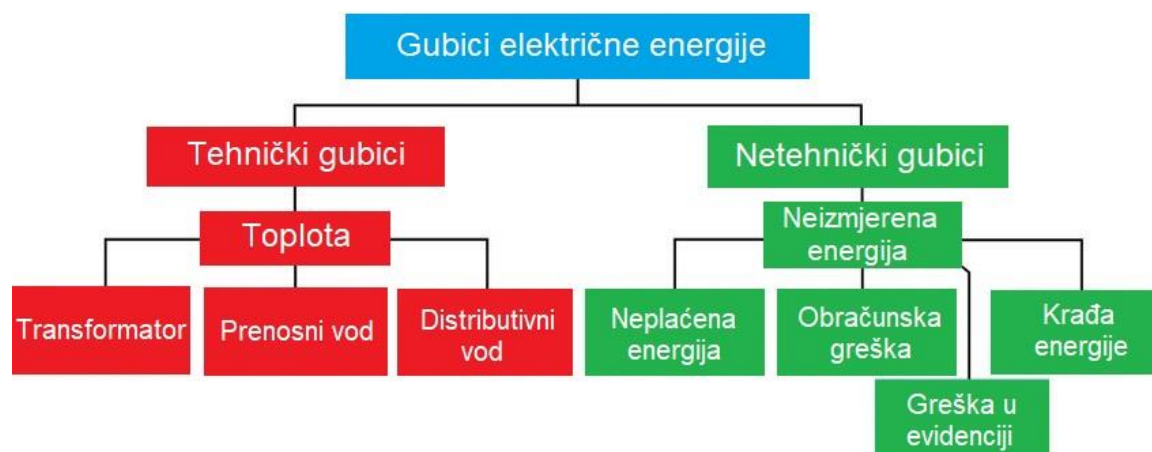
2.3. Mogućnosti i izazovi optimizacije tehničkih uslova za priključenje

Danas, napretkom tehnologije, razvijanjem i širokom implementacijom sistema pametnih mreža, moguće je mjerenje u realnom vremenu pogonskih parametara mreže od značaja i daljinsko reagovanje u slučaju pojave određenih poremećaja. Pomoću svega gore navedenog, što se posebno odnosi na naprednu mjernu infrastrukturu, danas postoji mogućnost da se vrlo precizno odrede uslovi kojima će se maksimizovati kako instalisane tako i vršne snage svih potrošača/proizvođača koji se priključuju, pritom vodeći računa da ta priključenja ne dovedu do nesimetrije ili pak maksimalnih/minimalnih vrijednosti napona koje su jasno definisane.

Neke od mogućnosti koje pruža optimizacija tehničkih uslova za priključenje jesu poboljšane performanse sistema uz smanjenje gubitaka, povećanje sigurnosti i pouzdanosti uz smanjenje rizika od havarije, povećanja bezbjednosti ljudi, očuvanja opreme, fleksibilnosti u radu što omogućava mreži da se prilagodi promjeni potrošnje i proizvodnje pa sve to zajedno doprinosi lakšoj integraciji obnovljivih izvora energije. Optimizacijom tehničkih uslova povećava se energetska efikasnost i smanjuje emisija štetnih gasova, što je sadržano i u agendama Evropske Unije. Povećanjem energetske efikasnosti produžava se vijek trajanja opreme, smanjuje se količina otpada i dovodi se do manjih troškova sistema kao i značajnog pomaka u sferi zaštite životne sredine.

Distributivni sistemi prvobitno su projektovani da rade bez ikakve proizvodnje na strani distribucije. Uvođenje izvora proizvodnje u distributivnu mrežu naziva se distribuiranim izvorom električne energije (DG) i može proizvesti značajan uticaj na protok snage kroz mrežu, stanje napona kod različite potrošne opreme korisnika kao i na kvarove u rasklopnim postrojenjima. Ozbiljnost uticaja zavisi od lokacije i veličine (nivoa penetracije) distribuiranog izvora proizvodnje električne energije. Mreža mora biti projektovana (ili postojeća mreža rekonstruisana) na način da omogući povezivanje distribuiranih izvora električne energije (DG) bez kršenja zakonskih tehničkih ograničenja ili tehničkih standarda kao što su varijacija napona, neravnoteža (disbalans) faza, uticaj na struju kratkog spoja itd. Smanjenje gubitaka prenosa električne energije kroz distributivnu mrežu, ugradnjom distribuiranih izvora električne energije blizu potrošača, je velika ekološka i ekonomska briga. Proizvodnja energije iz distribuiranih obnovljivih izvora uz smanjenje gubitaka u distribuciji će pomoći da se smanje zahtjevi za proizvodnjom iz konvencionalnih postrojenja što zauzvrat smanjuje emisije gasova staklene bašte. Pošto su distribuirani izvori električne energije (DG) postavljeni blizu centra opterećenja, odgovarajuće (optimalno) postavljeni izvori (DG) u distributivnoj mreži doprinijeće smanjenju gubitaka električne energije. Samo smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži može doprinijeti smanjenju 1% od ukupne emisije gasova staklene bašte [16].

Pored smanjenja troškova u vidu količine i trajanja opreme koja se koristi u elektrodistributivnom sistemu, optimizacija tehničkih uslova doprinosi manjem broju poremećaja a samim tim i manjem broju ljudskih radnih sati koji su potrebni za održavanje iste. Sve to povoljno utiče kako na proizvođače tako i na potrošače distributivnog sistema. Kada je u pitanju smanjenje gubitaka, povećanje broja distribuiranih izvora električne energije na distributivnom nivou doprinosi smanjenju gubitaka pri prenosu u slučaju tradicionalnih izvora električne energije. To se odnosi na tehničke gubitke, pored kojih postoje još i netehnički gubici, što je prikazano na slici 5.

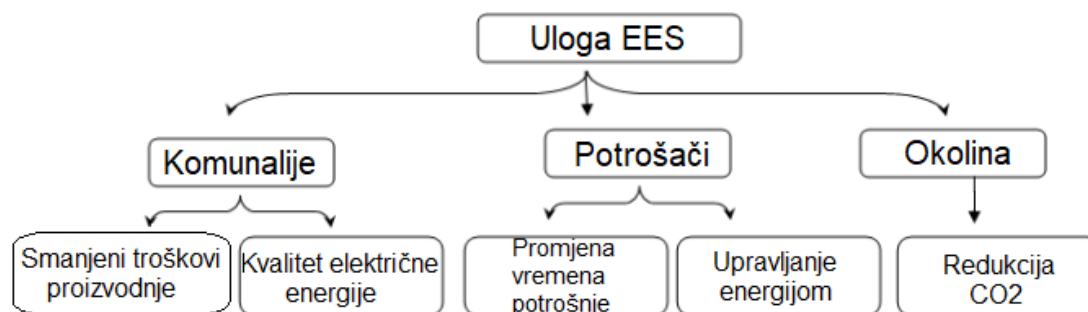


Slika 5. Gubici na mreži

Neki od izazova optimizacije tehničkih uslova za priključenje jesu kompleksnost implementacije u smislu integracije novih tehnologija u postojeće mreže kao i detaljno planiranje koje tome prethodi, visoki troškovi investicija u novu tehnologiju, opremu, obučavanje osoblja i naravno troškovi održavanja svega toga. Posebno treba istaći važnost usaglašavanja optimizacije sa državnim i međunarodnim standardima uz uklapanje u regulatorne okvire koji se nameću kao i redovno ažuriranje istih u skladu sa promjenama koje prate razvijanje modernog svijeta. Veća integracija distribuiranih izvora električne energije mogla bi se ostvariti pojednostavljuvanjem procedure priključenja na mrežu adekvatnim izborom parametara koji se provjeravaju u zavisnosti od infrastrukture na mjestu priključenja. Modernizacija sistema na prethodno pomenuti način znači i razmišljanje o mogućnosti skladištenja proizvedene energije koja bi se koristila u skladu sa potrebama sistema. Značajni nedostatak koji je evidentan prilikom razmatranja postojećih tehničkih preporuka, jeste to što ne tretiraju sisteme za skladištenje energije u punoj mjeri, a čime se mogu značajno unaprijediti tehničke karakteristike rada distribuiranih izvora. Uz adekvatno obrađenu temu sistema za skladištenje električne energije ostvarile bi se brojne prednosti koje bi najviše uticale na obnovljive izvore energije kao proizvođače koji su poznati po oscilacijama u proizvodnji. Upotreba ovih sistema dovela bi do značajnog smanjenja ovih oscilacija i doprinjelo bi regulisanju frekvencije i napona uz smanjenje flikera i štetnih harmonika.

Glavni izazovi koji se nameću pri integraciji sistema za skladištenje električne energije jesu posebni uslovi za uzemljenje i izolaciju radi zaštite od prenapona i kvarova, kompatibilnost sa postojećom infrastrukturom, uklapanje u standarde i regulatorne okvire, održavanje sistema baterija i njihovo upravljanje uz administrativne poteškoće oko licenciranja za iste. Sve što je navedeno mora biti takvo da se poklapa sa iskustvima operativne prakse. Sistemi za skladištenje električne energije omogućavaju skladištenje proizvedene električne energije (optimalno najjeftinijih postrojenja za proizvodnju) tokom noći i puštanje u mrežu tokom vršnih sati. Na taj način mogli bi da se minimiziraju uticaji na životnu sredinu izazvani sagorijevanjem fosilnih goriva tokom tradicionalnog procesa proizvodnje, smanjujući količinu goriva. Takođe bi mogli da se koriste kao sistemi koji obezbjeđuju stabilnost elektroenergetskog sistema u vremenima neočekivane potražnje za električnom energijom. Osim što se koriste kao sistemi neprekidnog napajanja (UPS - Uninterruptible Power Supply) mogli bi se instalirati kao zamjena za generatore koji bi služili za hitne slučajeve tokom ispada. Nadalje, skladištenjem proizvedene energije od strane potrošača, u vremenu niže tarife, i korišćenjem iste u vremenu više tarife, može dovesti do smanjenja računa za električnu energiju i taj sistem je poznat kao (EUEM - End User Energy Management). S druge strane, sva skladištena energija od strane potrošača, mogla bi se vraćati u mrežu i na taj način

ostvarivati dodatna finansijska korist potrošača [17]. Savladavanjem prethodno navedenih izazova i korišćenjem predstavljenih rješenja za pomenute probleme, dolazi se korak bliže ostvarivanju ciljeva i ispunjavanju obaveza, ostvarajući adekvatnu ulogu EES koja je prikazana na slici 6.



Slika 6. Obaveze i ciljevi EES

Koordinisana optimizacija svih dostupnih resursa, kao što su distribuirani izvori energije i pametna opterećenja, služi sistem operatoru za pronalaženje optimalnog načina funkcionisanja sistema. Jedan od problema koji se istakao pri optimizaciji tehničkih uslova jeste rješavanje problema optimalnih tokova snaga. Rješavanju tog problema se pristupilo digitalnim upravljanjem potrošnje i proizvodnje u realnom vremenu [18,19].

U suštini, optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije može se realizovati kroz određeni broj koraka:

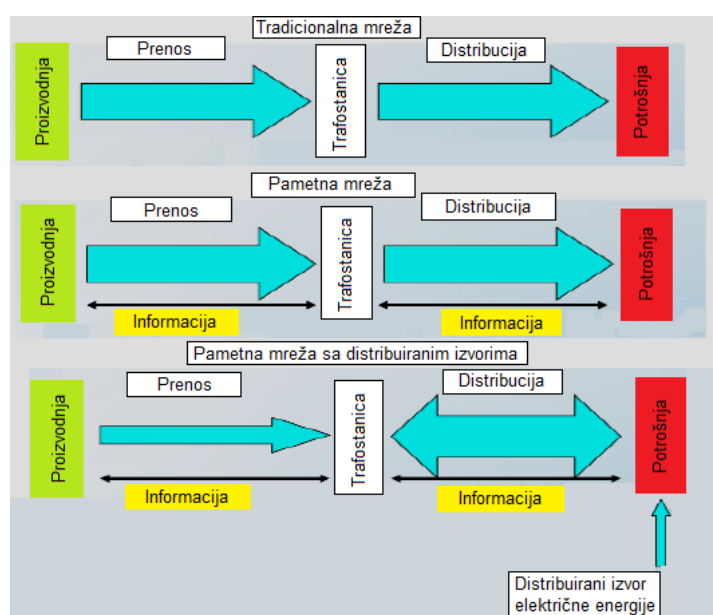
1. prikupljanje podataka u realnom vremenu ili određenom vremenskom intervalu,
2. razmatranje i analiza podataka koji su prikupljeni,
3. izbor mrežnog modela i unos parametara elemenata mreže,
4. analiza raznih pogonskih stanja sa varijacijom parametara i praćenjem promjena
5. poređenje efekata postojećih i optimizovanih tehničkih kriterijuma za priključenje distribuiranih izvora energije
6. razmatranje i analiza rezultata

3. Prikupljanje podataka pomoću napredne mjerne infrastrukture

Današnja elektroenergetska mreža je dizajnirana da funkcioniše kao vertikalna struktura koja se sastoji od proizvodnje, prenosa i distribucije i podržana je kontrolama i uređajima za održavanje pouzdanosti, stabilnosti i efikasnosti.

3.1. Napredne elektroenergetske mreže i napredna mjerna infrastruktura

Sistemske operatore se sada suočavaju sa novim izazovima, uključujući prodor DIE u zastarjeli sistem, brze tehnološke promjene, različite vrste tržišnih igrača i krajnjih korisnika. Sljedeća iteracija, pametna mreža, će biti opremljena šemama podrške za komunikaciju i tehnikama mjerenja u realnom vremenu radi poboljšanja otpornosti i predviđanja, kao i zaštite od unutrašnjih i spoljašnjih prijetnji. Okvir dizajna pametne mreže zasnovan je na razdvajanju i restrukturiranju elektroenergetskog sektora i njegovoj optimizaciji [20]. Postojeće elektroenergetske mreže možda neće moći da izdrže buduće zahtjeve za električnom energijom što predstavlja ozbiljan izazov kako u tehničkom tako i u ekonomskom smislu. Kako bi se adekvatno ispratila uvećana potražnja za električnom energijom potrebno je dodati nove kapacitete postojećim ili postojeće sisteme učiniti efikasnijim. Da bi se ustanovilo šta je bolja opcija, potrebno je sprovesti opsežnu tehno-ekonomsku analizu uzimajući u obzir trenutno stanje, buduće potrebe kao i pravce razvijanja. Dodavanje novih kapaciteta postojećim, iako moguće, vrlo je teško i ekonomski upitno imajući u vidu da nije izvučen tehnički maksimum iz onoga što već postoji. Zato se kao trenutno logično rješenje nameće povećanje nivoa efikasnosti postojećih elektroenergetskih mreža, tj. povećavanje stepena iskorišćenja sistema do nivoa neugrožavanja stabilnosti istog. Na slici 7 su prikazani tokovi snaga za tradicionalne, pametne i pametne mreže sa DG.

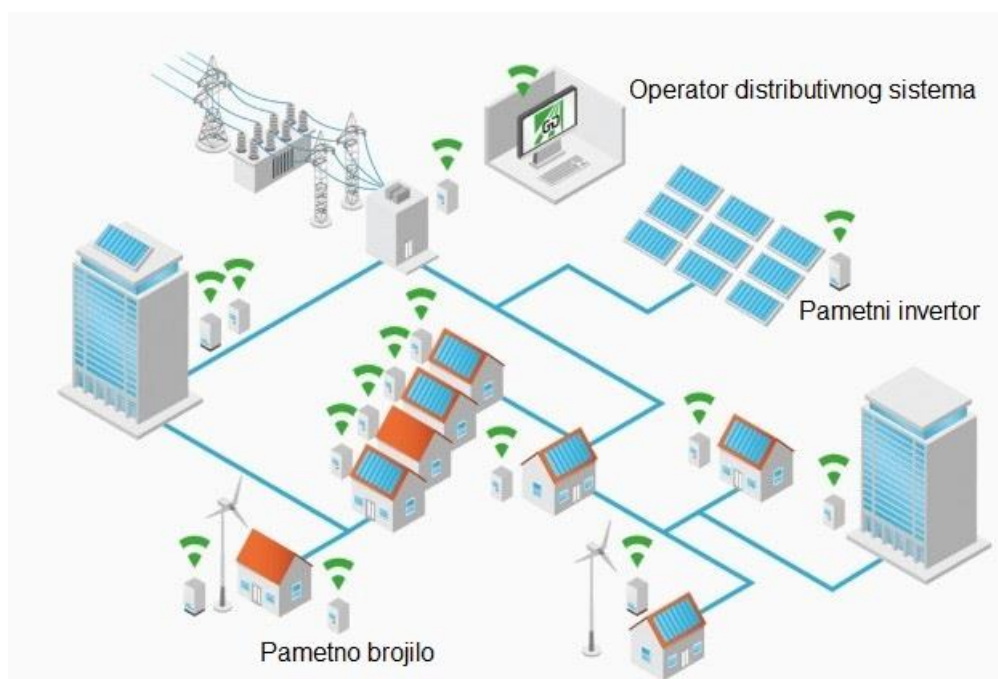


Slika 7. Tokovi snaga tradicionalnih, pametnih i pametnih mreža sa DG

Da bi se sagledala veličina ovog problema, potrebno je prikupiti podatke o svim bitnim parametrima koji mogu uticati na gore navedene probleme. Ti podaci moraju biti pouzdani, tačni, precizni i obuhvatati vremensko razdoblje dovoljno da se mogu primjetiti određeni obrasci u ponašanju sistema kako pri normalnom funkcionisanju tako i tokom poremećaja raznih uzročnika. Prikupljanje podataka i kreiranje njihove baze omogućava lakše rješavanje svih budućih problema na koje se može naići. U današnjem svijetu najbitnija stvar je informacija. Tačna, pouzdana i precizna informacija je od značaja za svaku sferu života jer omogućava pravovremeno djelovanje i planiranje. Najveći izazov je kreiranje sistema sposobnog za prikupljanje takvih informacija. U svijetu elektroenergetskih sistema, za to je zaslužna napredna mjerna infrastruktura (AMI) kao dio napredne elektroenergetske mreže (eng. Smart grid). Napredna elektroenergetska mreža (pametna mreža) povezuje proizvođače i potrošače koristeći informacionu infrastrukturu energetskog sistema, zajedno sa cjelokupnom infrastrukturom koju taj sistem obuhvata a sve u cilju poboljšanja efikasnosti implementacije usluga i povećanjem pouzdanosti sistema.

Pametna mreža koordiniše sposobnostima i potrebama svih generatora, mrežnih operatora, krajnjih korisnika i zainteresovanih strana na tržištu električne energije da bi funkcionisala najefikasnije, sa najmanjim troškovima i uticajima na životnu sredinu a istovremeno povećala stabilnost, pouzdanost i otpornost cijelog sistema. To je skup tehnologija koje brzo napreduju i koje će se implementirati u sistem različitim brzinom u zavisnosti od lokalnih uslova, zakona i drugih stvari koje mogu uticati na primjenu iste [21].

Karakteristike pametne mreže su automatizacija sistema, omogućavanje dvosmjerne komunikacije upotrebom pametnih brojlara, omogućavanje veće integracije obnovljivih izvora električne energije na mrežu, pružanje podrške za električna vozila na način što je obezbjeđena infrastruktura i tehnologija koja je neophodna za implementaciju istih, poboljšana pouzdanost i otpornost mreže kao i efikasnije upravljanje istom a sve u korist kako potrošača tako i proizvođača koji su priključeni na mrežu. Napredna mjerna infrastruktura nam omogućava da u realnom vremenu pratimo određene parametre koji izazivaju te smetnje i optimizacijom istih svedemo na minimum negativne uticaje na sistem. Na slici 8 je dat primjer implementacije i komunikacije pametne mreže sa ODS.

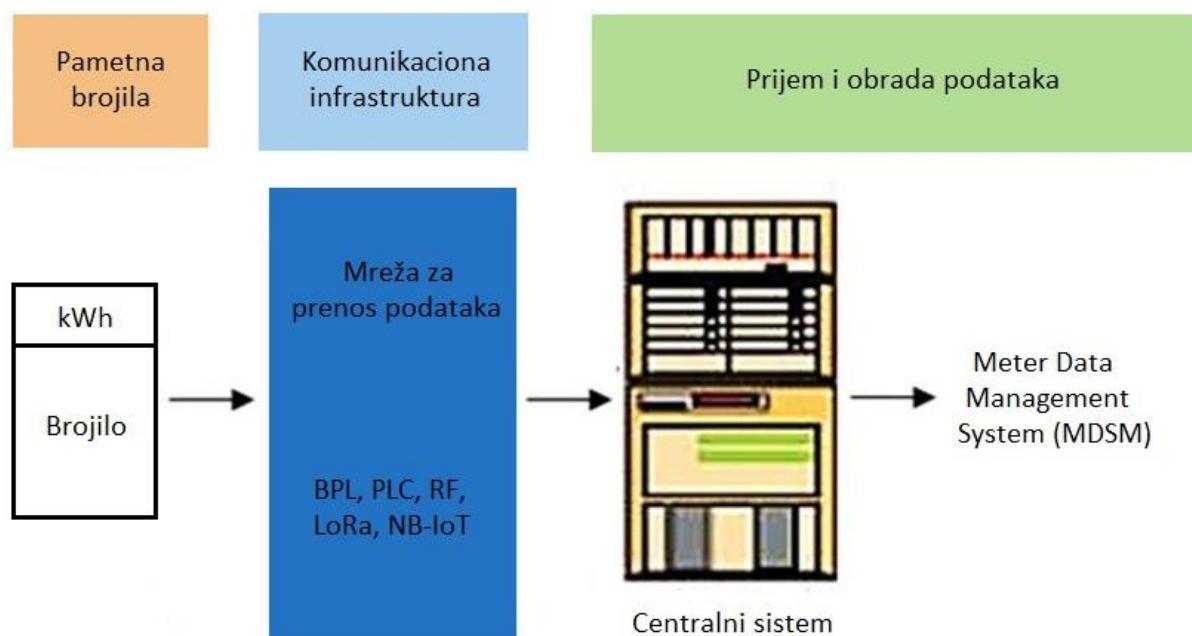


Slika 8. Implementacija i komunikacija pametne mreže sa ODS

Pametna mreža koristi digitalnu tehnologiju za monitoring i upravljanje električnom energijom iz svih izvora. Upotrebom napredne mjerne infrastrukture dobija se mogućnost za balansiranje, proizvodnju i potrošnju električne energije uz opciju integrisanja baterija za skladištenje električne energije [22, 23, 24].

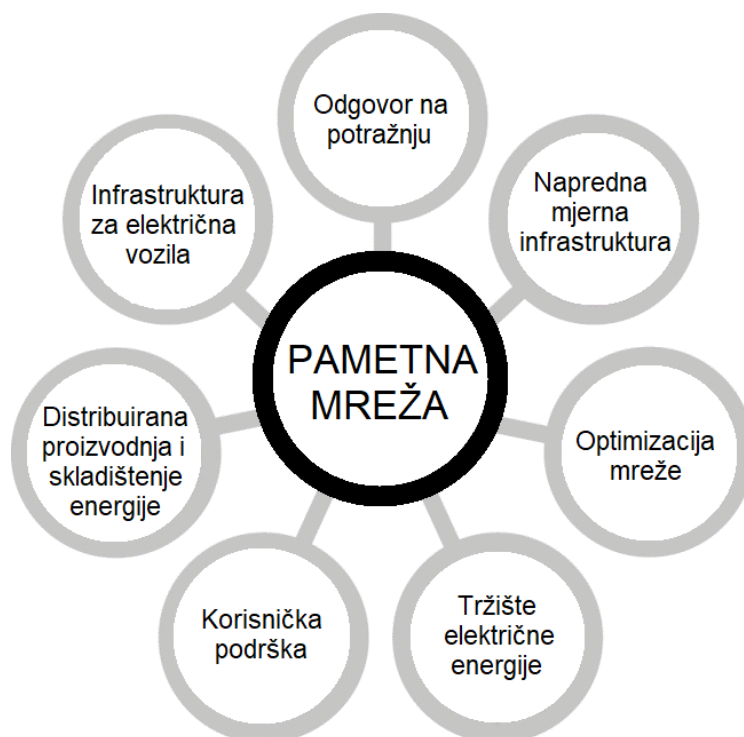
Napredna mjerna infrastruktura (AMI – Advanced metering infrastructure) omogućava uzimanje podataka na nivou potrošača u realnom vremenu, a pomoću sprege sa ostalim sistemima dobijaju se i ostala mjerenja koja omogućavaju da se predvidi potrošnja aktivne i reaktivne snage potrošača tokom dužeg vremenskog intervala [25, 26, 27].

Osnovni elementi napredne mjerne infrastrukture (prikazani na slici 9) su: pametna brojila koja mjere potrošnju električne energije i ostvaruju komunikaciju u dva smjera, komunikaciona infrastruktura koja služi za prenos podataka pomoću radio frekvencija, mobilnih mreža itd. između brojila i centralnog sistema, MDSM (Meter Data Management System) čija uloga je obrada, analiza i čuvanje prikupljenih podataka, sistemi zaštite podataka unutar glavnog sistema a u današnje vrijeme i neka vrsta aplikacije ili web portala koji bi potrošačima služio za pregled utrošene električne energije kao i njeno upravljanje.



Slika 9. Osnovni elementi napredne mjerne infrastrukture

U vremenu deregulacije i decentralizacije tržišta stvaraju se sistemi koji su mnogo dinamičniji i više posvećeni potrošaču što otvara vrata za drastične promjene u smislu izbora, tj. pružanja slobode izbora potrošaču od početka do kraja tog ciklusa što podrazumijeva izbor kako snabdjevača tako i distributera električne energije. Takvo stanje na tržištu stvara zdravu konkurenciju i vremenom dovodi do unaprjeđenja uslova priključenja i poboljšanja ponude prema potrošačima uz obavezu transparentnosti i zakonske nemogućnosti komunikacije konkurenata u smislu usklađivanja ponuda i njihovih uslova prema potrošačima. Slika 10 prikazuje mogućnosti pametne mreže (smart grid).



Slika 10. Mogućnosti pametne mreže (smart grid)

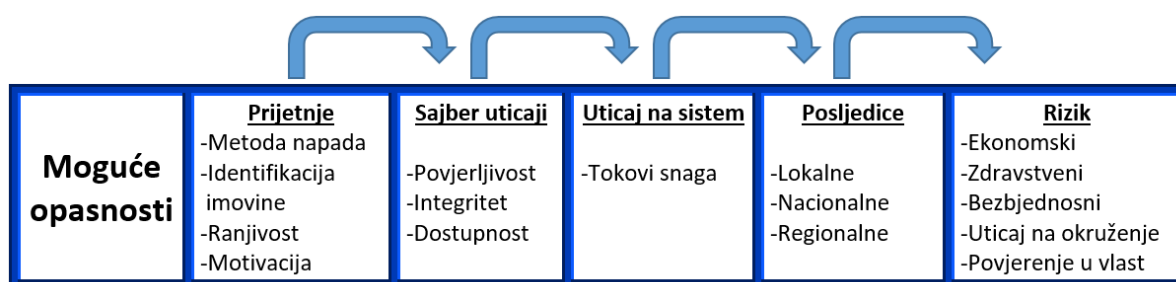
3.2. Prednosti i mane napredne mjerne infrastrukture

Povećanjem efikasnosti dovodi se i do smanjenih troškova održavanja postojeće mreže kao i smanjenog štetnog uticaja na životnu sredinu. Smanjeni štetni uticaj na životnu sredinu se manifestuje kroz više pokazatelja kao što su smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, smanjenje količine fizičkog otpada, smanjenje zagađenja vode i vazduha usljed smanjene zavisnosti od klasičnih izvora električne energije. Kombinacija prethodno navedenog dovodi do očuvanja prirode i njenih resursa kao i podsticaja održivog razvoja što doprinosi ekonomskom rastu i socijalnom prosperitetu. Sve to može dovesti do pada cijene električne energije u odnosu na klasične sisteme i otvoriti put većoj integraciji obnovljivih izvora energije koji samim priključenjem mogu imati pozitivan ili negativan uticaj na mrežu. Pozitivni uticaji se ogledaju u poboljšanoj efikasnosti i lokalnoj samodrživosti, očuvanju životne sredine i diverzifikaciji energetske izvora a negativni uticaji se ogledaju u nedostatku regulatornih okvira u kojima isti funkcionišu, variranju proizvodnje usljed prirode obnovljivih izvora, potrebi za nadogradnjom mreže koja bi mogla na adekvatan način da prihvati njihova priključenja kao i u mogućoj neusklađenosti tarifnih struktura za električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora energije. Jedna od glavnih uloga napredne elektroenergetske mreže (pametna mreža - smart grid) jeste povećanje efikasnosti i stepena iskorišćenja postojeće energetske infrastrukture u cilju smanjenja potrebe za izgradnjom novih energetske jedinice prije povećanja stepena iskorišćenja postojećih.

Problem optimizacije generalno se može definisati kao pronalaženje najboljeg matematičkog rješenja nekog problema. Koja metoda optimizacije će se koristiti zavisi od vrste problema i promjenljivih koje u njemu učestvuju [28, 29, 30]. Podaci, pri čemu se misli na aktivnu/reaktivnu snagu, napon, struju, faktor snage, energiju itd. kao i na statusne podatke o mreži (brojilima, prekidačima i dr.), koji će omogućiti sprovođenje određene vrste analize u cilju pronalaženja najboljeg matematičkog rješenja prikupljaju se pomoću napredne mjerne infrastrukture (na tačno određenom vremenskom intervalu (15 minuta, sat vremena...)) koja

predstavlja skup tehnologija koje omogućavaju daljinsko prikupljanje svih podataka od značaja pomoću pametnih brojila i analizu potrošnje električne energije pomoću raznih softverskih sistema uz razvijenu komunikacionu mrežu. Kao i svi sistemi, i ovaj posjeduje određene prednosti i mane.

Prednosti napredne mjerne infrastrukture su učestalije prikupljanje podataka, smanjeni operativni troškovi usljed eliminacije potrebe za fizičkim očitavanjem brojila, brza detekcija kvarova i smanjeno vrijeme reakcije za iste, poboljšana tačnost mjerenja uz manju mogućnost pojave grešaka pri očitavanju, poboljšana korisnička usluga uz bolji uvid u potrošnju što može dovesti do racionalnije potrošnje električne energije među potrošačima kao i smanjenih gubitaka na mreži usljed optimizacije distribucije iste. Sve gore navedeno olakšava integraciju obnovljivih izvora energije na mrežu i pomaže planiranje razvoja budućih sistema [31]. Mane napredne mjerne infrastrukture se manje ogledaju u tehničkim stvarima a više u socijalnim. To su visoka početna ulaganja koja podrazumijevaju zamjenu postojeće infrastrukture koja nije kompatibilna sa naprednom mjernom infrastrukturom kao i izgradnju ili ugradnju nove u segmentima u kojima je to potrebno, kompleksnost samog sistema i njegove implementacije koja iziskuje veliku stručnost tehničkih lica uključenih u taj projekat. Poteže se i pitanje zaštite privatnosti potrošača usljed prikupljanja velikog broja podataka o potrošnji čime se stvara obrazac koji se može pretočiti u navike korisnika kao i povećana osjetljivost sistema na sve učestalije sajber napade, što je prikazano na slici 11. Mana u dinamici izvođenja planiranih radova je usporena implementacija zbog sistema koji su organizovani na takav način da su velikim dijelom otporni na promjene koje se unose [32, 33].

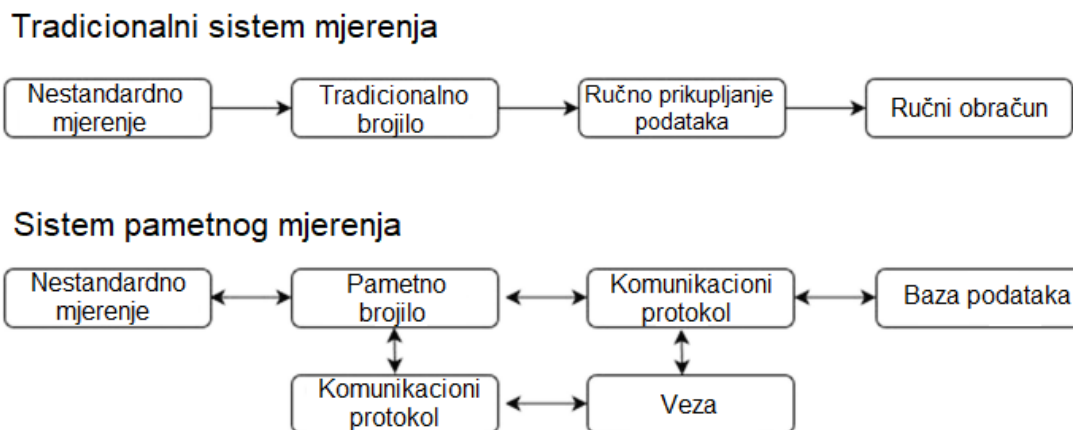


Slika 11. Opasnosti prilikom implementacije AMI

Gore navedene prednosti i mane napredne mjerne infrastrukture je potrebno pažljivo izbalansirati da bi se postigao najbolji mogući rezultat i da bi se primjena ovog sistema smatrala uspješnim.

3.3. Pametna brojila

Analiziranjem prošlih i budućih pojava u elektroenergetskom sistemu, kao i njihovim upoređivanjem traži se veza između istih. Konstantnim mjerenjem u realnom vremenu pomoću napredne mjerne infrastrukture mogu se uzimati uzorci u toku određenog (kratkog) vremenskog intervala a u cilju jednostavnijeg i bržeg proračuna željenih parametara u odnosu na duži vremenski interval. Veličine koje se prate pomoću napredne mjerne infrastrukture su aktivna i reaktivna energija/snaga, napon, struja, frekvencija i određeni parametri koji opisuju kvalitet napona kao što su harmonici, fazna nesimetrija, treperenje itd. Takva mjerenja umnogome povećavaju preciznost svih budućih radnji vezanih za taj sistem i stvaraju mogućnost daljeg razvijanja. Na slici 12 prikazano je poređenje tradicionalnog sa pametnim mjerenjem.



Slika 12. Blok šema tradicionalnog i pametnog mjerenja

Generalno, sistem pametnog mjerenja se sastoji od tri elementa: jedinica za mjerenje, komunikaciona jedinica i centralni sistem sa bazom podataka. Jedinica za mjerenje (brojilo) prati korišćenje usluga korisnika, daje informacije o korišćenju i prognozama, obrađuje naplatu. Komunikacioni uređaj omogućava dvosmjernu komunikaciju sa dobavljačem usluga. Centralni sistem je na strani dobavljača i ima mogućnost, između ostalog, da pokrene/isključi snabdijevanje uslugama, da obrađuje podatke za potrebe odnosa sa kupcima i da arhivira podatke u skladu sa zakonskim zahtjevima [34]. Napredna mjerna infrastruktura omogućava dvosmjerno mjerenje, za razliku od jednosmjernog u klasičnim sistemima koje se odnosi na protok električne energije samo od mreže ka potrošaču, pružajući priliku potrošaču/proizvođaču da uvidom u informacije koje dobija od pametnih brojila donosi kratkoročne odluke o kupovini ili prodaji električne energije. Ono što se dobija prelaskom sa jednosmjernog na dvosmjerno mjerenje jeste personalizacija korisničkih usluga, bolje predviđanje potrošnje i bolja analiza uz dinamičko upravljanje opterećenjem i stvaranje energetskog sistema koji je više održiv od dosadašnjih sistema.

Stepen razvoja i rasprostranjenosti napredne mjerne infrastrukture varira u svijetu a početkom 2024. godine vrijednost ovog tržišta je imalo procijenjenu vrijednost od preko 15 milijardi dolara dok se očekuje rast na preko 44 milijarde dolara do kraja 2032. godine. Glavno tržište, ujedno i tržište sa najvećim procentom pokrivenosti naprednom mjernom infrastrukturom je Evropa. Pored Evrope prednjače Sjedinjenje Američke Države i Kanada. U Americi, rane inicijative koje su uvedene u prvoj deceniji 21. vijeka su umnogome doprinijele razvoju napredne elektroenergetske infrastrukture i svijesti kod građana o svemu što ona, kao vrhunac tehnologije, predstavlja. Danas, jedan od najvećih saveznih i državnih programa „Smart Grid Investment Grant”, pruža veliku podršku za implementaciju pametnih brojila.

Kada je u pitanju Kanada, djelovi kao što su Ontario i Britanska Kolumbija, posjeduju veoma visok stepen implementacije pametnih brojila dok ostatak države bilježi ozbiljno visok porast ugradnje istih. U Aziji se posebno ističe Kina koja sa nekoliko stotina miliona ugrađenih pametnih brojila predstavlja jednog od lidera u implementaciji istih, zajedno sa Japanom i Južnom Korejom. Kroz brojne vladine programe promocije i integracije napredne mjerne infrastrukture došlo je do rapidnog širenja iste. U tabeli 3 prikazane su države sa najvećim brojem instaliranih pametnih brojila do kraja 2020. godine [53].

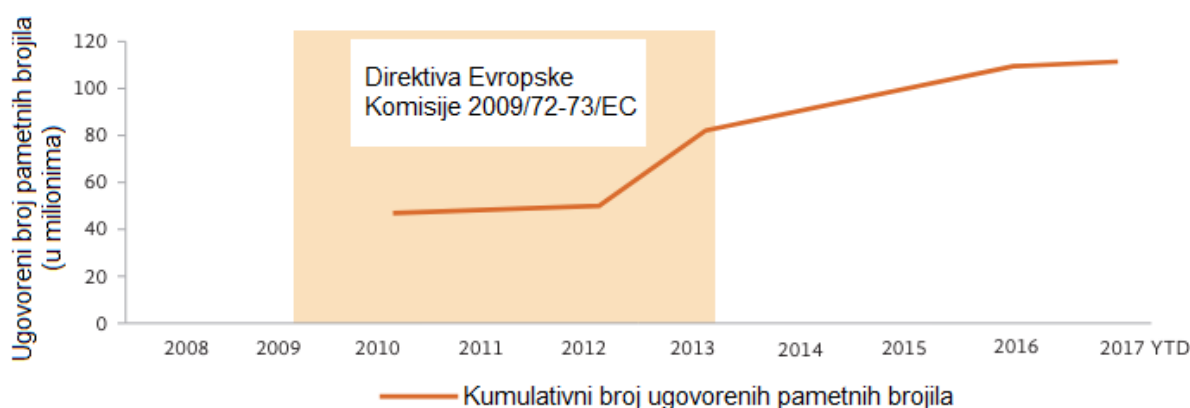
Tabela 3. Države sa najvećim brojem instaliranih pametnih brojila do kraja 2020. godine

Država	Broj pametnih brojila instaliranih do 31. decembra 2020. godine
Kina	437,847,228
Sjedinjene Američke Države	132,042,022
Japan	58,750,000
Francuska	35,300,000
Italija	33,600,000
Njemačka	32,900,000
Brazil	29,576,569
Ujedinjeno Kraljevstvo	26,920,000
Španija	21,800,000
Južna Koreja	21,328,625
Ukupno	830,064,443

Ostatak svijeta, prvenstveno misleći na afrički kontinent i neke siromašnije države Južne Amerike ali ne izostavljajući bilo koju manje razvijenu državu svijeta u opštem smislu, ulaže velike napore da kroz razne inicijative i programe postigne određene vidljive rezultate u poboljšanju svoje energetske infrastrukture. Glavni ciljevi u početku njihove implementacije jesu poboljšanje efikasnosti i smanjenje gubitaka na mreži koje uz pomoć Svjetske banke, Afričke razvojne banke i drugih međunarodnih organizacija prave razliku u današnjem svijetu.

Očekuje se da će narednih godina Južna Amerika preći Afriku i države Bliskog istoka po procentualnoj rasprostranjenosti sistema napredne mjerne infrastrukture.

U Evropskoj uniji, po nivou razvijenosti napredne mjerne infrastrukture i broju ugrađenih pametnih brojila ističu se Francuska, Španija, Njemačka, Italija kao i zemlje Skandinavskog poluostrva. Velika Britanija, kao geografski evropska zemlja ali ne i članica Evropske unije, takođe ima visok stepen ugrađenih pametnih brojila. Evropski procentualni prosjek pokrivenosti država pametnim brojilima krajem 2021. godine iznosio je oko 50 procenata. Na slici 13 prikazan je rast broja instaliranih pametnih brojila u Evropi nakon usvajanja direktive Evropske Komisije [54].



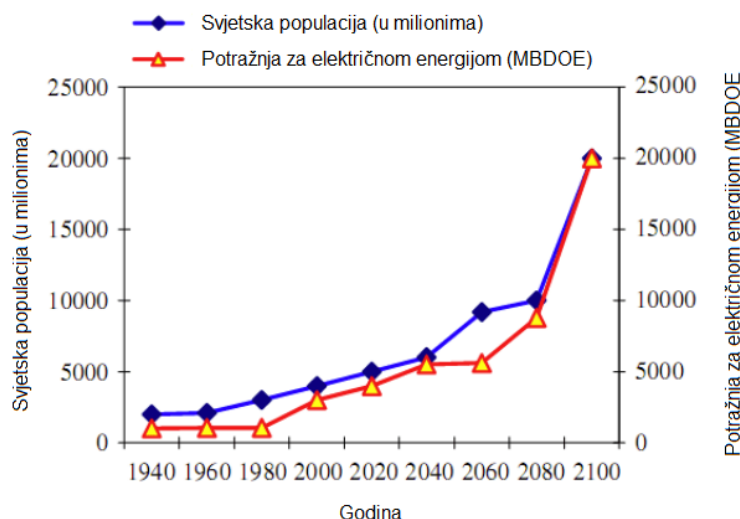
Slika 13. Rast broja instaliranih pametnih brojila u Evropi nakon usvajanja direktive Evropske Komisije

Kada je u pitanju elektrodistributivna mreža Crne Gore i njen stepen razvijenosti u smislu pokrivenosti mreže pametnim brojlama (pri čemu se prvenstveno misli na direktna, trofazna, dvotarifna mjerenja sa daljinskom komunikacijom), prema podacima Evropske banke za obnovu i razvoj, stepen pokrivenosti konzuma Crne Gore pametnim brojlama 2021. godine iznosio je oko 85% dok po najnovijim podacima taj stepen iznosi preko 90% što Crnu Goru svrstava u sami vrh država Evrope po procentualnom broju ugrađenih pametnih brojila. Planira se dalja modernizacija elektonergetskog sistema uz namjeru da se tokom 2025. godine započne novi ciklus modernizacije napredne mjerne infrastrukture čiji završetak je predviđen 2030. godine.

3.4. Poteškoće pri implementaciji napredne mjerne infrastrukture

Novi zakon, „Čista energija za sve Evropljane“ odobren je u junu 2019. godine, oblikujući uvođenje pametnog mjerenja u narednim godinama za one zemlje koje još nijesu završile taj proces. Ovaj „Clean Energy Package“ ima za cilj da doprinese evropskim „zelenim“ ambicijama. Jedan od šest političkih smjernica za sadašnju Evropsku komisiju je Zeleni dogovor EU, koji ukazuje na mogućnost klimatske neutralnosti do 2050. godine [35].

Forsiranjem i zakonskim obavezivanjem, širenje napredne mjerne infrastrukture se stavlja pred svršen čin uprkos brojnim poteškoćama pri implementaciji ovakvih sistema. Poteškoće pri implementaciji napredne mjerne infrastrukture se mogu podijeliti na dvije grupe. Poteškoće prije i tokom ugradnje tih sistema kao i poteškoće nakon ugradnje. Kada su u pitanju izazovi prije i tokom ugradnje ovih sistema, glavni problemi se sastoje od integracije i kompatibilnosti tih sistema sa postojećom mrežnom infrastrukturom, problema sa mrežom i povezivanjem kao i upravljanjem podacima i skladištenjem istih. Faktori koji mogu uticati na samo sprovođenje optimizacije tehničkih uslova za priključenje jesu tehno-ekonomskog karaktera a odnose se najčešće na postojeću distributivnu infrastrukturu koja nije ispratila napredovanje društva u svakom smislu. Tu se prvenstveno misli na staru opremu i kapacitete postojeće mreže, zastarjele tehničke standarde i regulative, nedostupnost novih tehnologija, nedostatak mogućnosti i želje za inovacijom i implementacijom istih, mogući problem u ostvarivanju komunikacije na svim nivoima, razni društveni i ekološki faktori kao i dostupnost ljudstva koje bi moglo da se pozabavi gore navedenim stvarima i prepozna rizike koji su sveprisutni u ovakvim situacijama. Sve veći broj stanovnika, što za sobom vuče i sve veću potražnju za električnom energijom, prikazano na slici 14 [55], koju distributivna mreža sve teže isporučuje, dovodi do trenutka kada će postojeći kapaciteti biti popunjeni do mjere preopterećenja. U ekonomskom smislu treba naći opravdanje za integraciju sistema pametnog mjerenja na mrežu koja je dostigla svoj limit i čija revitalizacija bi trajala toliko da bi vrijeme iste premašilo postavljene rokove za proširenje kapaciteta.



Slika 14. Uticaj porasta broja stanovnika na povećanje potražnje za električnom energijom

Za pouzdane podatke koje pruža napredna mjerna infrastruktura, potrebna je i stabilna mreža. Stabilna mreža u svakom smislu a pogotovo u smislu mrežne konekcije i povezivanja sa istom. To se posebno ističe zato što se mjerenja obavljaju u realnom vremenu i usljed raznih nestabilnosti može doći do kašnjenja podataka ili nemogućnosti da se isti prenesu a što se najčešće dešava u ruralnim područjima ili u gusto naseljenim sredinama. Zbog svega navedenog, potrebno je identifikovati slabe zone i unaprijed se njima pozabaviti. Priklučenje novih potrošača/proizvođača na mrežu, zahtijeva detaljno praćenje parametara koji bi se redovnim ažuriranjem kvalitetno iskoristili. Upravljanje tim podacima i njihovo skladištenje predstavljaju jedan od velikih izazova kako u logističkom tako i u bezbjednosnom smislu. Svaka država mora poštovati procedure sprovođenja ovakvih mjera kao i zakone koji uređuju ovu oblast. Adekvatna procjena količine podataka koja će se prikupljati, kao i vrijeme čuvanja tih podataka, umnogome određuju visinu troškova ove sfere napredne mjerne infrastrukture. Slika 15. pokazuje šta sve obuhvata prikupljanje i upravljanje podacima mjerenja dobijenih preko napredne mjerne infrastrukture.



Slika 15. Upravljanje podacima sa brojila

Glavni problemi nakon ugradnje ovih sistema odnose na održavanje i podršku korisnicima kao i na obuku radne snage koja će te sisteme održavati i njima upravljati.

Karakteristika "samoizlječenja" moderne mreže uključuje inteligenciju osiguranja bezbjednosti kako radnika mreže tako i šire javnosti. Poboļjšani sistemi za praćenje i podršku odlučivanju će brzo identifikovati probleme i opasnosti. Na primjer, sposobnost da se identifikuje oprema koja je na ivici kvara sigurno će spasiti živote i smanjiti broj potencijalnih teških povreda. Takođe, moderna mreža stvara manje nepotrebnog održavanja, što znači manju izloženost opasnim situacijama i povećanu sigurnost osoblja za održavanje [36]. Najbitnija stvar kod svih sistema jeste njihovo redovno održavanje. Usljed specifične prirode sistema napredne mjerne infrastrukture, mogući su česti problemi pa je zato veoma važno uspostaviti adekvatan monitoring sa unaprijed određenim provjerama sistema. Za sve to je potrebno obučiti zaposlene u energetske kompanijama koje su zadužene za ove sisteme jer u slučaju greške ili lošeg upravljanja velika količina podataka koja je bitna za dalji razvoj sistema može biti izgubljena. Na slici 16 je prikazano šta sve spada u ukupne troškove pogona ovakvih sistema.



Slika 16. Troškovi pogona naprednih sistema

4. Strategija i mogućnosti optimizacije tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije

Ovo poglavlje obuhvata metode i softverske alate koji se koriste za proračun pogonskih parametara u cilju optimizacije tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora električne energije kao i osvrt na njihov značaj.

4.1. Značaj optimizacije tehničkih uslova za priključenje

Distributivni sistemi prolaze kroz brze i značajne promjene, što čini probleme vezane za rad i planiranje takvih sistema izazovnijim. Nova generacija pametnih distributivnih sistema karakteriše se prisustvom disperzovane i raznovrsne proizvodnje, dvosmjernim protokom električne energije i prisustvom više vrsta konfiguracija mreže. Pored toga, pametna mreža mora biti razvijena imajući u vidu principe kao što su prihvatanje svih opcija za proizvodnju, aktivno učešće potrošača u odgovoru na potražnju, kvalitet energije, efikasan rad i optimizacija korišćenja sredstava. Efikasnost i pouzdanost rada pametnih distributivnih sistema zahtijevaju nadzor, analizu i kontrolu elektroenergetske mreže na različitim nivoima [37].

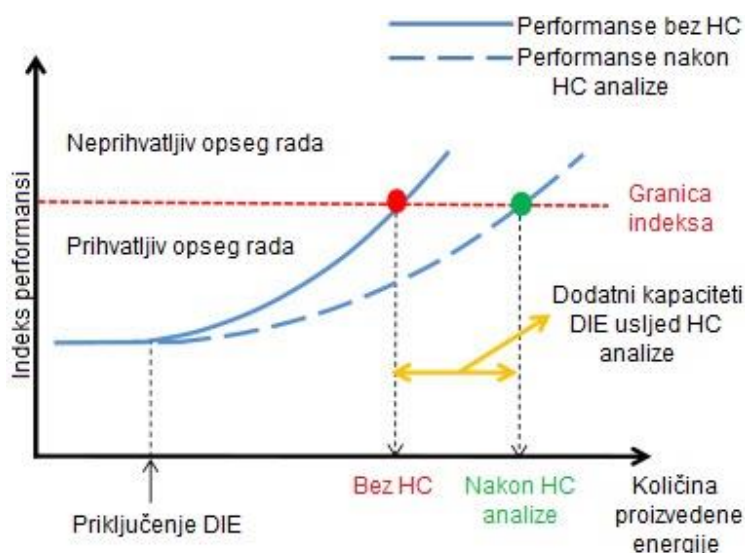
Cilj optimizacije tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije jeste stvaranje pouzdanog, stabilnog i održivog elektroenergetskog sistema sa velikim nivoom efikasnosti koji može da izdrži porast broja priključenih potrošača kao i proizvođača među kojima spadaju i obnovljivi izvori energije. Sam proces optimizacije tehničkih uslova za priključenje je sa aspekta tehno-ekonomske analize i zahtjeva regulatornih tijela veoma složen. U procesu optimizacije treba obaviti razne provjere kao što su analize kapaciteta mreže na koju se planira priključenje, analize održavanja stabilnosti sistema i uticaj na njegovu pouzdanost. Pored toga trebaju se ispoštovati protokoli i standardi koji važe za određeni region i vrstu tehničke intervencije pazeći da se ne izađe iz pravnih i regulatornih okvira u koje spadaju. Suština je odraditi detaljnu analizu i prilagoditi parametre na način da se omogući optimalna integracija novih korisnika što bi zajedno sa implementacijom nove tehnologije dovelo do smanjenja operativnih troškova i sveopšteg boljitka za operatore i krajnje korisnike. Sve gore navedeno mora se razmatrati uz stalno razmišljanje o ekonomičnosti istog što se odnosi kako na troškove ulaganja tako i na očekivani povrat investicije. Bitno je insistirati na upotrebi najnovijih tehnologija i sistema kao što su pametne mreže i sistemi za skladištenje električne energije što još uvijek predstavlja ozbiljan izazov kako kod nas tako i u svijetu. Pri priključenju distribuiranih izvora električne energije dolazi do uticaja na mrežu a tip uticaja može biti različit u zavisnosti od raznih faktora koji se provjeravaju.

Nekoordinisana integracija distribuiranih izvora električne energije bi mogla da donese određene tehničke probleme ako nije na odgovarajući način planirana, kontrolisana i sprovedena u djelo. Ti tehnički problemi su prenaponi, fluktuacija napona, pojava štetnih harmonika, neuravnoteženost sistema itd. Pored toga, injektirana snaga distribuiranih izvora električne energije može dovesti do povećanja gubitaka aktivne i reaktivne snage u distributivnoj mreži. Stoga su u posljednjih nekoliko godina učinjeni brojni naponi da se riješi problem optimalne raspodjele distribuiranih izvora [38]. Sva priključenja moraju biti sinhronizovana sa mrežom i svi elektroenergetski sistemi se moraju adekvatno održavati i sadržati određene vrste sistema za praćenje dešavanja u cilju pravovremenog reagovanja i mogućnosti sprječavanja pojave bilo kakvih neželjnih događaja.

4.2. Prihvatna sposobnost mreže za distribuiranu proizvodnju

Prihvatna sposobnost mreže za distribuiranu proizvodnju (eng. „Hosting capacity” (HC)) se definiše kao ukupni kapacitet distribuiranih izvora električne energije koji se mogu priključiti na mrežu a da njihovo priključenje nema štetnih uticaja na napon, zaštitne uređaje i kvalitet električne energije i sve to bez nadogradnje ili modifikacije postojeće infrastrukture. Svaki sistem ima svoj limit kada je u pitanju priključenje distribuiranih izvora a prekoračenjem tog limita dolazi do promjene naponskih prilika u sistemu i do nemogućnosti nesmetanog rada istog [39].

Po tumačenju novije literature koja se bavi ovom temom, a koja je ključna u pogledu distributivnih mreža zbog sve većeg broja obnovljivih izvora električne energije i električnih vozila, izvodi se zaključak da će podaci dobijeni analizom hosting capacity biti mjera performansi mreže u budućnosti. Izradom te analize stekla bi se jasnija slika o efikasnosti mreže, iskorišćenosti mrežne infrastrukture kao i budućih potencijala vezanih za napredak u sferi priključenja energetskih izvora. Slika 17 prikazuje kako se mijenja odnos količine proizvedene električne energije u zavisnosti od primjene HC analize [4].



Slika 17. Uticaj HC analize na količinu proizvedene električne energije

Hosting capacity analiza podrazumijeva posmatranje uticaja priključenja distribuirane proizvodnje na određene parametre kao što su napon, tokovi snaga i granične vrijednosti opreme sistema. Ova analiza se može sprovesti na čvoru, sabirnici, trafostanici i na nivou cijelog sistema.

Prema [40], u svakoj analizi, pa i u ovoj, postoje određena ograničenja. Ograničenja vezana za hosting capacity (HC) se odnose na :

- Operativna ograničenja
- Pomoćne usluge
- Karakteristike distribuiranih izvora električne energije
- Karakteristike opterećenja
- Konfiguraciju sistema
- Ekonomiju

Operativna ograničenja su najvažnija ograničenja pri hosting capacity analizi jer obezbjeđuju bezbjedan i pouzdan rad sistema. Ona uključuju ograničenja napona, termička ograničenja opreme, standarde kvaliteta električne energije i ograničenja sistema zaštite. Ova ograničenja se obično predstavljaju kao ograničenja napona, struje i protoka snage u sistemu, tj. napon u svakom čvoru sistema mora biti unutar propisanog opsega isto kao što i struja kroz vod mora biti manja od najveće dopuštene struje voda.

Pomoćne usluge su usluge koje obezbjeđuje mreža kako bi se osigurao njen pouzdan rad. Ove usluge uključuju regulaciju frekvencije, kontrolu napona i podršku sistemu kontrolom reaktivne snage. Sposobnost distribuiranih izvora električne energije da na neki način pružaju pomoćne usluge može se smatrati funkcijom kapaciteta i upravljivosti istih.

Karakteristike distribuiranih izvora električne energije koje uključuju njihov tip, kapacitet, profil proizvodnje i varijabilnost, imaju značajan uticaj na hosting capacity analizu. Prethodno navedene karakteristike izvora su važne da bi se osiguralo da se isti mogu integrisati u sistem bez ikakvih problema. Ove karakteristike se mogu predstaviti kao skup parametara, kao što su izlazna snaga izvora, varijabilnost te izlazne snage i faktori njihovog kapaciteta.

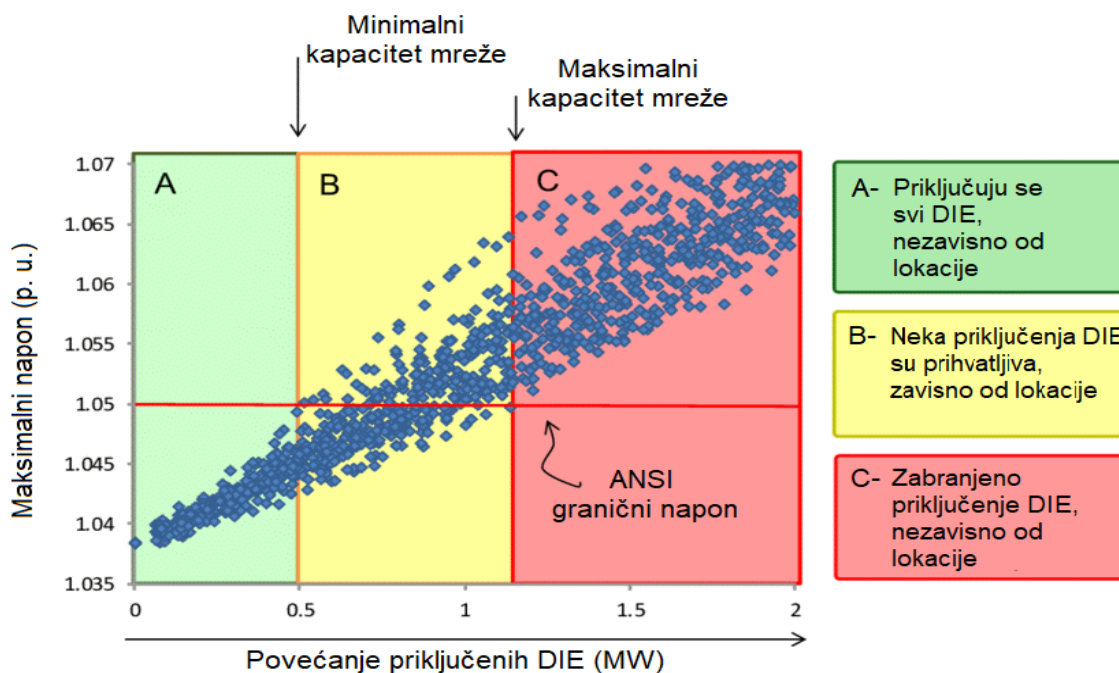
Karakteristike opterećenja oslikavaju faktori kao što su profili opterećenja, raznolikost i varijabilnost istog. Ti faktori značajno utiču na raspoloživi kapacitet za priključenje distribuiranih izvora električne energije na mrežu. Analizom podataka opterećenja i modelovanjem sistema moguće je odrediti vremenske i prostorne varijacije pri potražnji električne energije. Ovi parametri se prilikom hosting capacity analize mogu predstaviti kao količina potražnje električne energije i varijabilnost iste.

Konfiguracija i topologija distributivnog sistema utiče i na hosting capacity analizu. To obuhvata prostornu raspodjelu distribuiranih izvora, lokaciju postojeće infrastrukture (trafostanice, vodovi itd.) kao i raspored potrošača i ostalih sistemskih komponenti. Za procjenu sposobnosti i kapaciteta sistema koriste se tehnike modelovanja i rekonfiguracije mreže kao i analiza tokova snaga kao jedna od glavnih zadataka prilikom hosting capacity analize. Ovi faktori se mogu predstaviti kao skup parametara, kao što su broj i lokacija distribuiranih izvora električne energije, broj i lokacija trafostanica, dužina i kapacitet vodova kao i vremenske i prostorne odrednice.

I na kraju, prema prethodno navedenoj literaturi [40], kada su ekonomska ograničenja u pitanju važno je naglasiti da postojeća mrežna infrastruktura i zakonska regulativa čine osnovu za poboljšanje kapaciteta mreže (hosting capacity). Ekonomski aspekt integracije distribuiranog izvora je takođe važno razmotriti pri ovom postupku. Troškovi distribuiranih izvora, troškovi nadogradnje i unaprjeđenja postojeće mrežne infrastrukture kao i troškovi izgrađenog opterećenja se moraju biti uzeti u obzir.

Uzimajući u obzir sva prethodno navedena ograničenja, potrebno je matematički i demokratski pristupiti rješavanju usputnih problema zarad postizanja visokog nivoa tačnosti pri procjeni kapaciteta mreže (hosting capacity).

Glavni izazovi koji se susrijeću jesu nemogućnost estimacije dovoljne tačnosti o broju i mjestu distribuiranih izvora električne energije koji će se priključiti na mrežu a čiji lokalizovan i brz rast može premašiti kapacitet mreže kao i standardni regulatorni i ekonomski problemi u smislu investicija za unaprjeđenje ili nadogradnju mreže i implementaciju naprednih tehnologija bez kojih ovo ne bi bilo moguće. Slika 18 prikazuje opseg implementacije DG u zavisnosti od ograničenja [56].



Slika 18. Opseg implementacije DG u zavisnosti od ograničenja

Kako bi se napravila procjena da li, i koliko, određena mreža može da primi distribuiranih izvora električne energije i kako je moguće unaprijediti mrežu u cilju što većeg kapaciteta za prijem distribuiranih izvora, važno je navesti određene pristupe i korake:

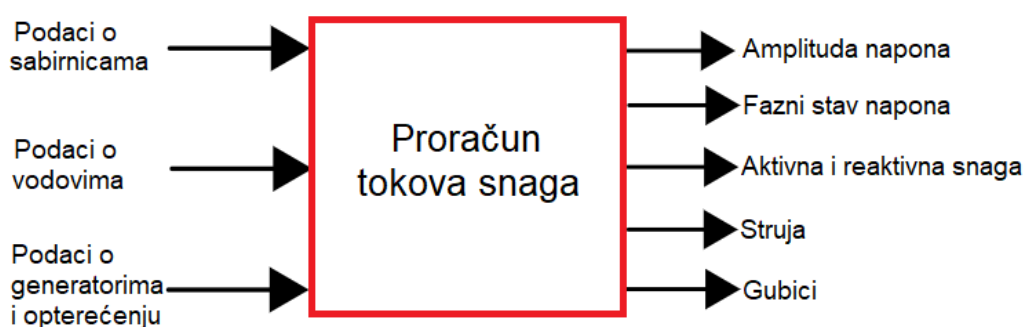
- Proračun statičkog i dinamičkog kapaciteta mreže ima za cilj analizu sposobnosti mreže da prihvati distribuirane izvore uzimajući u obzir najgore slučajeve kao npr. slučaj maksimalnog ili minimalnog opterećenja usljed maksimalne proizvodnje i analizu kapaciteta mreže u slučaju realnih varijacija opterećenja, proizvodnje i ostalih uslova.
- Usljed porasta napona prilikom priključenja distribuiranih izvora energije na mrežu, do njegovog smanjenja može doći korišćenjem pametnih invertora, regulatora napona kao i transformatora sa promjenljivim prenosnim odnosom čime se utiče na reaktivnu snagu i kontrolu napona.
- Kapacitet mreže se može povećati i integracijom uređaja za skladištenje električne energije što ujedno može pomoći u sprječavanju naponskih odstupanja van dozvoljenih limita.
- Monitoring i mrežna kontrola, pomoću napredne mjerne infrastrukture, omogućavaju praćenje parametara u realnom vremenu čime je moguće vršiti trenutnu optimizaciju što dovodi do povećane pouzdanosti sistema.
- Poboljšanje postojeće mrežne infrastrukture ili izgradnja nove, a što može podrazumijevati rekonfiguraciju mreže, zamjenu transformatora ili povećanje presjeka provodnika takođe može dovesti do povećanja kapaciteta mreže (hosting capacity)

U slučaju da je mreža dostigla svoj maksimum u smislu mogućnosti prihvatanja distribuiranih izvora električne energije kao što su solarne ili vjetro elektrane i dr. onda je potrebno uvesti ograničenje budućih priključenja istih kao i potencijalno ograničavanje proizvodnje postojećih izvora u određenim momentima u kojima može doći do preopterećenja mreže. Dostizanje tog maksimuma na nivou određenog distributivnog sistema povlači za sobom i smanjenje podsticaja za ugradnju tih vrsta izvora kao i moguće uvođenje tarifa za njihovu integraciju ili pak subvencija u smislu unaprjeđenja mreže a sve od strane elektroenergetskih kompanija i regulatora. Sve prethodno navedeno može imati negativan uticaj na dinamiku tržišta kao i na

ekonomsku isplativost projekata uvođenja sistema obnovljive energije u mrežu. Razne su ekološke i socijalne koristi koje mogu proizaći iz ovih projekata što naglašava važnost analize hosting capacity čime se na neki način omogućava dostizanje pravde u energetskej sferi na način što će manje razvijene sredine i zajednice imati potencijalnu korist od energetske tranzicije u kojoj mogu da učestvuju. Da bi se ostvarilo sve što je navedeno, potrebno je ići u korak sa vremenom i pravovremeno usvajati zakone i procedure koje bi omogućavale brže i efikasnije sprovođenje u djelo svega što je obuhvaćeno planovima optimizacije i priključenja distribuiranih izvora električne energije na sistem.

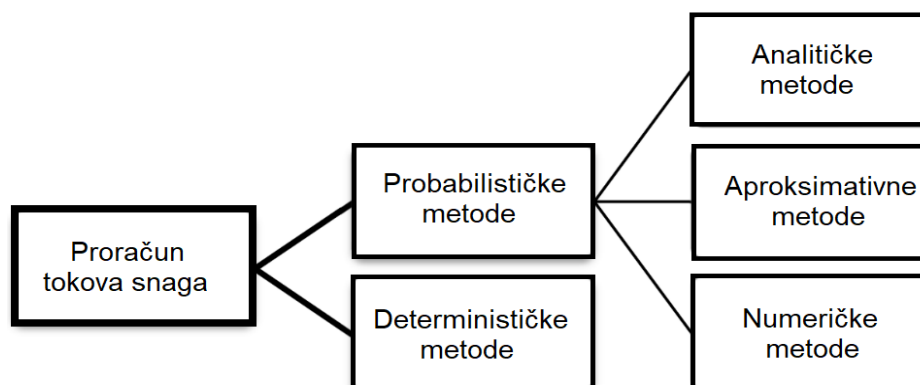
4.3. Proračun tokova snaga

Analiza tokova snaga elektroenergetskog sistema se koristi za određivanje rješenja protoka snaga u granama i čvorovima mreže u ustaljenom režimu rada [41]. Proračun, tj. analiza tokova snaga je jedan od najznačajnijih postupaka u dijelu analize elektroenergetskih sistema. Rezultati dobijeni tim postupkom predstavljaju osnov solidnog planiranja budućih i optimalne iskorišćenosti postojećih sistema. Po završetku analize tokova snaga stiže se jasniji uvid u potrebu za planiranjem nove infrastrukture, određivanje parametara značajnih za tu istu infrastrukturu u koju spadaju novi proizvodni kapaciteti, transformatorska postrojenja, vodovi, sinhronne mašine i baterije kondenzatora kao i ostala sredstva za kompenzaciju reaktivne snage. Glavni rezultati koje nam obezbjeđuje proračun tokova snaga jesu parametri napona svih čvorova koji obuhvataju amplitudu i fazni ugao napona kao osnovne vrijednosti, protok aktivne i reaktivne snage kroz tu mrežu kao i vrijednosti struja kroz istu. Pored ovih, veliki značaj proračuna tokova snaga ogleda se u identifikaciji problema kao što su prenaponi ili podnaponi u određenim djelovima mreže, problemi sa stabilnošću napona, visoki gubici snage u sistemu kao i preopterećenje transformatora ili nekih vodova. Između ostalog, mogu poslužiti za donošenje odluka u realnom vremenu kao što su preusmjeravanje tokova snaga radi smanjenja uticaja na potrošače, upravljanje kvarovima, kontrola reaktivne snage i napona u različitim djelovima mreže itd. Ulazni podaci se sastoje od konfiguracije same mreže koja je predmet analize, podataka generatora i potrošača, podataka o prenosnom odnosu transformatora koji služe za regulaciju kao i od podataka o sredstvima koja služe za kompenzaciju reaktivne snage, od kojih su neki prikazani na slici 19 zajedno sa izlaznim podacima.



Slika 19. Ulazni i izlazni podaci prilikom proračuna tokova snaga

Razlikuju se dva tipa proračuna tokova snaga. Prvi tip je deterministički a drugi probabilistički. Kako obnovljivi izvori energije postaju sve više zastupljeni u modernom svijetu tako zajedno sa tim postaju sve više zastupljene probabilističke metode. Trenutno, za najbolje rezultate koristi se kombinacija ova dva pristupa kako za planiranje budućih tako i za optimalni pogon postojećih mreža. Na slici 20 prikazana je podjela metoda za proračun tokova snaga.



Slika 20. Podjela metoda za proračun tokova snaga

4.3.1. Determinističke metode proračuna tokova snaga

Deterministički proračuni tokova snaga su više tradicionalni i najčešće korišćeni i kao takvi zahtijevaju prethodno poznate vrijednosti ulaznih podataka kao što su topologija mreže, potrošnja, proizvodnja itd. Ovakav pristup se više koristi kod analize stabilnosti mreža, planiranja i dizajna mreža, optimizacije postojećih situacija kao i svih drugih situacija gdje su poznate karakteristike sistema. Za rješavanje problema tokova snaga, koriste se precizni matematički modeli koji pomažu tačnijem predviđanju istih. Najpopularnija metoda jeste Newton-Raphson zbog svoje adaptivnosti, pouzdanosti i preciznosti a pored nje najviše u upotrebi je i Gauss-Seidel metoda. Mane Newton-Raphson i Gauss-Seidel metode su proračuni matrice Jakobijana i Y matrice čija inverzija za velike sisteme koji se obrađuju može biti vrlo komplikovana i zahtijevati velike računarske resurse.

Determinističke metode za proračun tokova snaga, koje su najčešće korišćenje, jesu:

- Gauss – Seidel metoda za proračun tokova snaga
- Newton – Raphson metoda za proračun tokova snaga
- Fast Decoupled metoda za proračun tokova snaga
- DC load flow metoda za proračun tokova snaga

Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i mane a koju treba izabrati zavisi od veličine sistema, dostupnosti resursa kao i specifičnih zahtjeva vezanih za sami proračun.

4.3.2. Probabilističke metode proračuna tokova snaga

Probabilistički proračuni tokova snaga osim poznatih podataka uzimaju u obzir i određene nepoznate podatke kao što su neizvjesnosti u potrošnji i proizvodnji, greške koje se događaju u prikupljanju podataka pomoću mjernih uređaja itd. Ovaj pristup se više koristi za procjenu rizika i pouzdanosti, planiranje sistema kada su uzmu u obzir određene neizvjesnosti koje su povoljne pri analizi uticaja obnovljivih izvora energije zbog promjenljivog opterećenja i nepredvidljivih elemenata. Za sve gore navedeno koriste se statističke tehnike i teorija vjerovatnoće. Probabilističke metode se sastoje od 3 grupe a to su analitičke, numeričke i metode aproksimacije. Probabilistički pristup, kao takav, zahtijeva veće računarske resurse ali pruža detaljniji prikaz sistema sa određenim neizvjesnostima koje su uzete u obzir. Probabilističke metode za proračun tokova snaga obuhvataju Monte Carlo metodu, metode zasnovane na momentima, Latin Hypercube Sampling i stohastičke optimizacione tehnike među koje spadaju genetski algoritmi, stohastičko programiranje itd. a sve to spada u tri grupe probalističkih metoda koje su prethodno navedene [42, 43].

Monte Carlo metoda se koristi za rješavanje problema tokova snaga (najčešće u sistemima sa promjenljivim opterećenjem i proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije) i za analizu pouzdanosti sistema. Koraci Monte Carlo metode se sastoje od definisanja slučajnih ulaznih promjenljivih, generisanja velikog broja nasumičnih vrijednosti neke od promjenljivih za koje će se izračunati vrijednost u svakoj iteraciji. Nakon dobijenih rezultata radi se statistička obrada istih i u krajnjem slučaju povećanje broja uzoraka za postizanje željenje tačnosti. Smatra se da je konvergencija dostignuta kada se dostignu stabilne vrijednosti [44].

Aritmetička sredina uzoraka računa se pomoću formule (1) [57]:

$$\bar{X}_N := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (1)$$

pri čemu je N broj uzoraka (iteracija) a X_i pojedinačni elementi skupa.

Standardna greška računa se pomoću formule (2) [44]:

$$\eta = \frac{\delta_i}{\sqrt{N_c}} \quad (2)$$

gdje je δ_i standardna devijacija a N_c broj iteracija i onda kada je $\eta \leq \epsilon_i$, smatra se da je došlo do konvergencije. ϵ je dozvoljena greška i njena vrijednost zavisi od situacione primjene.

4.4. Proračun tokova snaga u distributivnim mrežama

Proračun tokova snaga distributivnih mreža u odnosu na prenosne mreže se razlikuje u pristupu i metodama zbog različitih potreba i karakteristika mreže.

Distributivne mreže karakteriše velika dimenzionalnost u odnosu na prenosne mreže, najčešće radialne konfiguracije ili slabo upetljane. Glavni problemi kod proračuna tokova snaga distributivnih mreža jesu: dimenzionalnost mreže (broj čvorova i elemenata mreže), nepovoljna struktura mrežnih matrica i numerička stabilnost postupka tj. problem divergencije. Koja metoda će se koristiti zavisi od specifičnosti situacije za koju se koristi kao i same uravnoteženosti mreže [45]. Konfiguracije mreže poznaju izuzetke pa usljed raznih uslova konfiguracija distributivne mreže može varirati u zavisnosti od potrebe za sigurnim napajanjem potrošača. Jedna od glavnih karakteristika distributivnih mreža jeste to što je najveće opterećenje na krajnjim čvorovima i to što su grane manje povezane u odnosu na prenosni sistem koji karakteriše velika međusobna povezanost grana i složena povezanost čvorova. Zbog same konfiguracije prenosnih mreža koriste se sofisticiranije metode za proračun tokova snaga čija konvergencija može biti sporija zbog složenosti mreže i njenih nelinearnih karakteristika, što vuče za sobom veći broj iteracija i veće računarske resurse koji bi sve to mogli da iznesu, u odnosu na distributivne mreže zbog njihove relativno jednostavne konfiguracije.

Najveća pažnja pri obradi metoda za proračune tokova snaga će biti posvećena onim metodama koje su najzastupljenije a što se prvenstveno odnosi na Newton-Raphson pa zatim na Gauss-Seidel metodu, dok će ostale biti u manjoj mjeri obrađene.

4.4.1. Newton – Raphson

Razvijanjem nelinearnih jednačina u Tejlorov red i rješavanjem istih kroz iteracije sve dok se ne dobije zadovoljavajući nivo tačnosti predstavlja suštinu ove metode.

Osnovni matematički model se dobija pomoću formule (3) [45]:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{pmatrix} \quad (3)$$

gdje su J_1 , J_2 , J_3 i J_4 matrice Jakobijana čiji postupak izračunavanja je prikazan kasnije.

Proračun injektirane aktivne (4) i reaktivne (5) snage [41]:

$$P_{ij} = \sum_{j=1}^{j \in N_i} |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (4)$$

$$Q_{ij} = \sum_{j=1}^{j \in N_i} |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (5)$$

Određivanje odstupanja (neslaganja) aktivne (6) i reaktivne (7) snage od specificiranih, odnosno zadatih vrijednosti [46]:

$$\Delta P_i = P_i^{\text{spec}} - P_i^{\text{calc}} \quad (6)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{\text{spec}} - Q_i^{\text{calc}} \quad (7)$$

gdje su specificirane vrijednosti razlike između proizvedene i potrošene aktivne/reaktivne snage.

Formiranje matrice Jakobijana se sastoji od parcijalnih derivacija aktivne (8) (9) i reaktivne (10) (11) snage po modulima napona i faznog stava tj.

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_i} = \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik})) \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} = -\frac{V_i}{V_j} \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik})) \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_i} = \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik})) \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} = \frac{V_i}{V_j} \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik})) \quad (11)$$

Kada se izračuna matrica Jakobijana, koristi se za ažuriranje vrijednosti modula napona i faznog stava (12) sve dok se ne dostigne vrijednost manja od vrijednosti definisane tolerancije [46]:

$$\begin{pmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = -J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (12)$$

Vrijednosti se ažuriraju na sledeći način (13) (14) [47]:

$$V_j^{\text{new}} = V_j^{\text{old}} + \Delta V_j \quad (13)$$

$$\theta_j^{\text{new}} = \theta_j^{\text{old}} + \Delta \theta_j \quad (14)$$

Za distributivne mreže pogodna za korišćenje je i Fast Decoupled Load Flow metoda koja predstavlja modifikovanu (pojednostavljenu) verziju Newton-Raphson metode za bržu konvergenciju kod velikih mreža. To se postiže tako što se koriste "odvojene" matrice,

umjesto cijele matrice Jakobijana, čime se smanjuje kompleksnost računanja a samim tim povećava brzina i štedi vrijeme rješavanja problema. Mana FDLF metode je što pruža manje tačna rješenja od Newton-Raphson metode pa je njena primjena, u situacijama gdje je potrebna visoka preciznost, ograničena.

4.4.2. Gauss-Seidell

Ova metoda je jedna od klasičnih metoda za proračun tokova snaga u elektroenergetskim sistemima. Pogodna je za rješavanje sistema linearnih jednačina ali se može prilagoditi i za nelinearne problem tokova snaga. Glavna ideja ove metode je korišćenje prethodne vrijednosti napona za računanje nove u čvorovima. Započinje se inicijalizacijom napona (modula i faznog stava) u čvorovima (obično ta vrijednost iznosi 1 p.u.), osim balansnog čvora. Nakon inicijalizacije vrši se ažuriranje vrijednosti napona za svaki čvor koristeći formulu (15) [48]:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(S_i^* - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \quad (15)$$

Ovaj postupak se ponavlja, za svaki čvor, sve dok se ne zadovolji zadati kriterijum konvergencije, koji je prikazan formulom (16) [45]:

$$|V_i^{(k-1)} - V_i^{(k)}| \leq \delta \quad (16)$$

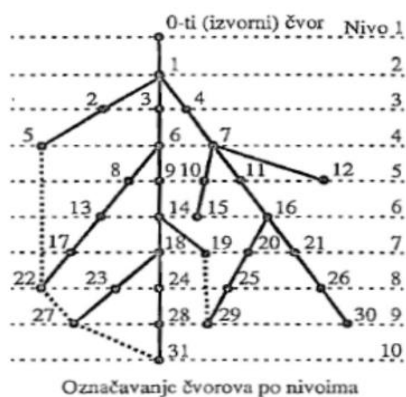
Uobičajeno odstupanje (δ) iznosi 10^{-5} do 10^{-4} .

Prednosti ove metode jesu jednostavnost, fleksibilnost u smislu korišćenja za razne mreže i brzina konvergencije za jednostavnije mreže. Mane su spora konvergencija za velike mreže što takođe zavisi od izbora početnih vrijednosti parametara kao i mogućnost divergencije.

4.4.3. Shirmohammadijev metod

Ova metoda se koristi za rješavanje sistema jednačina koje se dobijaju primjenom Kirhofovih zakona i vrlo je efikasna za primjenu u radijalnim mrežama i mrežama koje su slabo povezane [49].

Pored navedenih prednosti, kao i ostale metode koje se koriste za proračune tokova snaga, i ova ima određene mane. Mane se sastoje od toga što nije moguća primjena ove metode na mrežama koje nijesu radijalne, manja efikasnost u slučaju nelinearnih jednačina, osjetljivost rezultata na inicijalne vrijednosti, mogućnost zanemarivanja gubitaka u određenim aplikacijama što može dovesti do netačnog rezultata kao i rano definisanje modela i parametara što je u praksi veoma izazovno. Postupak se sastoji od zadavanja inicijalnih napona u čvorovima nakon čega se računaju struje injektiranja pa se backward i forward sweep-om računaju i ažuriraju vrijednosti struje i napona, respektivno. Hijerarhijski model primjene je prikazan na slici 21 [45].

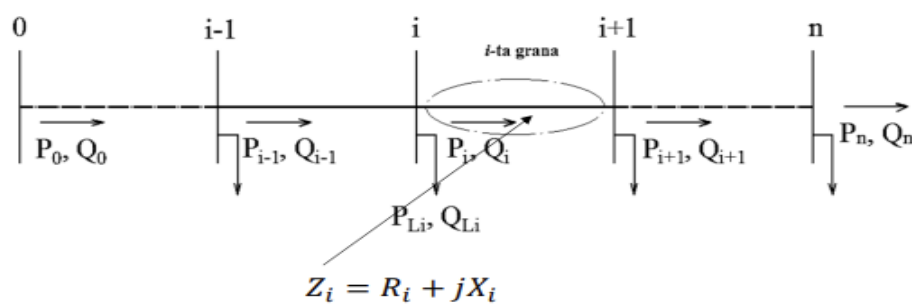


Slika 21. Hijerarhija čvorova

4.4.4. DistFlow metod

Ova metoda se koristi samo za radijalne distributivne mreže čija osnova je formula za pad napona na kratkom vodu. Najveća prednost DistFlow metode u odnosu na tradicionalne metode kao što Newton-Raphson i Gauss-Seidel jeste brzina konvergencije. Tradicionalne metode zahtijevaju formiranje matrice admitansi čvorova, dok kod Newton-Raphson metode se vrši i inverzija matrica Jakobijana što pored brzine predstavlja i veću računsku složenost problema [50].

Na slici 22 prikazan je tok snaga radijalne mreže kao i formula za računanje impedanse i -te dionice [45].



Slika 22. Tokovi snaga radijalne mreže

Postupak se uglavnom sastoji od modelovanja mreže (što podrazumijeva identifikaciju elemenata i definisanje parametara sistema). Zatim se postavljaju jednačine ravnoteže snage koje uključuju aktivnu i reaktivnu snagu, uz korišćenje Kirhofovih zakona. Nakon postavljanja inicijalnih vrijednosti vrši se proračun po iteracijama pa se provjerava da li je ispunjen kriterijum konvergencije.

Kriterijum konvergencije prikazan je formulom (17) [45]:

$$\left(|V_i^{(k)} - V_i^{(k-1)}| \right) \leq \delta \quad (17)$$

Pored DistFlow metode, postoji i Simplified DistFlow čiji je cilj ubrzanje cijelog postupka za složenije mreže koje zahtijevaju veći broj koraka. To se postiže određenim aproksimacijama kao i neuključivanjem svih detalja i nelinearnih efekata. Metoda je brža i jednostavnija ali manje precizna od DistFlow metode pa njena primjena zavisi od vrste problema [45].

5. Primjer implementacije PSS SINICAL u cilju optimizacije tehničkih uslova za priključenje

U ovom poglavlju pažnja je posvećena analizi specifičnih situacija na primjeru seoske i gradske mreže a koje se odnose na optimizaciju tehničkih uslova za priključenje solarnih elektrana i koje bi na najbolji način mogle prikazati kako se mijenjaju naponske prilike i raspoloživi kapacitet mreže u zavisnosti od prostorne raspodjele i snage solarnih elektrana.

Razmatrani slučajevi priključenja distribuiranih izvora energije, u ovom slučaju solarnih elektrana (PV) koje su obrađivane zbog njihove rasprostranjenosti i lakše mogućnosti priključenja na simetričnu niskonaponsku mrežu (što omogućava jednostavniju analizu i osigurava bolju efikasnost i stabilnost mreže), izabrani su na osnovu dosadašnjeg iskustva u praksi i mogućnosti prikazivanja razlika koje iste prate.

Obavljena je uporedna analiza seoske i gradske mreže, koristeći PSS SINICAL, prateći određeni broj parametara na osnovu kojih se mogu lako uočiti razlike u u zavisnosti od slučaja koji se posmatra.

Kao specifični slučajevi, prilikom analize seoske i gradske mreže, uzete su sledeće situacije:

1. Priključenje solarnih elektrana (PV) u svim potrošačkim čvorovima, koje su u pogonu istovremeno, čije snage su jednake vrijednosti snage koja je dobijena kao maksimalna prilikom obavljanja hosting capacity analize (HC).
2. Priključenje solarnih elektrana (PV) u svakom drugom potrošačkom čvoru, koje su u pogonu istovremeno, čije snage su jednake vrijednosti snage koja je dobijena kao maksimalna prilikom obavljanja hosting capacity analize (HC).
3. Priključenje solarnih elektrana (PV) u prvih 5 (pet) potrošačkih čvorova, koje su u pogonu istovremeno, čije snage su jednake vrijednosti snage koja je dobijena kao maksimalna prilikom obavljanja hosting capacity analize (HC).
4. Priključenje solarnih elektrana (PV) u krajnjih 5 (pet) lokalno bliskih (geografski) potrošačkih čvorova, koje su u pogonu istovremeno, čije snage su jednake vrijednosti snage koja je dobijena kao maksimalna prilikom obavljanja hosting capacity analize (HC).
5. Priključenje solarnih elektrana (PV) u krajnjih 5 (pet) proizvoljno odabranih potrošačkih čvorova, koji nijesu lokalno bliski, koje su u pogonu istovremeno, čije snage su jednake vrijednosti snage koja je dobijena kao maksimalna prilikom obavljanja hosting capacity analize (HC).

Svi rezultati dobijeni prilikom analize prethodno navedenih slučajeva, upoređeni su sa podacima o mreži koji su dobijeni analizom stanja mreže prije priključenja istih. Za svaki od prethodno navedenih slučajeva obavljena je analiza prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (Hosting Capacity - HC), poštujući pravila i granične vrijednosti iz [9], koja je pružila podatak o mogućim snagama solarnih elektrana koje bi se priključile na seosku ili gradsku mrežu, u zavisnosti od ulaznih podataka za iste. Prethodno pomenuta prihvatna sposobnost mreže za distribuiranu proizvodnju (Hosting Capacity – HC) ima za cilj pronalaženje maksimalne snage u čvoru, koju sistem može prihvatiti tako da se ispoštuju tehnička ograničenja. Analiza je obavljena tako što se za svaki slučaj prostorne raspodjele solarnih elektrana, njihova instalisana snaga povećavala za 100W u svakoj iteraciji sve dok se nije dostigla maksimalna vrijednost tolerancije nekog od tehničkih ograničenja. Tehnička ograničenja pri ovoj vrsti analize odnose se na napon, struju, snagu distribuiranih izvora itd.

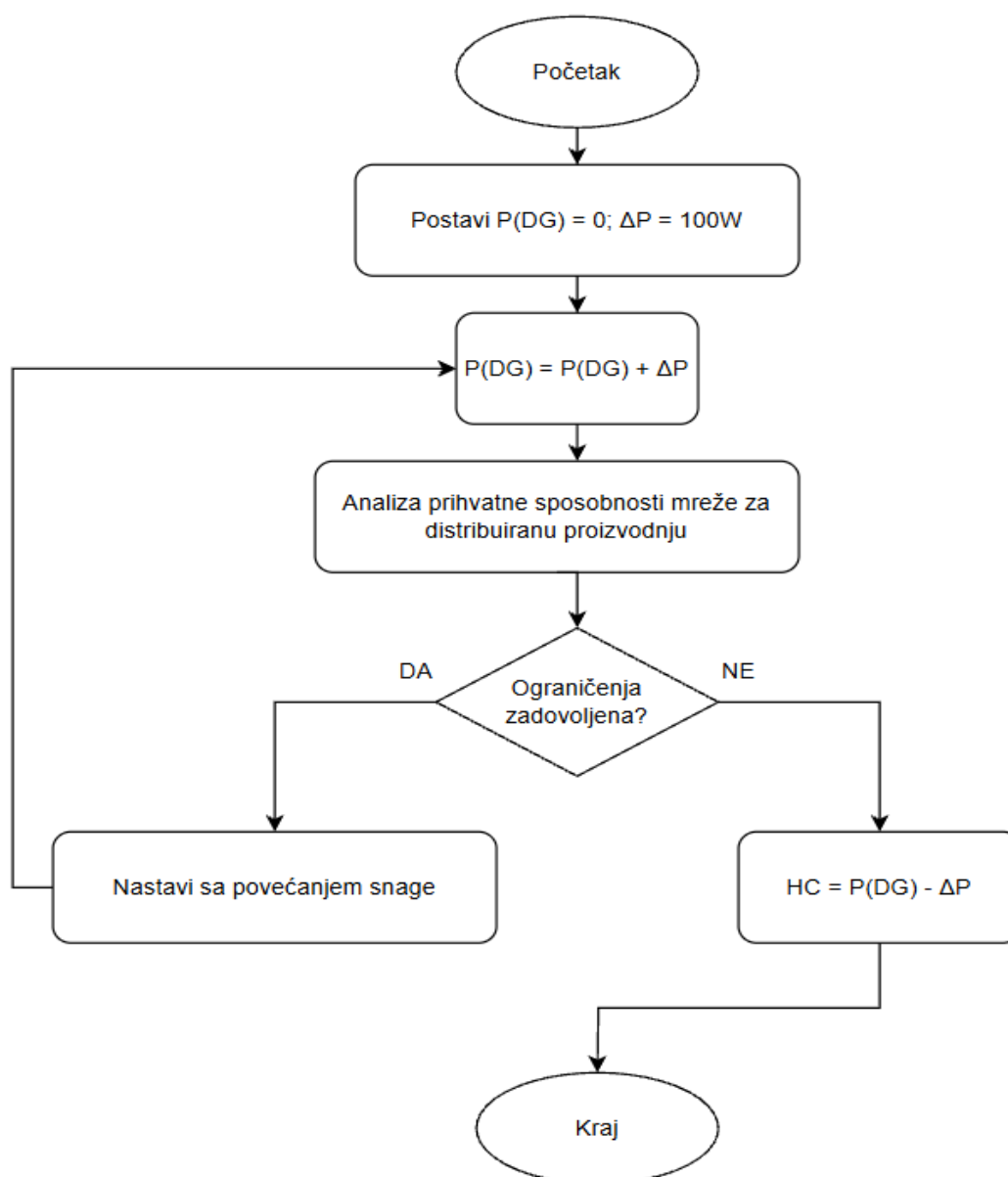
Maksimalna ukupna snaga distribuiranih izvora električne energije se suštinski računa pomoću formule (18) [58].

$$f = \max \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{DG,i}}{\cos \varphi_i} \right) \right) \quad (18)$$

Gdje je $P_{DG,i}$ snaga i -te solarne elektrane, n je broj solarnih elektrana, $\cos \varphi_i$ je faktor snage i -te elektrane a f je maksimalna ukupna priključna snaga solarnih elektrana.

Prilikom analize prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju, pomoću PSS SINCAL softverskog paketa, modeluje se ukupno opterećenje i proizvodnja kroz detaljne proračune tokova snaga koji su prikazani pomoću formula (4) i (5), iterativno povećavajući $P_{DG,i}$ dok se ne prekorače navedena tehnička ograničenja.

Algoritam analize prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju, prethodno opisan, prikazan je na slici 23.



Slika 23. Algoritam analize prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (Hosting Capacity – HC)

Karakteristike seoske i gradske mreže razlikuju se u konfiguraciji same mreže, broju potrošača, presjeku podzemnih i nadzemnih vodova, opterećenju mreže, udaljenosti potrošača od trafostanice, tipu opterećenja, faktoru snage itd.

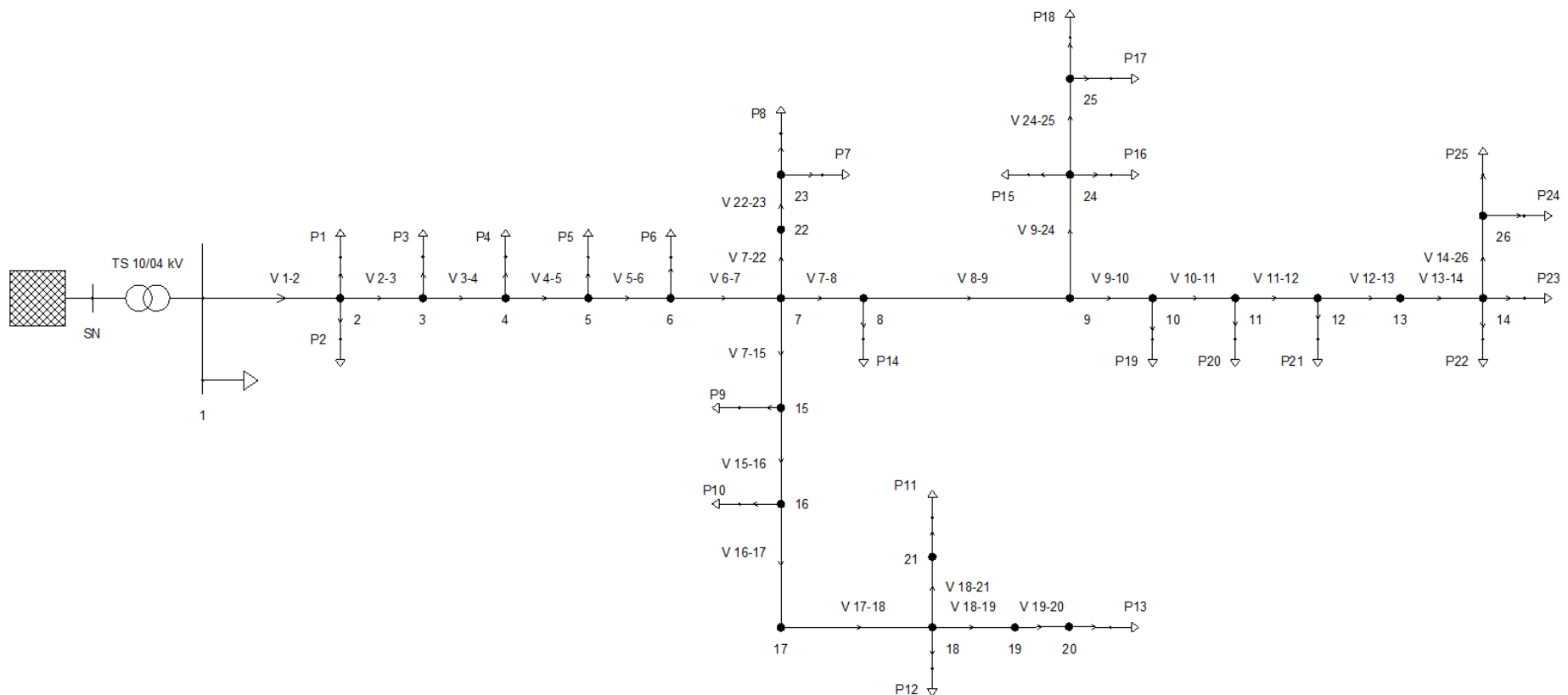
Podaci o karakteristikama seoske i gradske mreže, rezultati dobijeni prilikom analize specifičnih slučajeva kao i uporedna analiza istih, prikazani su tabelarno i grafički.

5.1. Seoska mreža

Seoska mreža koja je analizirana u ovom radu jeste hibrid realne mreže koja obuhvata 25 potrošača na izvodu koji je prikazan na jednopolnoj šemi kao i drugi izvod čije je opterećenje prikazano kao "ostalo opterećenje". Ova mreža se karakteriše velikim udaljenostima potrošača od trafostanice, kao i velikim dužinama unutrašnjih priključaka a što se odnosi na udaljenost potrošača od mjesta priključenja (najčešće stuba NN mreže u ovoj konfiguraciji). Većina vodova su nadzemni, čiji poprečni presjeci su manji nego kod gradske mreže. Upravo zbog ovakvih karakteristika seoske mreže, najčešći limitirajući faktor jeste pad napona na vodovima iste. To je posljedica velike udaljenosti potrošača i manjeg poprečnog presjeka vodova nego što je slučaj kod gradske mreže. Kada je u pitanju kategorija potrošnje, u konkretnoj mreži većina potrošača je kategorije "domaćinstvo" dok je manji dio kategorije "ostala potrošnja". U skladu sa kategorijom potrošnje uzima se faktor jednovremenosti na nivou mjernog mjesta, iskustveno i koristeći pravilnike, a koji takođe zavisi i od vrste potrošača (uređaja čija se utrošena električna energija obračunava preko tog brojila). Potrošači u seoskim mrežama su uglavnom mali potrošači, obična domaćinstva koja tokom zime ne koriste električnu energiju za grijanje dok je to uobičajeno kod potrošača u gradskim sredinama. Transformatori u trafostanicama koje se nalaze u seoskim područjima su manje instalisane snage i to su obično stubne ili portalne trafostanice čija snaga se kreće od 50kVA do 250(400)kVA. Rjeđi su primjeri blindiranih i montažno-betonskih trafostanica čija snaga više odgovara gradskom konzumu. U slučaju priključenja velikih potrošača kategorije potrošnje "ostala potrošnja" u seoskom području, u zavisnosti od tražene snage, razmatra se stavljanje u pogon novog izvoda sa postojeće trafostanice ili čak i izgradnja sopstvene trafostanice za tog potrošača. Kapacitet postojeće trafostanice za priključenje novih potrošača zavisi od maksimalnog opterećenja iste tokom prethodnih godina kao i od planiranog priključenja novih potrošača koji su potpisali Ugovor o izgradnji infrastrukture za priključenje i priključenju (važeći dokument u vrijeme pisanja ovog rada) a koji još uvijek nijesu završili taj postupak. Mane distributivne mreže u seoskim područjima jesu visoki troškovi za izgradnju infrastrukture zbog razuđenosti potrošača što podrazumijeva mnogo veća ulaganja u opremu i materijal za izvođenje takvih zadataka kao i malo iskorišćenje te infrastrukture zbog manjeg broja korisnika. Tu, naravno, spada i održavanje tih distributivnih mreža tokom perioda nestabilnih vremenskih prilika ali i redovnog održavanja. Imajući u vidu da je seoska mreža dominantno vazдушna, to automatski dovodi do povećanja opasnosti od nelegalnih priključenja čiji je broj danas veoma značajan a nad kojima se ne vrši adekvatna kontrola. U nastavku je prikazana jednopolna šema seoske mreže na kojoj je vršena analiza.

Jednopolna šema seoske mreže bez PV

Na jednopolnoj šemi seoske mreže prikazane su SN mreža i NN mreža koja obuhvata čvorove mreže, potrošačke čvorove kao i nazive vodova. Transformator je 10/0.4(0.42) kV snage 160kVA. Mreža je u normalnom režimu rada, simetrična i podaci o njenim parametrima su uzeti za dan 15. maj 2024. godine u 11:00h. Datum i vrijeme su odabrani zbog stabilnih meteoroloških uslova što predstavlja reprezentativan dan u godini (van ekstremnih uslova).



Tabelarni prikaz podataka parametara mreže

Tabela 4. Podaci o parametrima seoske mreže

Naziv voda	Tip kabla	Dužina [m]	Poprečni presjek provodnika [mm ²]	Broj provodnika	Način vođenja
V 15-16	AsXSn	48	16	4x	Vazdušni vod
V 3-4	AsXSn	46,4	70	4x	Vazdušni vod
V 18-21	AsXSn	60	35	4x	Vazdušni vod
V 19-20	AsXSn	42	35	4x	Vazdušni vod
V 18-19	AsXSn	105	35	4x	Vazdušni vod
V 16-17	AsXSn	85	35	4x	Vazdušni vod
V 14-26	AsXSn	35	35	4x	Vazdušni vod
V 13-14	AsXSn	41	35	4x	Vazdušni vod
V 12-13	AsXSn	195	35	4x	Vazdušni vod
V 11-12	AsXSn	42	35	4x	Vazdušni vod
V 10-11	AsXSn	28	35	4x	Vazdušni vod
V 9-10	AsXSn	44	35	4x	Vazdušni vod
V 24-25	AsXSn	37,2	35	4x	Vazdušni vod
V 9-24	AsXSn	85,3	35	4x	Vazdušni vod
V 8-9	AsXSn	43,5	35	4x	Vazdušni vod
V 5-6	AsXSn	49,2	70	4x	Vazdušni vod
V 2-3	AsXSn	37	70	4x	Vazdušni vod
V 4-5	AsXSn	37	70	4x	Vazdušni vod
V 1-2	AsXSn	50	70	4x	Vazdušni vod
V 7-15	AsXSn	74	35	4x	Vazdušni vod
V 17-18	AsXSn	83	35	4x	Vazdušni vod
V 7-8	AsXSn	65,2	35	4x	Vazdušni vod
V 22-23	AsXSn	40	35	4x	Vazdušni vod
V 7-22	AsXSn	80	35	4x	Vazdušni vod
V 6-7	AsXSn	40,3	70	4x	Vazdušni vod

Tabelarni prikaz podataka o potrošačima seoske mreže

Tabela 5. Podaci o potrošačima seoske mreže

Potrošač	Snaga potrošača P [kW]	cosφ
P1	1,44	0,98
P13	0,47	0,98
P11	0,12	0,98
P12	0,35	0,98
P10	1,26	0,98
P22	0,5	0,98
P23	0,31	0,98
P24	1,69	0,98
P25	0,07	0,98
P21	0,9	0,98
P20	0,8	0,98
P19	0,29	0,98
P17	2,3	0,98
P15	1,22	0,98
P16	2,12	0,98
P8	0,28	0,98
P2	2,9	0,98
P3	1,44	0,98
P4	0,56	0,98
P5	0,9	0,98
P6	1,31	0,98
Ostalo opterećenje	33	0,98
P9	3,2	0,98
P18	1,07	0,98
P14	0,5	0,98
P7	0,12	0,98

Vrijednost napona u čvorovima

U tabeli su prikazane vrijednosti napona u kV u čvorovima seoske mreže za karakteristične slučajeve. Vrijednosti snaga u čvorovima dobijene su analizom prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (HC) a da pritom ne dođe do prekoračenja tehničkih ograničenja.

Tabela 6. Vrijednosti napona u čvorovima za karakteristične slučajeve seoske mreže

Čvor	Prije priključenja PV (V [kV])	U svakom po 1,076 KW PV (Ukupno 26,9kW) (V [kV])	u 5 krajnjih lokalno bliskih po 3,029 kW PV (Ukupno 15,145kW) (V [kV])	Svaki drugi po 3,029kW PV (Ukupno 39,37kW) (V [kV])	5 proizvoljnih krajnjih po 4,982kW PV (Ukupno 24,91kW) (V [kV])	5 sa početka po 26,462kW PV (132,31kW) (V [kV])
6	0,415	0,42	0,418	0,423	0,42	0,428
14	0,409	0,422	0,426	0,428	0,426	0,422
13	0,409	0,422	0,425	0,427	0,426	0,423
12	0,41	0,421	0,421	0,426	0,423	0,424
11	0,41	0,421	0,42	0,426	0,422	0,424
10	0,411	0,421	0,42	0,425	0,422	0,424
9	0,411	0,421	0,419	0,425	0,421	0,425
8	0,412	0,42	0,418	0,424	0,421	0,426
7	0,414	0,42	0,418	0,423	0,421	0,427
5	0,416	0,42	0,418	0,422	0,42	0,429
4	0,416	0,42	0,419	0,422	0,42	0,429
3	0,418	0,42	0,419	0,421	0,42	0,427
2	0,418	0,42	0,419	0,421	0,42	0,425
1	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
SN	10	10	10	10	10	10
P9	0,413	0,42	0,417	0,424	0,421	0,426
P18	0,41	0,42	0,417	0,424	0,421	0,423
P14	0,412	0,421	0,418	0,424	0,421	0,425
P7	0,414	0,421	0,418	0,424	0,421	0,427
26	0,409	0,422	0,426	0,428	0,426	0,422
15	0,413	0,42	0,417	0,424	0,421	0,426
16	0,412	0,421	0,417	0,425	0,423	0,426
17	0,412	0,421	0,417	0,425	0,425	0,426
18	0,412	0,422	0,416	0,426	0,426	0,426
19	0,412	0,422	0,416	0,427	0,427	0,425
20	0,412	0,422	0,416	0,427	0,427	0,425
21	0,412	0,422	0,416	0,427	0,427	0,426
22	0,414	0,421	0,418	0,424	0,421	0,427
23	0,414	0,421	0,418	0,424	0,421	0,427
24	0,41	0,42	0,418	0,424	0,421	0,423
25	0,41	0,42	0,417	0,424	0,421	0,423
P1	0,418	0,42	0,419	0,421	0,419	0,431

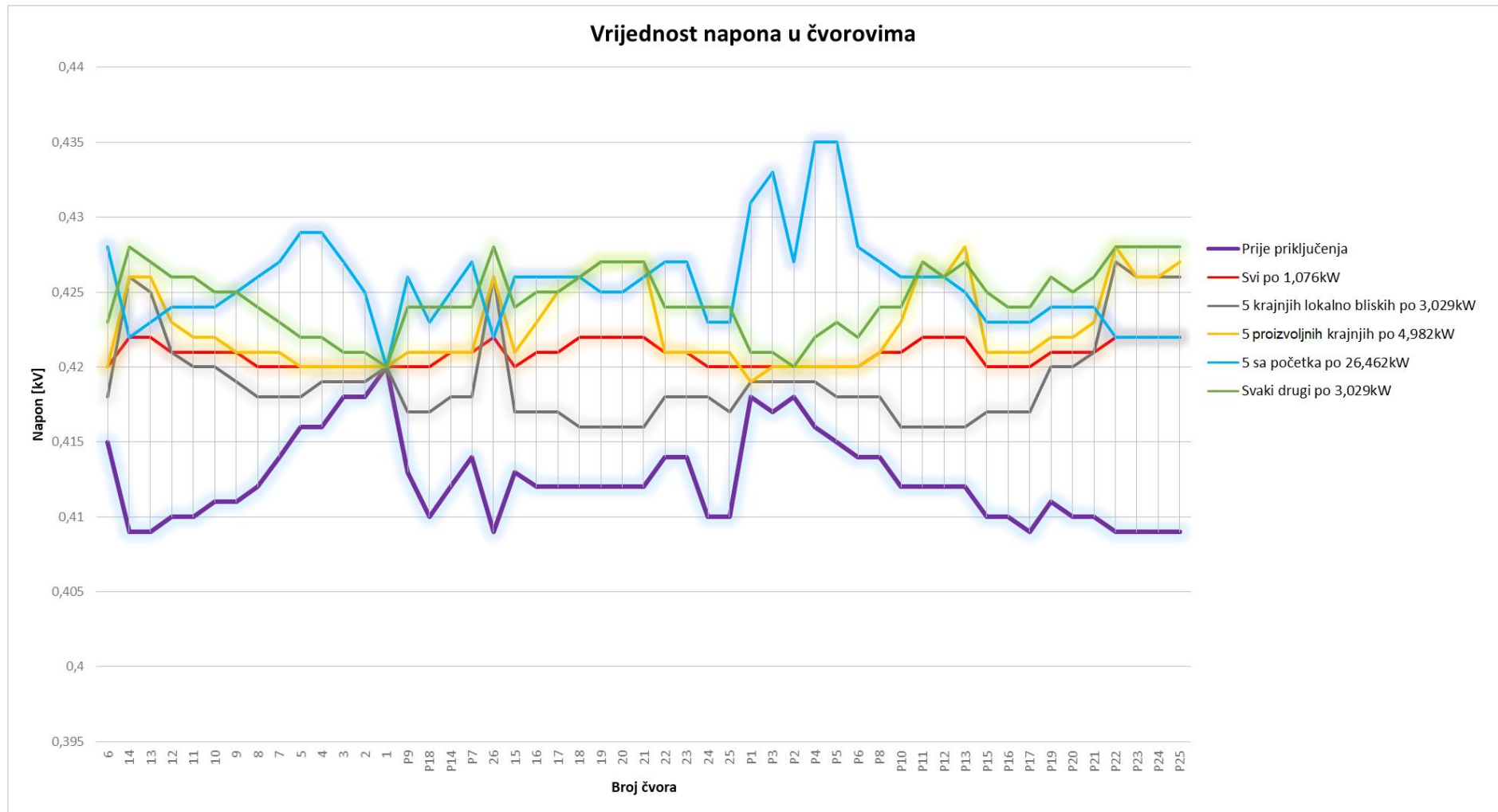
P3	0,417	0,42	0,419	0,421	0,42	0,433
P2	0,418	0,42	0,419	0,42	0,42	0,427
P4	0,416	0,42	0,419	0,422	0,42	0,435
P5	0,415	0,42	0,418	0,423	0,42	0,435
P6	0,414	0,42	0,418	0,422	0,42	0,428
P8	0,414	0,421	0,418	0,424	0,421	0,427
P10	0,412	0,421	0,416	0,424	0,423	0,426
P11	0,412	0,422	0,416	0,427	0,427	0,426
P12	0,412	0,422	0,416	0,426	0,426	0,426
P13	0,412	0,422	0,416	0,427	0,428	0,425
P15	0,41	0,42	0,417	0,425	0,421	0,423
P16	0,41	0,42	0,417	0,424	0,421	0,423
P17	0,409	0,42	0,417	0,424	0,421	0,423
P19	0,411	0,421	0,42	0,426	0,422	0,424
P20	0,41	0,421	0,42	0,425	0,422	0,424
P21	0,41	0,421	0,421	0,426	0,423	0,424
P22	0,409	0,422	0,427	0,428	0,428	0,422
P23	0,409	0,422	0,426	0,428	0,426	0,422
P24	0,409	0,422	0,426	0,428	0,426	0,422
P25	0,409	0,422	0,426	0,428	0,427	0,422

Posmatrajući rezultate iz tabele, a uzimajući u obzir maksimalnu proizvedenu snagu za svaki slučaj pojedinačno, vidi se da za slučaj prije priključenja solarnih elektrana (PV) dolazi do pada napona u skoro svim čvorovima, što je normalno za svaku distributivnu mrežu.

Nakon priključenja solarnih elektrana (PV) dolazi do povećanja napona u svim čvorovima gdje je ista priključena a napon opada samo u specifičnim slučajevima (u odnosu na nominalni napon) kada su solarne elektrane (PV) grupisane na kraju distributivne mreže. Do najznačajnijeg povećavanja napona dolazi u slučaju kada je u 5 čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 26,462kW a koja je dobijena analizom prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (HC) za taj slučaj. Svako povećanje snage preko 26,462kW, u koraku od 0.1kW, dovelo bi do ΔV (promjena napona) koje je veće od predviđenih 5% (prema evropskom standardu za kvalitet napajanja EN 50160 i prema međunarodnom standardu za standardne napone IEC 60038)

Grafički prikaz vrijednosti napona u čvorovima seoske mreže

Na grafiku se može uočiti da je najveća vrijednost napona u slučaju kada imamo 5 solarnih elektrana snage 26,462kW na početku mreže a da je napon najstabilniji kada u svakom potrošačkom čvoru imamo solarne elektrane jednakih snaga koje u ovom slučaju iznose 1,076kW i koje u određenoj mjeri pokrivaju sopstvenu potrošnju.



Tabelarni prikaz procentualne promjene napona u čvorovima nakon priključenja PV u odnosu na stanje prije priključenja

U tabeli su prikazane vrijednosti procentualne promjene napona za svaki specifični slučaj u odnosu na stanje mreže prije priključenja solarnih elektrana (PV) na seosku mrežu.

Tabela 7. Vrijednosti procentualne promjene napona za karakteristične slučajeve

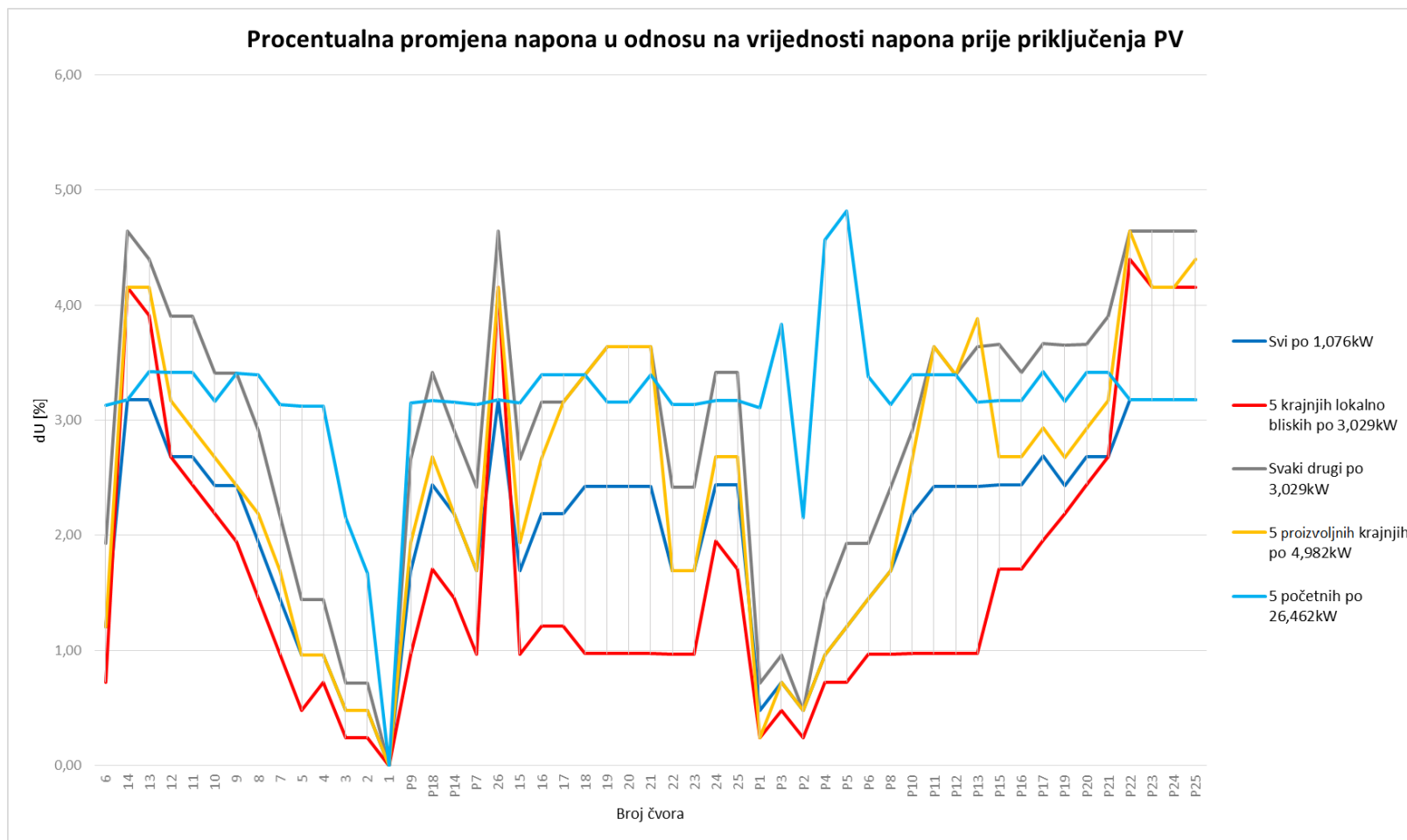
Čvor	dU % (U svakom po 1,076 kW PV)	dU % (U 5 krajnjih lokalno bliskih po 3,029 kW PV)	dU % (Svaki drugi po 3,029kW PV)	dU % (5 proizvoljnih krajnjih po 4,982kW PV)	dU % (5 sa početka po 26,462kW PV)
6	1,20	0,72	1,93	1,20	3,13
14	3,18	4,16	4,65	4,16	3,18
13	3,18	3,91	4,40	4,16	3,42
12	2,68	2,68	3,90	3,17	3,41
11	2,68	2,44	3,90	2,93	3,41
10	2,43	2,19	3,41	2,68	3,16
9	2,43	1,95	3,41	2,43	3,41
8	1,94	1,46	2,91	2,18	3,40
7	1,45	0,97	2,17	1,69	3,14
5	0,96	0,48	1,44	0,96	3,13
4	0,96	0,72	1,44	0,96	3,13
3	0,48	0,24	0,72	0,48	2,15
2	0,48	0,24	0,72	0,48	1,67
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P9	1,69	0,97	2,66	1,94	3,15
P18	2,44	1,71	3,41	2,68	3,17
P14	2,18	1,46	2,91	2,18	3,16
P7	1,69	0,97	2,42	1,69	3,14
26	3,18	4,16	4,65	4,16	3,18
15	1,69	0,97	2,66	1,94	3,15
16	2,18	1,21	3,16	2,67	3,40
17	2,18	1,21	3,16	3,16	3,40
18	2,43	0,97	3,40	3,40	3,40
19	2,43	0,97	3,64	3,64	3,16
20	2,43	0,97	3,64	3,64	3,16
21	2,43	0,97	3,64	3,64	3,40
22	1,69	0,97	2,42	1,69	3,14
23	1,69	0,97	2,42	1,69	3,14
24	2,44	1,95	3,41	2,68	3,17
25	2,44	1,71	3,41	2,68	3,17
P1	0,48	0,24	0,72	0,24	3,11
P3	0,72	0,48	0,96	0,72	3,84

P2	0,48	0,24	0,48	0,48	2,15
P4	0,96	0,72	1,44	0,96	4,57
P5	1,20	0,72	1,93	1,20	4,82
P6	1,45	0,97	1,93	1,45	3,38
P8	1,69	0,97	2,42	1,69	3,14
P10	2,18	0,97	2,91	2,67	3,40
P11	2,43	0,97	3,64	3,64	3,40
P12	2,43	0,97	3,40	3,40	3,40
P13	2,43	0,97	3,64	3,88	3,16
P15	2,44	1,71	3,66	2,68	3,17
P16	2,44	1,71	3,41	2,68	3,17
P17	2,69	1,96	3,67	2,93	3,42
P19	2,43	2,19	3,65	2,68	3,16
P20	2,68	2,44	3,66	2,93	3,41
P21	2,68	2,68	3,90	3,17	3,41
P22	3,18	4,40	4,65	4,65	3,18
P23	3,18	4,16	4,65	4,16	3,18
P24	3,18	4,16	4,65	4,16	3,18
P25	3,18	4,16	4,65	4,40	3,18

Posmatrajući rezultate koji su prikazani u tabeli, a uzimajući u obzir maksimalnu proizvedenu snagu za svaki slučaj pojedinačno, uočava se da se najveće procentualne promjene napona dešavaju u slučaju kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 26,462kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže i u slučaju kada se na svaki drugi potrošački čvor priključe solarne elektrane snage 3,029kW. Sve promjene napona ostaju u dozvoljenom opsegu ΔV koje iznosi 5% (prema [10], evropskom standardu za kvalitet napajanja EN 50160 i prema međunarodnom standardu za standardne napone IEC 60038)

Grafički prikaz procentualne promjene napona u čvorovima nakon priključenja PV u odnosu na stanje prije priključenja

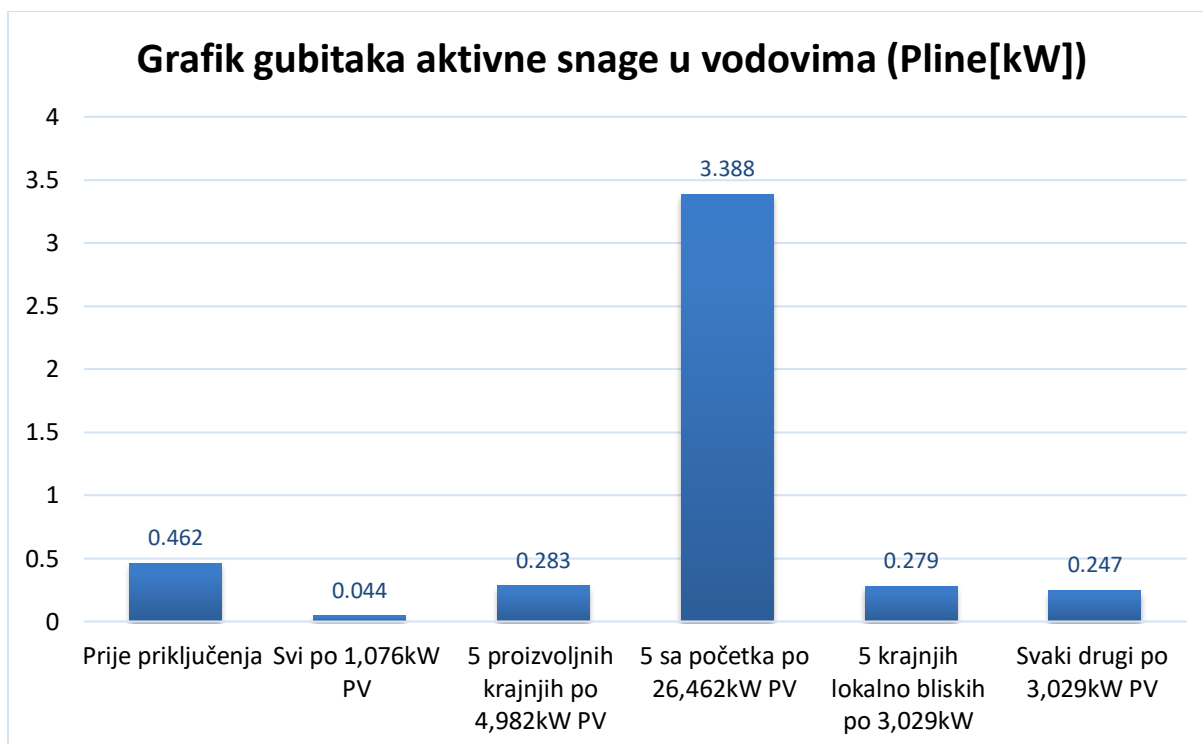
Na grafiku se može uočiti da su najveće procentualne promjene napona u slučaju kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 26,462kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže i u slučaju kada se na svaki drugi potrošački čvor priključe solarne elektrane snage 3,029kW a da je napon najmanje stabilan u slučaju kada je 5 solarnih elektrana priključeno na čvorovima koji se nalaze na kraju mreže (oba slučaja).



Tabelarni i grafički prikaz gubitaka aktivne snage (kW) u vodovima prije i nakon priključenja PV

Tabela 8. Gubici aktivne snage u vodovima

Prije priključenja	Svi po 1,076kW PV	5 proizvoljnih krajnjih po 4,982kW PV	5 sa početka po 26,462kW PV	5 krajnjih lokalno bliskih po 3,029kW	Svaki drugi po 3,029kW PV
0,462	0,044	0,283	3,388	0,279	0,247

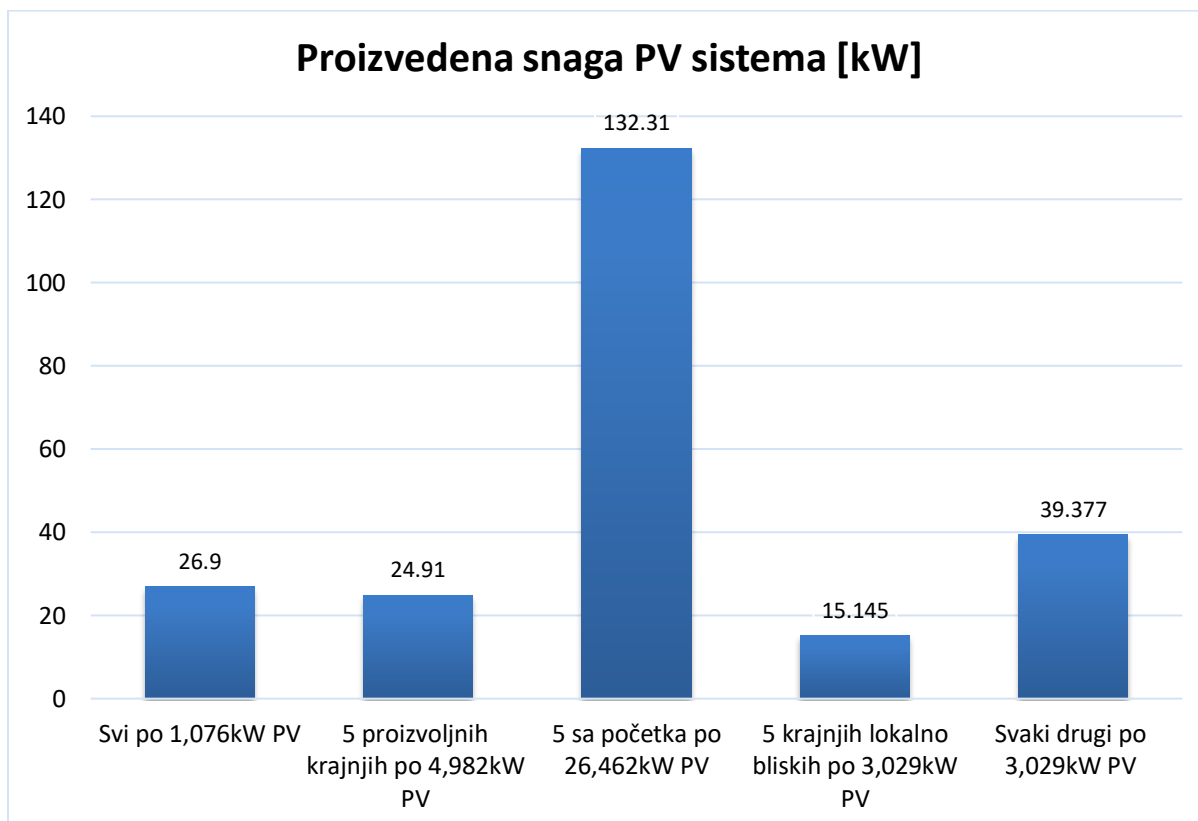


Iz tabele i sa grafika uočava se da su gubici u vodovima najmanji u slučaju kada su u svim potrošačkim čvorovima priključene solarne elektrane (PV) jednakih snaga (1,076kW) koje skoro u potpunosti uspijevaju da pokriju potrošnju tih potrošača proizvodnjom solarnih elektrana. Najveći gubici, očekivano, javljaju se u slučaju najveće proizvedene snage tj. u slučaju kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 26,462kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže. Ono što je indikativno jeste da su u 4 od 5 prikazanih specifičnih slučajeva gubici u vodovima manji u odnosu na gubitke u vodovima prije priključenja solarnih elektrana (PV)

Tabelarni i grafički prikaz instalisane snage (kW) nakon priključenja PV

Tabela 9. Instalisana snaga PV za karakteristične slučajeve

Svi po 1,076kW PV	5 proizvoljnih krajnjih po 4,982kW PV	5 sa početka po 26,462kW PV	5 krajnjih lokalno bliskih po 3,029kW PV	Svaki drugi po 3,029kW PV
26,9	24,91	132,31	15,145	39,377



Iz tabele i sa grafika, prilikom analize specifičnih slučajeva za seosku mrežu, uočava se da 5 solarnih elektrana koje su priključene na prvih 5 potrošačkih čvorova u zbiru proizvode najveću snagu. Takođe, ono što je zanimljivo jeste to što je najmanja snaga proizvedena u slučaju kada je 5 solarnih elektrana priključeno na 5 krajnjih lokalno bliskih (geografski) potrošačkih čvorova. Razlika između tih slučajeva iznosi 117,165kW. Specifično je i to što 5 solarnih elektrana na početku mreže mogu da proizvedu 25,978kW više snage nego svi ostali slučajevi zajedno.

Tabelarni prikaz strujnog opterećenja vodova prije i nakon priključenja PV

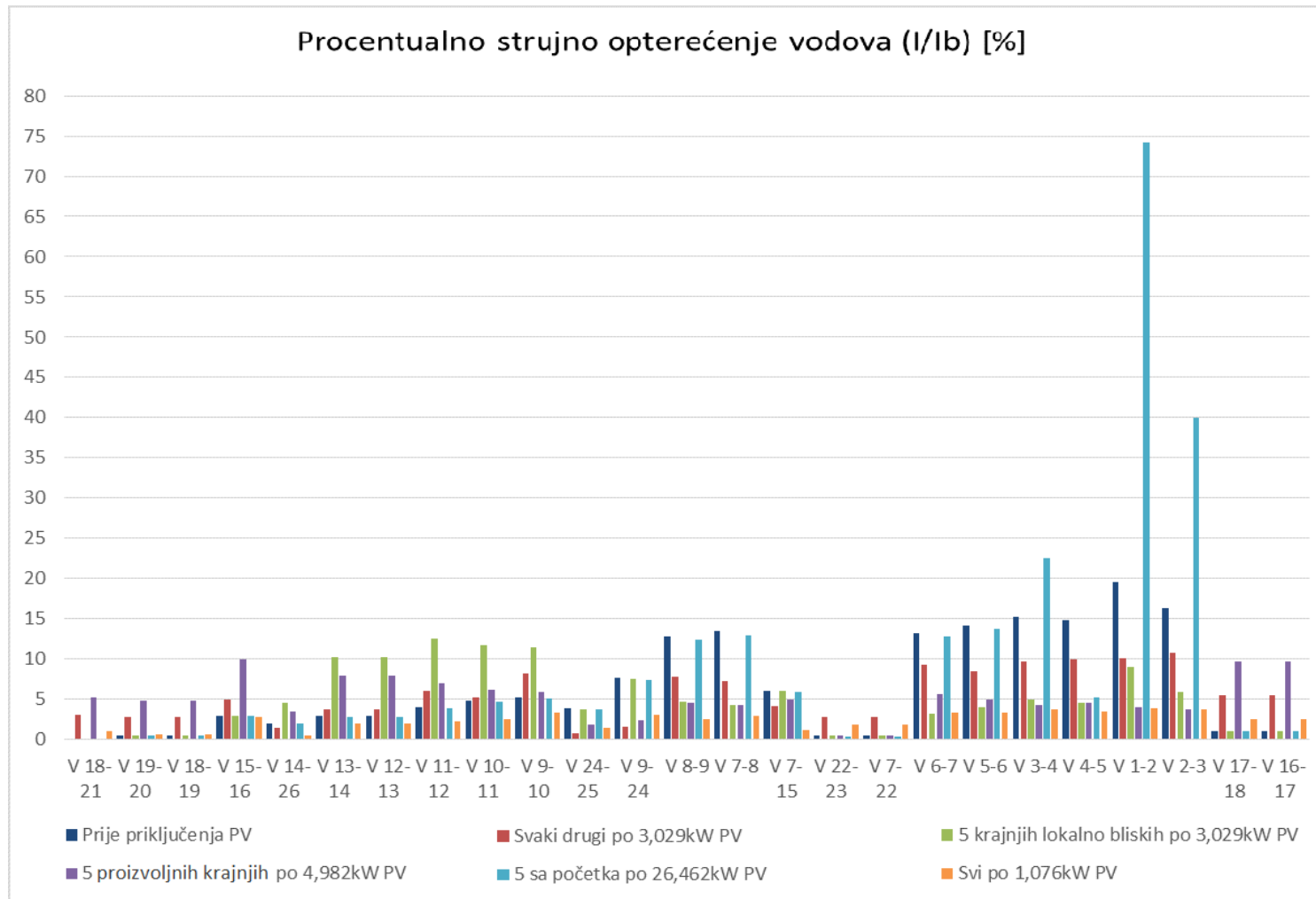
U tabeli su prikazane vrijednosti procentualnog opterećenja vodova u odnosu na njihovu graničnu vrijednost (dozvoljeno termičko opterećenje). Posmatrani su samo vodovi mreže, a ne i potrošački vodovi koji se smatraju unutrašnjim priključkom tj. posmatrani su samo vodovi do mjesta priključenja potrošača na mrežu. Posmatran je trenutak kada je seoska mreža bila neznatno opterećena prije priključenja PV. Najveće strujno opterećenje se javlja u slučaju najveće snage, tj. kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 26,462kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže. Nije samo snaga ta koja utiče na ove vrijednosti već, naravno, presjek i tip vodova mreže.

Tabela 10. Vrijednosti procentualnog strujnog opterećenja vodova

Naziv voda	Prije priključenja PV (I/Ib) [%]	Svaki drugi po 3.029kW PV (I/Ib) [%]	5 krajnjih lokalno bliskih po 3,029kW PV (I/Ib) [%]	5 proizvoljnih krajnjih po 4,982kW PV (I/Ib) [%]	5 sa početka po 26,462kW PV (I/Ib) [%]	U svakom po 1,076kW PV (I/Ib) [%]
V 18-21	0,136	3,123	0,135	5,218	0,132	1,039
V 19-20	0,534	2,746	0,528	4,833	0,517	0,666
V 18-19	0,534	2,746	0,528	4,833	0,517	0,666
V 15-16	2,996	4,99	2,966	9,986	2,901	2,804
V 14-26	2,014	1,411	4,635	3,479	1,949	0,576
V 13-14	2,941	3,776	10,276	7,947	2,846	1,966
V 12-13	2,941	3,776	10,276	7,947	2,846	1,966
V 11-12	3,967	6,07	12,598	6,993	3,84	2,211
V 10-11	4,879	5,245	11,741	6,156	4,722	2,555
V 9-10	5,209	8,171	11,431	5,856	5,042	3,383
V 24-25	3,848	0,826	3,778	1,902	3,725	1,525
V 9-24	7,66	1,632	7,52	2,4	7,414	3,017
V 8-9	12,869	7,805	4,744	4,616	12,456	2,567
V 7-8	13,436	7,332	4,357	4,237	13,006	2,881
V 7-15	6,122	4,12	6,06	4,974	5,928	1,197
V 22-23	0,452	2,842	0,448	0,445	0,438	1,91
V 7-22	0,452	2,842	0,448	0,445	0,438	1,91
V 6-7	13,201	9,356	3,231	5,711	12,779	3,284
V 5-6	14,176	8,518	4,003	4,994	13,724	3,338
V 3-4	15,259	9,649	4,943	4,308	22,524	3,805
V 4-5	14,844	10,008	4,575	4,553	5,181	3,518
V 1-2	19,525	10,123	8,967	3,992	74,134	3,859
V 2-3	16,324	10,799	5,916	3,811	39,921	3,821
V 17-18	1,067	5,495	1,056	9,676	1,033	2,494
V 16-17	1,067	5,495	1,056	9,676	1,033	2,494

Grafički prikaz strujnog opterećenja vodova prije i nakon priključenja PV

Na grafiku se može uočiti da su vodovi mreže najviše strujno opterećeni u slučaju kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 26,462kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže a najmanje u slučaju kada su u svim potrošačkim čvorovima priključene solarne elektrane (PV) jednakih snaga (1,076kW).

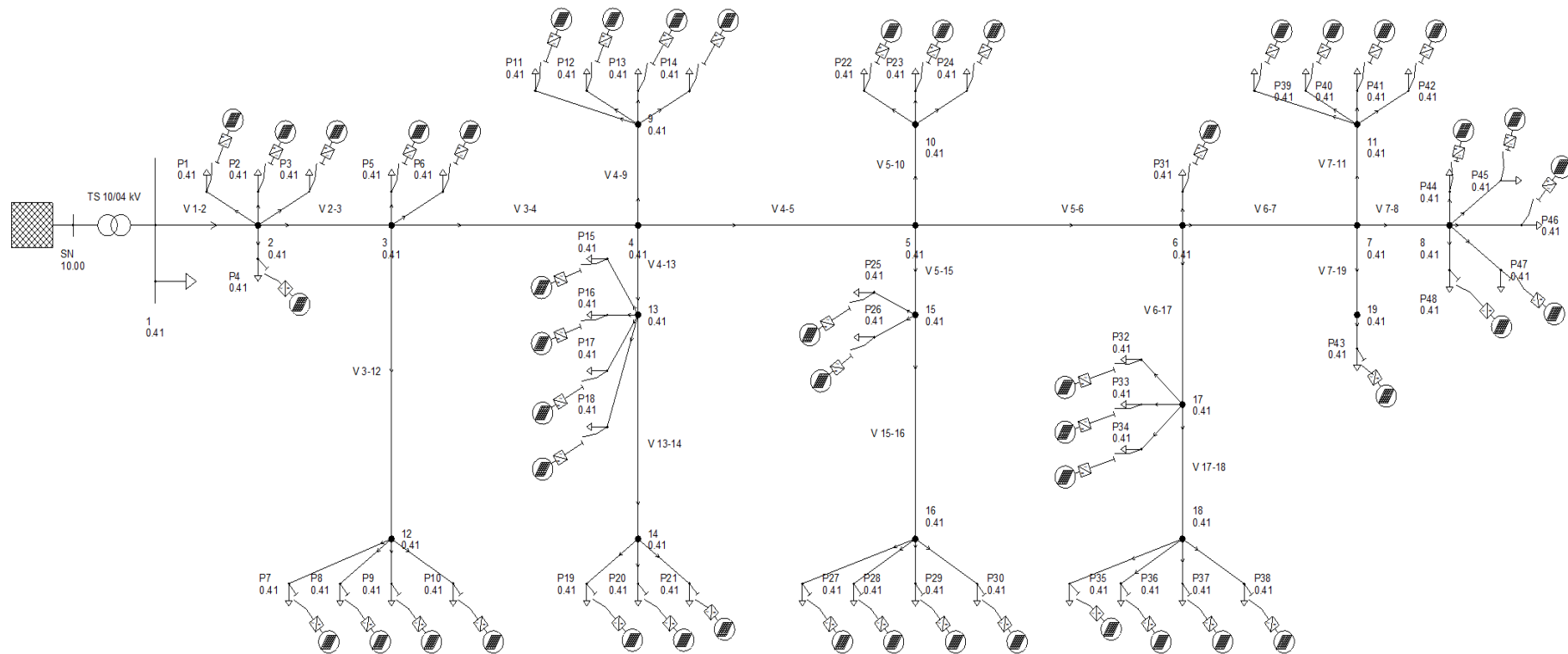


5.2. Gradska mreža

Gradska mreža koja je analizirana u ovom radu sastoji se od 48 potrošačkih čvorova na izvodu koji je prikazan na jednopolnoj šemi i drugog izvoda čije je opterećenje prikazano kao "ostalo opterećenje". Ovu mrežu karakterišu veliki poprečni presjeci vodova, male udaljenosti potrošača od mjesta priključenja (najčešće NKRO), veliko opterećenje same mreže kao i drugačija struktura potrošača koji su priključeni na istu. Ukupna dužina izvoda je kraća nego kod seoske mreže i gradska mreža je dominantno podzemna mreža sa ponekim vazдушnim vodovima. Za razliku od seoskih mreža kod kojih je najčešći limitirajući faktor pad napona, kod gradske mreže je to opterećenje vodova. Kada su trafostanice u pitanju, u gradovima su najviše zastupljene montažno-betonske trafostanice (MBTS) a jos uvijek ima i blindiranih trafostanica (BTS). Snage transformatora u tim trafostanicama se kreću od 400kVA pa naviše (treba imati u vidu i to da je česta izvedba trafostanice tipa 2xSt). Kategorija potrošnje u gradskoj mreži nije "jednolična" kao u seoskoj. Umnogome su zastupljeni potrošači kategorije "ostala potrošnja" a čak i potrošači kategorije "domaćinstvo" nijesu potrošači koji povlače male snage iz mreže kao što je to slučaj kod seoskih mreža. U gradu je dominantno zastupljeno grijanje na struju pa je njihova jednovremena snaga veća nego kod seoskih potrošača. U skladu sa kategorijom potrošnje uzima se faktor jednovremenosti na nivou mjernog mjesta, iskustveno i koristeći pravilnike, a koji takođe zavisi i od vrste potrošača (uređaja čija se utrošena električna energija obračunava preko tog brojila). U našem sistemu, velika prednost gradskih sredina prilikom popunjavanja kapaciteta neke trafostanice jeste postojanje planskih dokumenata kojima se predviđaju buduće trafostanice za taj konzum. Seoska područja najčešće nijesu obuhvaćena planskim dokumentom ili su obuhvaćena dokumentom koji nije detaljno razrađen. Kapacitet postojeće trafostanice za priključenje novih potrošača zavisi od maksimalnog opterećenja iste tokom prethodnih godina kao i od planiranog priključenja novih potrošača koji su potpisali Ugovor o izgradnji infrastrukture za priključenje i priključenju (važeći dokument u vrijeme pisanja ovog rada) a koji još uvijek nijesu završili taj postupak. Veliki troškovi izgradnje infrastrukture prate i gradsku mrežu zbog velikog broja podzemnih vodova čija je ugradnja otežana zbog same prirode gradske sredine (gusto naseljeno mjesto, ostale vrste infrastrukture itd.). Veliki broj potrošača u gradskoj mreži iziskuje sofisticirano upravljanje što dovodi do povećanja operativnih troškova, složenijih zahtjeva za proširenje koji opet iziskuju dodatne troškove. Gradska mreža zahtijeva veliku efikasnost, upravo zbog svoje prirode, a čemu doprinosi optimizacija tehničkih uslova.

Jednopolna šema gradske mreže sa PV

Na jednopolnoj šemi gradske mreže prikazane su SN mreža i NN mreža koja obuhvata čvorove mreže, potrošačke čvorove sa solarnim elektranama (PV) kao i nazive vodova. Transformator je 10/0.4(0.42) kV snage 400kVA. Mreža je u normalnom režimu rada, simetrična i podaci o njenim parametrima su uzeti za dan 15. maj 2024. godine u 11:00h. Datum i vrijeme su odabrani zbog stabilnih meteoroloških uslova što predstavlja reprezentativan dan u godini (van ekstremnih uslova).



Tabelarni prikaz podataka parametara mreže

Tabela 11. Podaci o parametrima gradske mreže

Naziv voda	Tip kabla	Dužina [m]	Poprečni presjek provodnika [mm ²]	Broj provodnika	Način vođenja
V 17-18	NA2XY	48	70	4x	Podzemni vod
V 2-3	NA2XY	25	240	4x	Podzemni vod
V 1-2	NA2XY	50	240	4x	Podzemni vod
V 4-5	NA2XY	27	150	4x	Podzemni vod
V 3-4	NA2XY	30	150	4x	Podzemni vod
V 5-6	NA2XY	41	150	4x	Podzemni vod
V 7-6	NA2XY	21	150	4x	Podzemni vod
V 7-19	AsXSn	74	35	4x	Vazdušni vod
V 7-8	NA2XY	65	150	4x	Podzemni vod
V 10-5	AsXSn	85	35	4x	Vazdušni vod
V 3-12	AsXSn	74	35	4x	Vazdušni vod
V 4-13	NA2XY	74	70	4x	Podzemni vod
V 13-14	NA2XY	48	50	4x	Podzemni vod
V 9-4	AsXSn	85	35	4x	Vazdušni vod
V 6-17	NA2XY	74	70	4x	Podzemni vod
V 15-16	NA2XY	48	50	4x	Podzemni vod
V 5-15	NA2XY	74	120	4x	Podzemni vod
V 11-7	AsXSn	85	35	4x	Vazdušni vod

Tabelarni prikaz podataka o potrošačima gradske mreže

Tabela 12. Podaci o potrošačima gradske mreže

Potrošač	Snaga potrošača P [kW]	cosφ
P43	2,3	0,95
Ostalo opterećenje	83	0,95
P31	1,6	0,95
P4	0,9	0,95
P7	2,44	0,95
P16	0,98	0,95
P20	1,66	0,95
P25	1,58	0,95
P27	1,48	0,95

P33	0,7	0,95
P35	0,85	0,95
P11	2,7	0,95
P48	2,3	0,95
P46	1,45	0,95
P47	1,82	0,95
P45	1,62	0,95
P13	1,05	0,95
P14	0,88	0,95
P12	0,77	0,95
P22	0,28	0,95
P24	1,49	0,95
P23	2,18	0,95
P40	2,5	0,95
P42	1,35	0,95
P41	1,67	0,95
P39	1,15	0,95
P19	2,05	0,95
P21	2,18	0,95
P30	3,15	0,95
P28	0,95	0,95
P29	0,55	0,95
P38	1,52	0,95
P36	0,75	0,95
P37	0,75	0,95
P34	0,65	0,95
P32	0,88	0,95
P1	1,48	0,95
P3	1,91	0,95
P2	1,68	0,95
P5	1,55	0,95
P6	2,62	0,95
P10	2,32	0,95
P8	2,84	0,95
P9	2,66	0,95
P26	1,35	0,95
P17	1,65	0,95
P18	1,05	0,95
P15	1,3	0,95
P45	1,62	0,95

Vrijednost napona u čvorovima

U tabeli su prikazane vrijednosti napona u kV u čvorovima gradske mreže za karakteristične slučajeve. Vrijednosti snaga u čvorovima dobijene su analizom prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (HC) a da pritom ne dođe do prekoračenja tehničkih ograničenja.

Tabela 13. Vrijednosti napona u čvorovima za karakteristične slučajeve gradske mreže

Čvor	Prije priključenja V [kV]	Svaki po 4,982kW PV (Ukupno 239,136kW) V [kV]	Svaki drugi po 8,887kW PV (Ukupno 213,288kW) V [kV]	Prvih 5 po 52,824kW PV (Ukupno 264,12kW) V [kV]	5 krajnjih proizvoljnih po 23,533kW PV (Ukupno 117,665kW) V [kV]	5 krajnjih lokalno bliskih po 29,391kW PV (Ukupno 146,955kW) V [kV]
1	0,415	0,417	0,417	0,418	0,416	0,416
10	0,411	0,425	0,423	0,418	0,422	0,419
11	0,409	0,427	0,425	0,416	0,423	0,423
12	0,411	0,422	0,421	0,418	0,415	0,416
13	0,411	0,424	0,423	0,418	0,417	0,418
14	0,411	0,425	0,424	0,418	0,416	0,417
15	0,411	0,424	0,423	0,418	0,418	0,42
16	0,41	0,425	0,424	0,417	0,418	0,419
17	0,41	0,427	0,425	0,417	0,421	0,422
18	0,41	0,428	0,425	0,417	0,421	0,422
19	0,41	0,425	0,424	0,417	0,424	0,423
2	0,414	0,42	0,419	0,42	0,417	0,417
3	0,413	0,421	0,42	0,42	0,417	0,418
4	0,412	0,422	0,421	0,419	0,418	0,419
5	0,411	0,424	0,422	0,418	0,419	0,42
6	0,411	0,425	0,423	0,418	0,42	0,422
7	0,411	0,425	0,424	0,418	0,42	0,424
8	0,41	0,426	0,424	0,417	0,421	0,428
9	0,411	0,425	0,423	0,418	0,417	0,418
P1	0,413	0,42	0,421	0,432	0,416	0,417
P10	0,41	0,423	0,42	0,417	0,414	0,415
P11	0,41	0,426	0,425	0,417	0,416	0,417
P12	0,411	0,426	0,423	0,418	0,416	0,418
P13	0,411	0,426	0,425	0,418	0,416	0,418
P14	0,411	0,426	0,423	0,418	0,416	0,418
P15	0,411	0,424	0,424	0,418	0,417	0,418
P16	0,411	0,424	0,423	0,418	0,417	0,418
P17	0,411	0,424	0,424	0,418	0,417	0,418
P18	0,411	0,424	0,423	0,418	0,417	0,418
P19	0,41	0,426	0,426	0,417	0,416	0,417
P2	0,413	0,42	0,419	0,432	0,416	0,417
P20	0,41	0,426	0,423	0,417	0,416	0,417

P21	0,41	0,426	0,426	0,417	0,416	0,417
P22	0,411	0,427	0,423	0,418	0,422	0,419
P23	0,41	0,426	0,425	0,417	0,421	0,419
P24	0,41	0,426	0,423	0,417	0,427	0,419
P25	0,411	0,425	0,423	0,418	0,418	0,42
P26	0,411	0,425	0,423	0,418	0,418	0,42
P27	0,41	0,426	0,426	0,417	0,417	0,419
P28	0,41	0,427	0,424	0,417	0,417	0,419
P29	0,41	0,427	0,426	0,417	0,417	0,419
P3	0,413	0,42	0,421	0,432	0,416	0,417
P30	0,409	0,426	0,423	0,416	0,417	0,418
P31	0,41	0,426	0,425	0,417	0,419	0,422
P32	0,41	0,427	0,425	0,417	0,423	0,422
P33	0,41	0,427	0,425	0,417	0,421	0,422
P34	0,41	0,427	0,425	0,417	0,421	0,422
P35	0,41	0,429	0,428	0,417	0,421	0,421
P36	0,41	0,429	0,425	0,417	0,421	0,422
P37	0,41	0,429	0,428	0,417	0,421	0,422
P38	0,409	0,429	0,425	0,417	0,42	0,421
P39	0,409	0,428	0,428	0,416	0,423	0,422
P4	0,413	0,42	0,419	0,423	0,417	0,417
P40	0,409	0,428	0,425	0,416	0,423	0,422
P41	0,409	0,428	0,427	0,416	0,423	0,422
P42	0,409	0,428	0,425	0,416	0,428	0,422
P43	0,41	0,426	0,425	0,417	0,425	0,423
P44	0,41	0,426	0,424	0,417	0,422	0,43
P45	0,41	0,426	0,424	0,417	0,421	0,43
P46	0,41	0,426	0,424	0,417	0,421	0,43
P47	0,41	0,426	0,424	0,417	0,421	0,43
P48	0,41	0,426	0,424	0,417	0,421	0,43
P5	0,412	0,421	0,421	0,432	0,416	0,417
P6	0,412	0,421	0,419	0,419	0,416	0,417
P7	0,411	0,422	0,421	0,418	0,415	0,416
P8	0,41	0,423	0,42	0,417	0,414	0,415
P9	0,41	0,423	0,423	0,417	0,414	0,415
SN	10	10	10	10	10	10

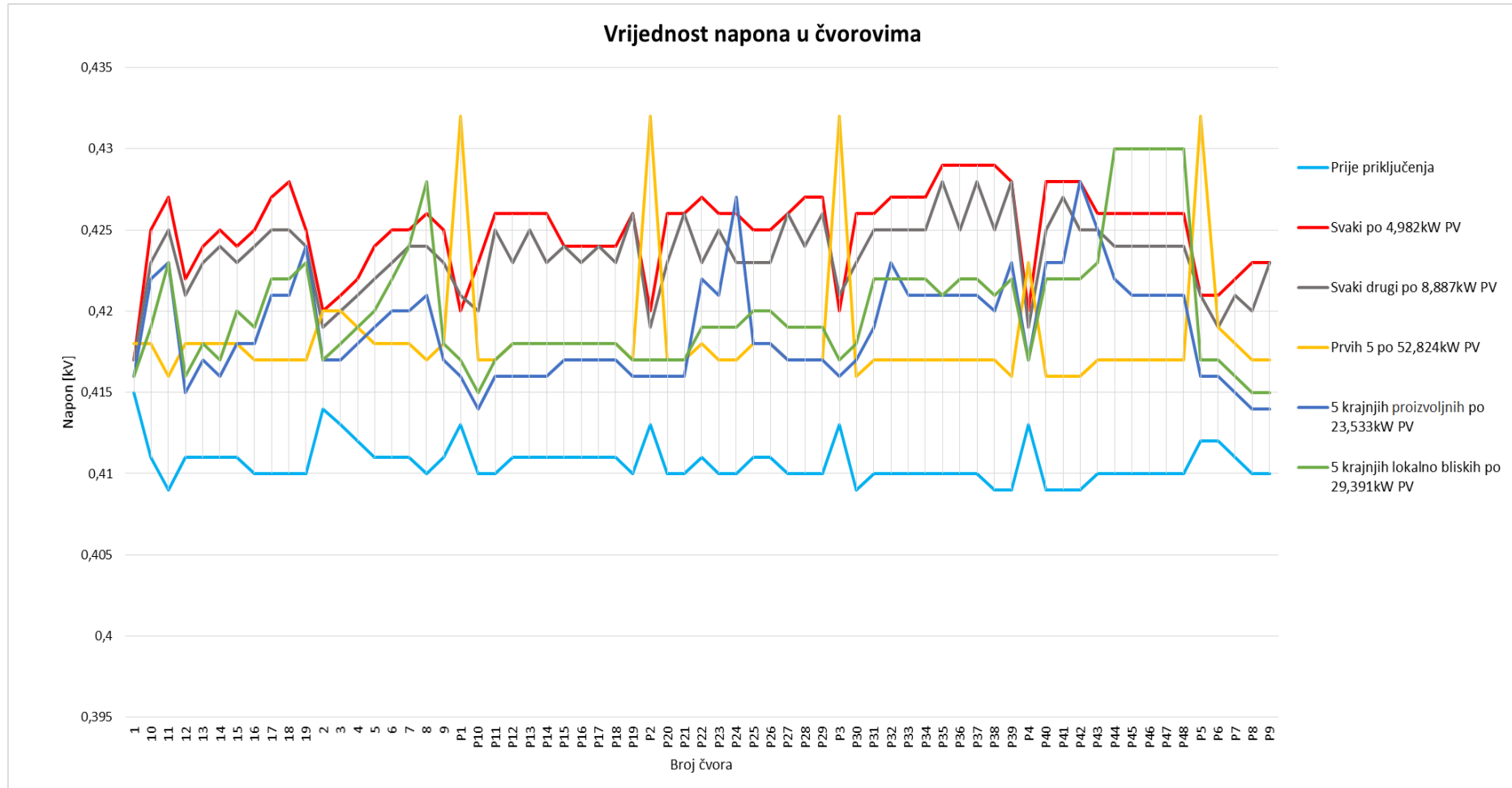
Posmatrajući rezultate iz tabele, a uzimajući u obzir maksimalnu proizvedenu snagu za svaki slučaj pojedinačno, uočava se da za slučaj prije priključenja solarnih elektrana (PV) dolazi do pada napona u skoro svim čvorovima, što je normalno za svaku distributivnu mrežu, posebno gradskog tipa usljed kapacitivnosti podzemnih kablovskih vodova.

Nakon priključenja solarnih elektrana (PV) dolazi do povećanja napona u svim čvorovima gdje je ista priključena a napon opada samo u određenim čvorovima (u odnosu na nominalni napon) specifičnih slučajeva. Do najznačajnijeg povećavanja napona dolazi u slučaju kada je u 5

potrošačkih čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 52,824kW a koja je dobijena analizom prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (hosting capacity analiza) za taj slučaj. Svako povećanje snage preko 52,824kW, u koraku od 0.1kW, dovelo bi do Ith koje prelazi graničnu vrijednost od 90% maksimalne vrijednosti nosivosti kabla.

Grafički prikaz vrijednosti napona u čvorovima gradske mreže

Na grafiku se može uočiti da su najveće promjene napona u slučaju kada je u 5 potrošačkih čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 52,824kW i kada je u 5 krajnjih lokalno bliskih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 29,391kW i da je napon najmanje stabilan u istim slučajevima.



Tabelarni prikaz procentualne promjene napona u čvorovima nakon priključenja PV u odnosu na stanje prije priključenja

U tabeli su prikazane vrijednosti procentualne promjene napona za svaki specifični slučaj u odnosu na stanje mreže prije priključenja solarnih elektrana (PV) na gradsku mrežu.

Tabela 14. Vrijednosti procentualne promjene napona za karakteristične slučajeve

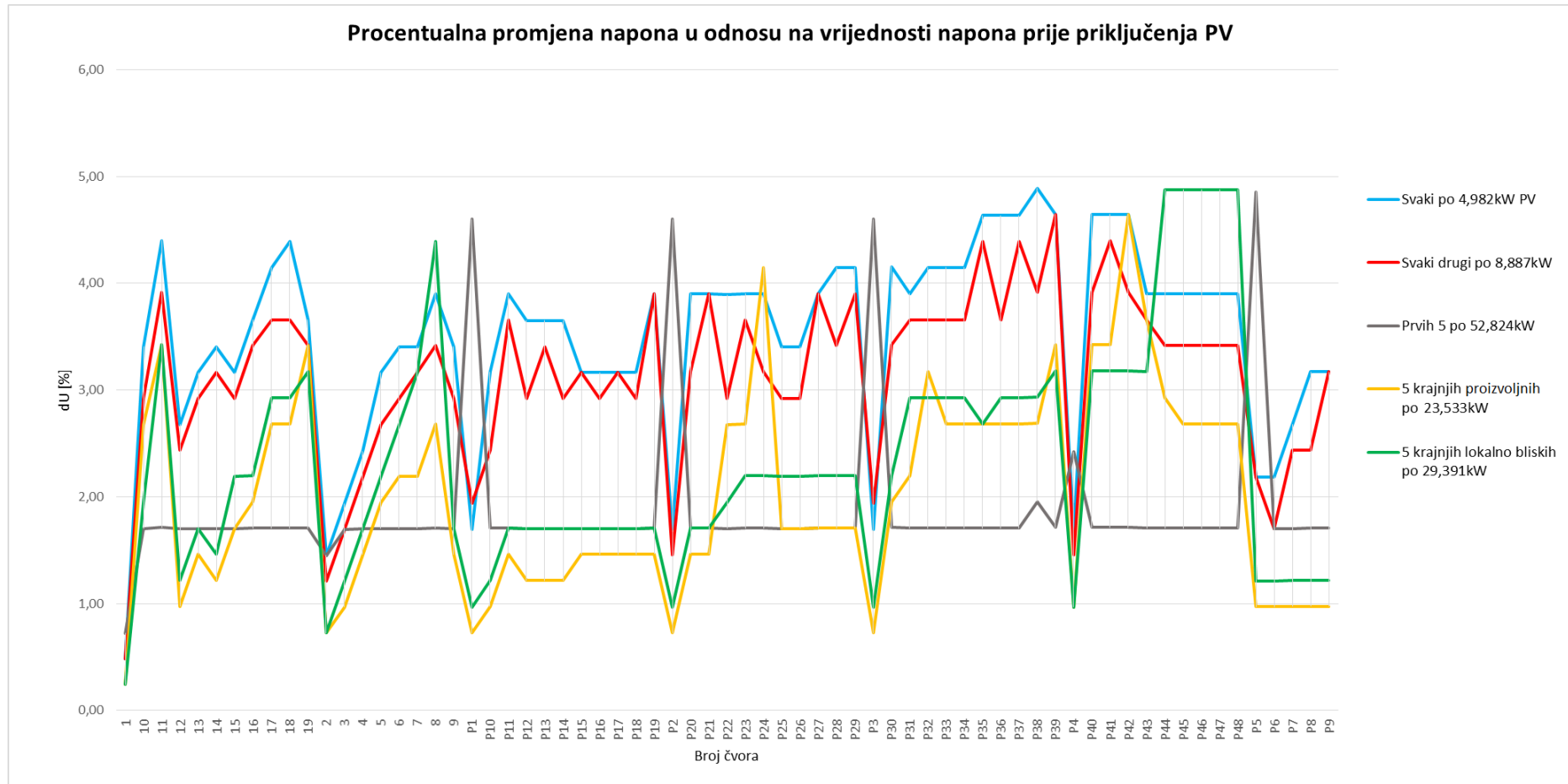
Čvor	dU % Svaki po 4,982kW PV V [kV]	dU % Svaki drugi po 8,887kW PV V [kV]	dU % Prvih 5 po 52,824kW PV V [kV]	dU % 5 krajnjih proizvoljnih po 23,533kW PV V [kV]	dU % 5 krajnjih lokalno bliskih po 29,391kW PV V [kV]
1	0,48	0,48	0,72	0,24	0,24
10	3,41	2,92	1,70	2,68	1,95
11	4,40	3,91	1,71	3,42	3,42
12	2,68	2,43	1,70	0,97	1,22
13	3,16	2,92	1,70	1,46	1,70
14	3,41	3,16	1,70	1,22	1,46
15	3,16	2,92	1,70	1,70	2,19
16	3,66	3,41	1,71	1,95	2,20
17	4,15	3,66	1,71	2,68	2,93
18	4,39	3,66	1,71	2,68	2,93
19	3,66	3,41	1,71	3,41	3,17
2	1,45	1,21	1,45	0,72	0,72
3	1,94	1,69	1,69	0,97	1,21
4	2,43	2,18	1,70	1,46	1,70
5	3,16	2,68	1,70	1,95	2,19
6	3,41	2,92	1,70	2,19	2,68
7	3,41	3,16	1,70	2,19	3,16
8	3,90	3,41	1,71	2,68	4,39
9	3,41	2,92	1,70	1,46	1,70
P1	1,69	1,94	4,60	0,73	0,97
P10	3,17	2,44	1,71	0,98	1,22
P11	3,90	3,66	1,71	1,46	1,71
P12	3,65	2,92	1,70	1,22	1,70
P13	3,65	3,41	1,70	1,22	1,70
P14	3,65	2,92	1,70	1,22	1,70
P15	3,16	3,16	1,70	1,46	1,70
P16	3,16	2,92	1,70	1,46	1,70
P17	3,16	3,16	1,70	1,46	1,70
P18	3,16	2,92	1,70	1,46	1,70
P19	3,90	3,90	1,71	1,46	1,71
P2	1,69	1,45	4,60	0,73	0,97
P20	3,90	3,17	1,71	1,46	1,71
P21	3,90	3,90	1,71	1,46	1,71
P22	3,89	2,92	1,70	2,68	1,95
P23	3,90	3,66	1,71	2,68	2,20

P24	3,90	3,17	1,71	4,15	2,20
P25	3,41	2,92	1,70	1,70	2,19
P26	3,41	2,92	1,70	1,70	2,19
P27	3,90	3,90	1,71	1,71	2,20
P28	4,15	3,41	1,71	1,71	2,20
P29	4,15	3,90	1,71	1,71	2,20
P3	1,69	1,94	4,60	0,73	0,97
P30	4,16	3,42	1,71	1,96	2,20
P31	3,90	3,66	1,71	2,20	2,93
P32	4,15	3,66	1,71	3,17	2,93
P33	4,15	3,66	1,71	2,68	2,93
P34	4,15	3,66	1,71	2,68	2,93
P35	4,63	4,39	1,71	2,68	2,68
P36	4,63	3,66	1,71	2,68	2,93
P37	4,63	4,39	1,71	2,68	2,93
P38	4,89	3,91	1,96	2,69	2,93
P39	4,65	4,65	1,71	3,42	3,18
P4	1,69	1,45	2,42	0,97	0,97
P40	4,65	3,91	1,71	3,42	3,18
P41	4,65	4,40	1,71	3,42	3,18
P42	4,65	3,91	1,71	4,65	3,18
P43	3,90	3,66	1,71	3,66	3,17
P44	3,90	3,41	1,71	2,93	4,88
P45	3,90	3,41	1,71	2,68	4,88
P46	3,90	3,41	1,71	2,68	4,88
P47	3,90	3,41	1,71	2,68	4,88
P48	3,90	3,41	1,71	2,68	4,88
P5	2,18	2,18	4,85	0,97	1,21
P6	2,18	1,70	1,70	0,97	1,21
P7	2,68	2,43	1,70	0,97	1,22
P8	3,17	2,44	1,71	0,98	1,22
P9	3,17	3,17	1,71	0,98	1,22
SN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Posmatrajući rezultate iz tabele, a uzimajući u obzir maksimalnu proizvedenu snagu za svaki slučaj pojedinačno, uočava se da se najveće procentualne promjene napona dešavaju u slučaju kada je u 5 krajnjih lokalno bliskih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 29,391kW i u slučaju kada se na svaki potrošački čvor priključe solarne elektrane snage 4,982kW. Sve promjene napona ostaju u dozvoljenom opsegu ΔV koje iznosi 5% (prema [10], evropskom standardu za kvalitet napajanja EN 50160 i prema međunarodnom standardu za standardne napone IEC 60038).

Grafički prikaz procentualne promjene napona u čvorovima nakon priključenja PV u odnosu na stanje prije priključenja

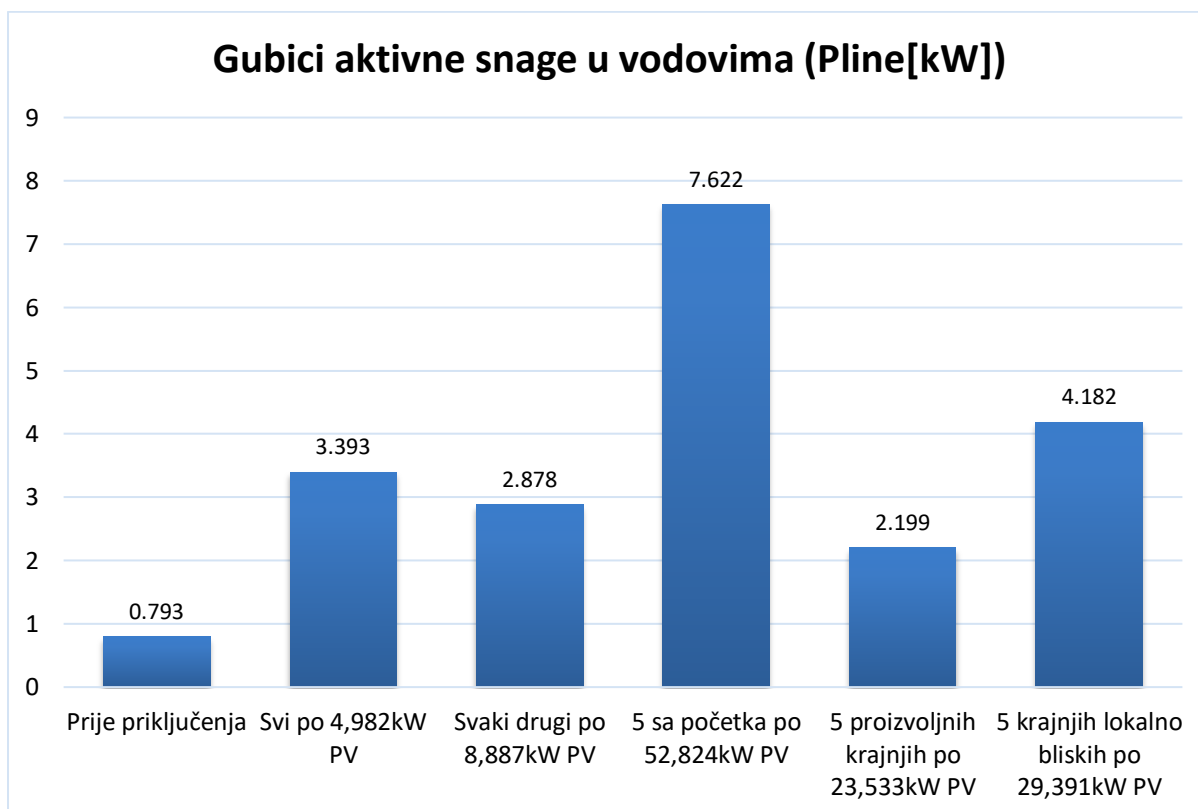
Na grafiku se može uočiti da su najveće procentualne promjene napona u slučaju kada je u 5 krajnjih lokalno bliskih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 29,391kW i u slučaju kada se na svaki potrošački čvor priključe solarne elektrane snage 4,982kW a da je napon najmanje stabilan u slučaju kada je 5 solarnih elektrana priključeno na čvorovima koji se nalaze na kraju mreže (oba slučaja).



Tabelarni i grafički prikaz gubitaka aktivne snage (kW) u vodovima prije i nakon priključenja PV

Tabela 15. Gubici aktivne snage u vodovima

Prije priključenja	Svi po 4,982kW PV	Svaki drugi po 8,887kW PV	5 sa početka po 52,824kW PV	5 proizvoljnih krajnjih po 23,533kW PV	5 krajnjih lokalno bliskih po 29,391kW PV
0,793	3,393	2,878	7,622	2,199	4,182

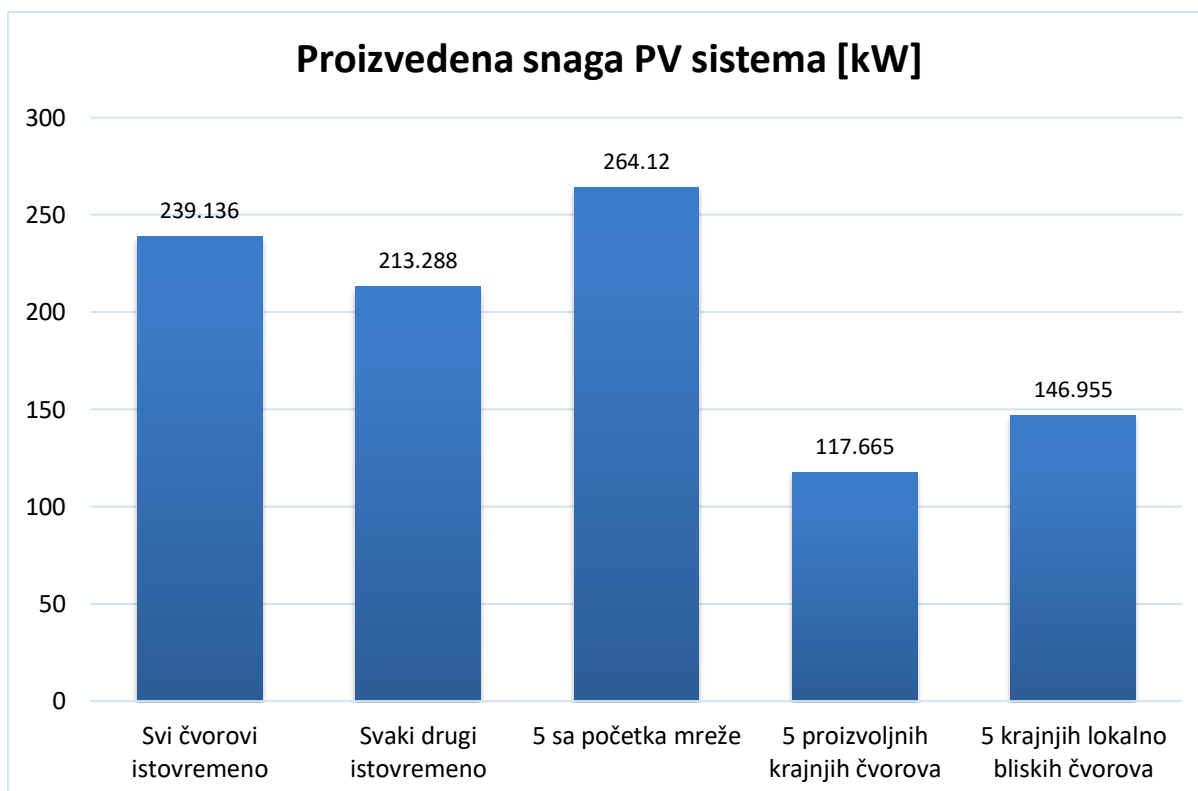


Iz tabele i sa grafika, prilikom analize slučajeva za gradsku mrežu, uočava se da su gubici u vodovima najmanji u slučaju kada je u 5 krajnjih proizvoljno odabranih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana (PV) snage 23,533kW. Najveći gubici, očekivano, javljaju se u slučaju najveće proizvedene snage tj. u slučaju kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 52,824kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže. Ono što je glavna razlika u odnosu na seosku mrežu jeste da su gubici u vodovima u slučaju priključenja solarnih elektrana jednake snage (4,982kW) u svim čvorovima veći nego u slučaju prije priključenja istih. Takođe, razlika je u tome da su gubici u svim specifičnim slučajevima veći nego u slučaju prije priključenja, što je bilo suprotno pri analizi seoske mreže.

Tabelarni i grafički prikaz instalisane snage (kW) nakon priključenja PV

Tabela 16. Instalisana snaga PV za karakteristične slučajeve

Svi čvorovi istovremeno	Svaki drugi istovremeno	5 sa početka mreže	5 proizvoljnih krajnjih čvorova	5 krajnjih lokalno bliskih čvorova
239,136	213,288	264,12	117,665	146,955



Iz tabele i sa grafika, prilikom analize specifičnih slučajeva za gradsku mrežu, uočava se da 5 solarnih elektrana koje su priključene na prvih 5 potrošačkih čvorova u zbiru proizvode najveću snagu. Takođe, ono što je zanimljivo jeste to što je najmanja snaga proizvedena u slučaju kada je 5 solarnih elektrana priključeno na 5 krajnjih proizvoljno odabranih potrošačkih čvorova. Zanimljivo je to što je prilikom priključenja solarnih elektrana snage 4,982kW na sve potrošačke čvorove, ukupna snaga manja za samo 24,984kW od maksimuma, dok je ta razlika pri analizi seoske mreže bila mnogo izraženija. Kada se sagledaju svi specifični slučajevi uočava se to da je najgora opcija priključenje solarnih elektrana na krajnjim potrošačkim čvorovima mreže (oba slučaja).

Tabelarni prikaz strujnog opterećenja vodova prije i nakon priključenja PV

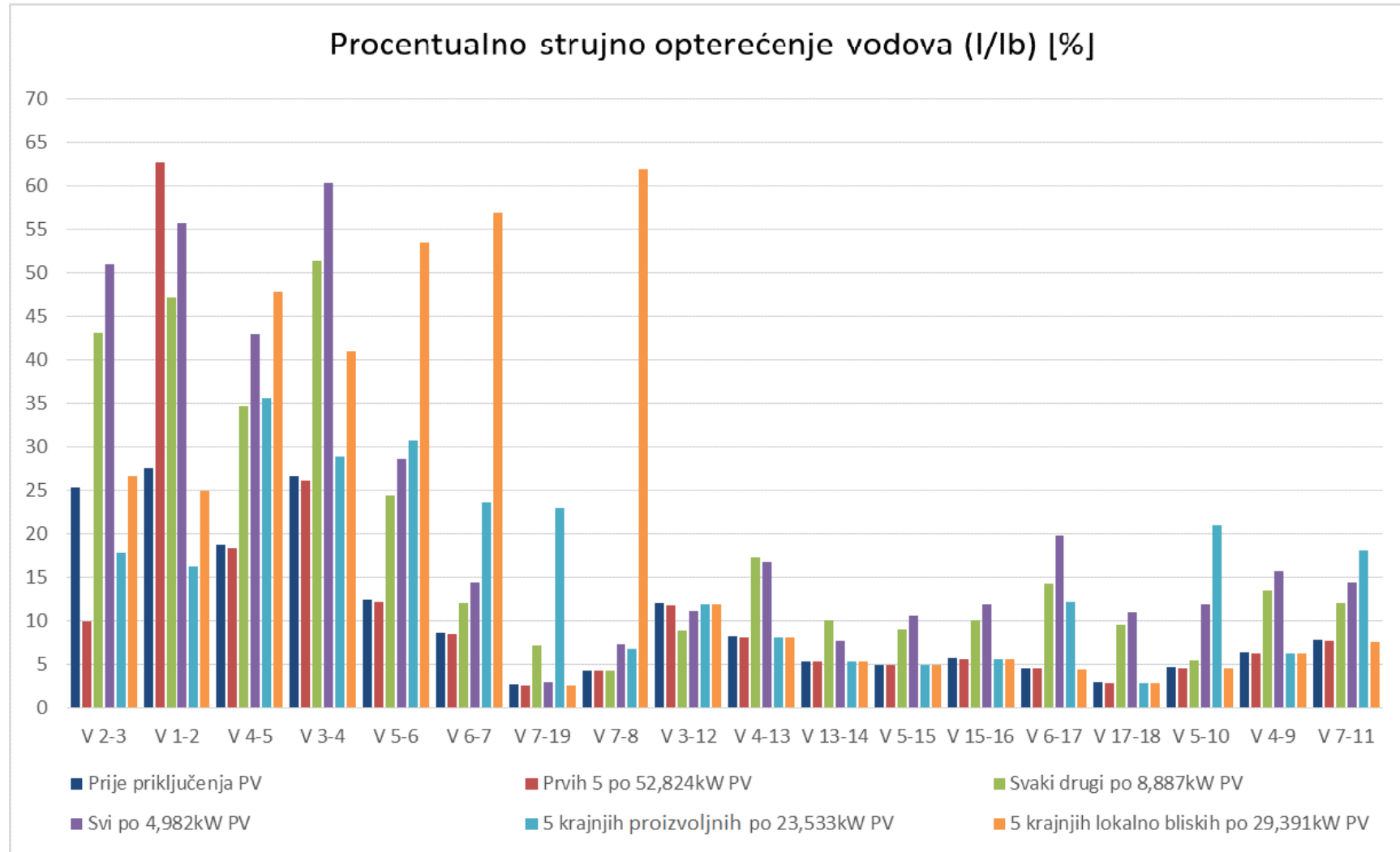
U tabeli su prikazane vrijednosti procentualnog opterećenja vodova u odnosu na njihovu graničnu vrijednost (dozvoljeno termičko opterećenje). Posmatrani su samo vodovi mreže, a ne i potrošački vodovi koji se smatraju unutrašnjim priključkom tj. posmatrani su samo vodovi do mjesta priključenja potrošača na mrežu. Najveće strujno opterećenje se javlja u slučaju najveće snage, tj. kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 52,824kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže kao i kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 29,391kW u 5 krajnjih lokalno bliskih potrošačkih čvorova. Nije samo snaga ta koja utiče na ove vrijednosti već, naravno, presjek i tip vodova mreže.

Tabela 17. Vrijednosti procentualnog strujnog opterećenja vodova

Naziv voda	Prije priključenja PV (I/Ib) [%]	Prvih 5 čvorova po 52,824kW PV (I/Ib) [%]	Svaki drugi čvor po 8,887kW PV (I/Ib) [%]	Svi čvorovi po 4,982kW PV (I/Ib) [%]	5 krajnjih proizvoljnih čvorova po 23,533kW PV (I/Ib) [%]	5 krajnjih lokalno bliskih čvorova po 29,391kW PV (I/Ib) [%]
V 2-3	25,375	9,967	43,106	50,91	17,778	26,586
V 1-2	27,549	62,68	47,167	55,703	16,316	24,883
V 4-5	18,715	18,398	34,675	42,948	35,565	47,865
V 3-4	26,616	26,165	51,341	60,264	28,892	41,001
V 5-6	12,393	12,183	24,479	28,68	30,775	53,514
V 6-7	8,65	8,503	12,123	14,447	23,614	56,892
V 7-19	2,706	2,66	7,15	3	22,91	2,621
V 7-8	4,353	4,279	4,271	7,394	6,828	61,875
V 3-12	12,056	11,852	8,925	11,104	11,94	11,916
V 4-13	8,214	8,075	17,284	16,823	8,101	8,077
V 13-14	5,391	5,3	10,067	7,753	5,317	5,301
V 5-15	5,011	4,926	9,03	10,644	4,924	4,905
V 15-16	5,756	5,658	10,111	11,947	5,655	5,634
V 6-17	4,615	4,537	14,239	19,844	12,214	4,486
V 17-18	2,93	2,88	9,603	11,063	2,853	2,847
V 5-10	4,645	4,567	5,501	11,9	21,026	4,547
V 4-9	6,347	6,24	13,462	15,75	6,26	6,241
V 7-11	7,87	7,736	12,115	14,381	18,121	7,622

Grafički prikaz strujnog opterećenja vodova prije i nakon priključenja PV

Na grafiku se može uočiti da su vodovi mreže najviše strujno opterećeni u slučaju kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 52,824kW na prvih 5 potrošačkih čvorova mreže kao i kada je priključeno 5 solarnih elektrana snage 29,391kW u 5 krajnjih lokalno bliskih potrošačkih čvorova.



6. Zaključak

Na osnovu sprovedenih istraživanja koja su bila predmet ovog rada, može se zaključiti da je upotrebom pogonskih parametara, zahvaćenih naprednom mjernom infrastrukturom, moguće identifikovati ograničenja postojećih propisanih tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije. Pored toga, adekvatnim izborom i uključivanjem dodatnih parametara za provjeru tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije, postiže se efikasnije korišćenje postojeće mrežne infrastrukture u pogledu integracije novih distribuiranih izvora energije.

Analiziranjem seoske i gradske mreže, pomoću PSS SINICAL, sa njihovim prepoznatljivim osobinama u smislu broja potrošača, opterećenja konzuma, presjeka provodnika i sl. pokazano je kako se ista ponaša u karakterističnim slučajevima implementacije distribuiranih izvora energije.

Problemi koji se najviše ističu kod postojećih tehničkih preporuka jesu problem nedostatka analize prostorne raspodjele distribuiranih izvora električne energije gdje je kroz analizu ukazano na posljedice koje se javljaju zbog toga, problem odobrene snage distribuiranih izvora tj. nedostatak kontrole odobrene snage ne uzimajući u obzir buduća priključenja u cilju postizanja maksimalne vrijednosti prihvatne sposobnosti mreže uz zadržavanje postojeće infrastrukture. Sve prethodno navedeno praćeno je nedovoljnim brojem parametara koji se ispituju pri obradi zahtjeva za priključenje.

Predložena rješenja postojećih problema tehničkih preporuka, na čije nedostatke je ukazano, obuhvataju pažljiv odabir parametra za analizu pri obradi zahtjeva za priključenje. Na taj način bi se omogućio presonalizovani pristup svakom pojedinačnom priključenju distribuiranog izvora električne energije a što se odnosi kako na lokaciju tj. mjesto priključenja, tako i na instalisanu snagu distribuiranog izvora, što bi rezultiralo sveukupnom optimizacijom sistema pomoću optimizacije tehničkih uslova za priključenje uz uvažavanje sigurnog i kvalitetnog pogona sistema. Sve to umnogome povećava fleksibilnost sistema prema različitim tipovima opterećenja i pruža podsticaj za povećanje broja zahtjeva za priključenje distribuiranih izvora električne energije. Problemi u implementaciji navedenih rješenja ogledaju se u nedostatku standardizacije i metodologije usljed personalizacije procesa, tehničkim i kadrovskim ograničenjima, regulatornim i administrativnim preprekama kao i nemogućnosti pristupa podacima.

Analizom seoske i gradske mreže za karakteristične slučajeve, prikazane su razlike između lokacija i načina grupisanja distribuiranih izvora električne energije i kako to utiče na mrežu. Analizom prihvatne sposobnosti mreže za distribuiranu proizvodnju (HC analiza), određene su vrijednosti maksimalnih instalisanih snaga solarnih elektrana za sve karakteristične slučajeve priključenja istih na seosku i gradsku mrežu, uzimajući u obzir tehnička ograničenja što dovodi do maksimalnog stepena iskorišćenja postojeće mrežne infrastrukture, povećanja njene efikasnosti i smanjenja troškova. Ključni parametri posmatrani prilikom analiziranja ove dvije mreže jesu promjene napona, gubici aktivne snage, strujno (termičko) opterećenje vodova i maksimalna ukupna instalisana snaga za svaki karakteristični slučaj.

Analizom seoske mreže prikazano je da do najznačajnijeg povećanja napona, najvećih gubitaka aktivne snage u vodovima, najveće zbirne proizvodnje PV kao i najvećeg strujnog opterećenja, dolazi u slučaju kada je u prvih 5 čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana. Najveće procentualne promjene napona u odnosu na stanje prije priključenja solarnih elektrana se javlja u slučaju kada je u prvih 5 čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana i u slučaju kada se na svaki drugi potrošački čvor priključe solarne elektrane. Gubici aktivne

snage u vodovima su najmanji kada su elektrane priključene u svim čvorovima. Solarne elektrane priključene na seosku mrežu su jednake instalisane snage čija vrijednost zavisi od posmatranog slučaja.

Analizom gradske mreže prikazano je da do najznačajnijeg povećanja napona, najvećih gubitaka aktivne snage u vodovima i najveće zbirne proizvodnje PV dolazi u slučaju kada je u prvih 5 čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana. Najveće procentualne promjene napona dešavaju u slučaju kada je u 5 krajnjih lokalno bliskih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana i u slučaju kada se na svaki potrošački čvor priključe solarne elektrane. Najveće strujno opterećenje se javlja u slučaju kada je u prvih 5 čvorova sa početka mreže priključeno 5 solarnih elektrana kao i u slučaju kada je u 5 krajnjih lokalno bliskih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana. Gubici aktivne snage u vodovima su najmanji u slučaju kada je u 5 krajnjih proizvoljno odabranih čvorova priključeno 5 solarnih elektrana. Solarne elektrane priključene na gradsku mrežu su jednake instalisane snage čija vrijednost zavisi od posmatranog slučaja.

Nakon svega navedenog, dolazi se do zaključka da je optimalan slučaj priključenja solarnih elektrana, posmatrajući obavljenju analizu, kako za seosku tako i za gradsku mrežu, kada se na prvih 5 čvorova priključi 5 solarnih elektrana jednake instalisane snage, sa aspekta maksimalne ukupne instalisane snage obnovljivih izvora energije na tom izvodu (za seosku mrežu 132,31kW (maksimalna snaga pojedinačnog izvora je 26,462kW) a za gradsku 264,12kW (maksimalna snaga pojedinačnog izvora je 52,824kW)), uprkos povećanim gubicima u odnosu na ostale specifične situacije koje su analizirane. Dokazano je da se najveća instalisana snaga novih obnovljivih izvora energije (najveća prihvatna sposobnost mreže za distribuiranu proizvodnju) ostvaruje za slučaj priključenja velikih snaga u čvorovima bliskim napojnom čvoru dok se za slučaj omogućavanja svakom potrošaču da postane kupac-proizvođač dobija manja prihvatna sposobnost i to u slučaju seoske mreže iznosi 26,9kW (maksimalna snaga pojedinačnog izvora je 1,076kW) a u slučaju gradske mreže 239,136kW (maksimalna snaga pojedinačnog izvora je 4,982kW). Posmatrajući situaciju iz ugla maksimalne ukupne instalisane snage distribuiranih izvora električne energije, jasne su mane postojećih tehničkih preporuka koje svojim nedostacima dozvoljavaju postizanje graničnih vrijednosti određenih parametara prije nego što se maksimalno iskoristi postojeća mrežna infrastruktura. Adekvatnom obradom zahtjeva za priključenje, blagovremenim planiranjem i usvajanjem prethodno navedenih preporuka postigao bi se optimalan status mreže na svim nivoima.

Mogućnost implementacije navedenih rješenja zavisi od mnogo faktora (tehnoloških, stručnih, administrativnih itd.) koji bi adekvatnim pristupom omogućili jednostavnu primjenu navedenih procesa.

Proračuni u ovom radu su obavljeni na realnim veličinama izvoda seoske i gradske mreže, dok bi pitanje skaliranja dobijenih rezultata na veću mrežu i veći broj izvoda moglo biti predmet budućeg istraživanja.

Buduća istraživanja, kao logičan korak moraju obraditi i temu uključivanja baterijskih sistema kao sastavnog dijela solarnih elektrana kod krajnjih korisnika. Implementacija takvih sistema dovela bi do povećanja stepena iskorišćenja jer bi se višak proizvedene energije skladištilo, smanjili bi se negativni uticaji na mrežu usljed brzih promjena proizvodnje solarnih elektrana koje bi se baterijskim sistemima mogle ublažiti, poboljšao bi se kvalitet napona i pružila mogućnost pomoći pri regulaciji frekvencije. Sve to bi dovelo do veće integracije obnovljivih izvora energije bez narušavanja stabilnosti sistema uz povećanu lokalnu fleksibilnost.

Literatura

- [1] Talha Bin Nadeem, Mubashir Siddiqui, Muhammad Khalid, Muhammad Asif „Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies”, 2023.
- [2] NERC (North American Electric Reliability Corporation) „Distributed Energy Resources Connection Modeling and Reliability Considerations”, 2017.
- [3] Y Tang, MH Coddington, JS Homer, B Sigrin, TE McDermott, BA Mather „Summary of Electric Distribution System Analyses with a Focus on DERs”, 2017.
- [4] Sherif M. Ismael, Shady H.E. Abdel Aleem, Almoataz Y. Abdelaziz, Ahmed F. Zobaa „State of the art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation”, 2018.
- [5] J. Duncan Glover, Thomas J. Overbye, Mulukutla S. Sarma „Power System Analysis & Design (Sixth Edition)”, 2015.
- [6] K. Balamurugan, Dipti Srinivasana „Review of Power Flow Studies on Distribution Network with Distributed Generation” IEEE PEDS 2011, Singapore, 2011
- [7] Lazar Ščekić „Procjena maksimalne sposobnosti niskonaponske elektrodistributivne mreže za priključenje distribuirane proizvodnje na bazi metoda za proračun tokova snaga za neizbalansirane mreže”, magistarski rad, Univerzitet Crne Gore – Elektrotehnički Fakultet, 2022.
- [8] Samar Fatima, Verner Püvi and Matti Lehtonen „Review on the PV Hosting Capacity in Distribution Networks”, 2020.
- [9] „Pravila za funkcionisanje distributivnog sistema električne energije“ Službeni list Crne Gore, br. 072/22 od 11.07.2022. godine
- [10] Sunny Vig, Harvinder Singh „Mitigation of Voltage Instability in the Hybrid Solar or Wind System using Facts Device“ IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022.
- [11] Toshiaki Shioda „Voltage Fluctuation/Flicker International Standards and Measurement Techniques: Standard“ Yokogawa Test & Measurement Corporation, 2021.
- [12] Abubakar Sufyanu „Mitigation of Voltage Fluctuations/Voltage Flicker and Power Quality Improvement in Power Systems Using Distributed Statcom“ Global Journal of Technology and Optimization, 2021.
- [13] Traian-Nicolae Preda, Kjetil Uhlen, Dag Eirik Nordgård „An Overview of the Present Grid Codes for Integration of Distributed Generation“ CIRED Workshop, 2012.
- [14] WECC „Solar Photovoltaic Power Plant Modeling and Validation Guideline“ MVWG, 2019.
- [15] Central Electricity Board „Grid Code for Small Scale Distributed Generation (SSDG)“ CEB, 2019.
- [16] K. Balamurugana, Dipti Srinivasana, Thomas Reindl „Impact of Distributed Generation on Power Distribution Systems”, PV Asia Pacific Conference, 2011.

- [17] I. Atteya¹, N. Fahmi¹, D. Strickland¹, and H. Ashour „Utilization of Battery Energy Storage Systems (BESS) in Smart Grid : A Review”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), 2016.
- [18] Rui Yang, Yingchen Zhang „Coordinated Optimization of Distributed Energy Resources and Smart Loads in Distribution Systems“ National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [19] Lonny Simonian, Thomas Korman, Frederick W. Mowrer, David Phillips „Smart Grid and NFPA Electrical Safety Codes and Standards“, Springer, 2012.
- [20] James Momoh „SMART GRID Fundamentals of Design and Analysis”, IEEE PRESS and A JOHN WILEY & SONS INC, 2012.
- [21] S.M. Al-imran, M.A.R. Fuad, T. Ahmed, M.R. Ali, M.N.I. Maruf „Optimization of Distributed Energy Resources to Balance Power Supply and Demand in a Smart Grid“ Dept. of EEE, Faculty of Engineering American International University-Bangladesh (AIUB), 2015.
- [22] Salvador Acha „Modelling Distributed Energy Resources in Energy Service Networks“ The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [23] Dragan Kovačević, Aleksandar Rakić, Dalibor Muratović, Saša Minić „Napredni sistem upravljanja potrošnjom i brojilima električne energije: Strategija implementacije i primer praktične realizacije“ Zbornik radova, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, 2010.
- [24] Ahmad Alzahrani, Ghulam Hafeez, Sajjad Ali, Sadia Murawwat, Muhammad Iftikhar Khan, Khalid Rehman, Azher M. Abed „Multi-Objective Energy Optimization with Load and Distributed Energy Source Scheduling in the Smart Power Grid“, Sustainability MDPI, 2023.
- [25] Karen Montano-Martinez, Sushrut Thakar, Shanshan Ma, Zahra Soltani, Vijay Vittal, Mojdeh Khorsand, Raja Ayyanar, Cynthia Rojas „Detailed Primary and Secondary Distribution System Model Enhancement Using AMI Data“ IEEE, 2021.
- [26] National Energy Technology Laboratory „Advanced Metering Infrastructure“ U.S. Department of Energy, 2008.
- [27] Energy and Extractives Global Practice Group South Asia Region (SAR) „Data Analytics for Advanced Metering Infrastructure A Guidance Note for South Asian Power Utilities“, 2018.
- [28] Barry Hayes „Distribution Generation Optimisation and Energy Management“ Department of Electrical and Electronic Engineering, National University of Ireland Galway, 2017.
- [29] Ali M. Eltamaly, Yehia Sayed, Abou-Hashema M. El-Sayed, Amer Nasr A. Elghaffar „Optimum Power Flow Analysis By Newton Raphson Method, A Case Study“ International Journal of Engineering, 2018.
- [30] Suchit B. Meshram, Santoshi R. Gawande „Load Flow Analysis By Newton Raphson Method“ IJARIE, 2017.
- [31] Crnogorski Elektrodistributivni Sistem „Plan Razvoja Distributivne Mreže Crnogorskog Elektrodistributivnog Sistema (2020 - 2029)“, 2018.

- [32] Raymond C. Parks „Advanced Metering Infrastructure Security Considerations”, Sandia National Laboratories, 2007.
- [33] Umer Khalid, Dr. Muhammad Nasir Khan „Challenges of Advanced Metering Infrastructure Implementation in Pakistan”, 2014.
- [34] Tomasz Ząbkowski, Marcin Bator, Arkadiusz Orłowski „Smart Metering – A Brief Overview Of Projects, Benefits And Applications”, Faculty Of Applied Informatics And Mathematics, Warsaw University Of Life Sciences (Sggw), 2012.
- [35] Silvia Vitiello, Nikoleta Andreadou, Mircea Ardelean and Gianluca Fulli „Smart Metering Roll-Out in Europe: Where Do We Stand? Cost Benefit Analyses in the Clean Energy Package and Research Trends in the Green Deal”, Energies, 2022.
- [36] „MODERN GRID BENEFITS”, Conducted by National Energy Technology Laboratory for the U.S. Department of Energy, 2007
- [37] Julio Cesar Stacchini de Souza (Senior Member – IEEE), Tatiana Mariano Lessa Assis (Senior Member – IEEE), and Bikash Chandra Pal (Fellow) „Data Compression in Smart Distribution Systems via Singular Value Decomposition”, IEEE, 2017.
- [38] Ali Selim, Salah Kamel, Francisco Jurado „Efficient optimization technique for multiple DG allocation in distribution networks”, Applied Soft Computing, 2020.
- [39] N. Qamar, A. Arshad, K. Mahmoud, and M. Lehtonen „Hosting Capacity in Distribution Grids: A Review of Definitions, Performance Indices, Determination Methodologies, and Enhancement Techniques”, Energy Science & Engineering, 2022.
- [40] Utkarsh Singh (Senior Member – IEEE), Ahmed Al-Durra (Senior Member – IEEE) „Implementing hosting capacity analysis in distribution networks: Practical considerations, advancements and future Directions”, 2023.
- [41] Qianzhi Zhang „Power Flow Calculation in Distribution Systems” Department of Electrical and Computer Engineering Iowa State University
- [42] Van Ky Huynh, Van Duong Ngo, Dinh Duong Le and Nhi Thi Ai Nguyen „Probabilistic Power Flow Methodology for Large-Scale Power Systems Incorporating Renewable Energy Sources”, 2018.
- [43] Hany M. Hasanien, Ibrahim Alsaleh, Zia Ullah, Abdullah Alassaf „Probabilistic optimal power flow in power systems with Renewable energy integration using Enhanced walrus optimization algorithm”
- [44] Chanan Singh, Joydeep Mitra „Monte Carlo Simulation for Reliability Analysis of Emergency and Standby Power Systems”, Department of Electrical Engineering Texas A & M University
- [45] Zoran Miljanić, Računarske metode u EES(skripta), dostupno na linku: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_615412/objava_129841/fajlovi/Prezentacija.pdf
- [46] Nikola Rajaković „Analiza elektroenergetskih sistema 2”, Elektrotehnički fakultet Beograd, 2007.
- [47] Dr. Omar K. Alazzawi „Power System 4”, University of Anbar College of Engineering Department of Electrical Engineering

- [48] Carlos Vargas-Salgadoa, Manuel Alcázar-Ortega, David Alfonso-Solarc and Elías Hurtado-Pérez „Solving power flow problems through the Gauss-Seidel method using Microsoft Excel: Case applied to the course on Generation, Transmission, and Distribution of Electric Power”, CUIEET_29, 2022.
- [49] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen and G. X. Luo „A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks”, IEEE Transactions on Power Systems, 1988.
- [50] Šćekić Lazar, Miljanić Zoran „Korišćenje napredne mjerne infrastrukture za efikasniji monitoring tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama” CIRED, 2021.
- [51] Vladimir Katić, Amir Tokić, Tatjana Konjić „Kvalitet električne energije”, CEFES, 2007.
- [52] Electric Power Research Institute „Studija o priključivanju i radu distribuiranih izvora energije u elektroenergetskom sistemu Crne Gore“ Elektroiinstitut Milan Vidmar, 2013.
- [53] „The Smart Meter Revolution: Towards a Smarter Future”, Telefonica UK
- [54] „Survey of International Experience in Advanced Metering Infrastructure and its Implementation”, World Bank Group – Energy and Extractives Global Practice Group (SAR), 2018.
- [55] N. Mohd Zainuddin, M. S. Abd. Rahman, M. Z. A. Ab. Kadir, N. H. Nik Ali, Z. Ali, Miszaina Osman, Muhamad Mansor, A. Mohd Ariffin, M. Syahmi Abd. Rahman, S. F. M. Nor and N. A. F. Mohamad Nasir „Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges”, IEEE, 2020.
- [56] Jeff Smith, Matthew J. Reno, B. Mather, Robert Broderick, Matthew Rylander „Alternatives to the 15% Rule: Modeling and Hosting Capacity Analysis of 16 Feeders”, Electric Power Research Institute, 2016.
- [57] Benjamin Hankić „Monte Carlo metoda aproksimacije – diplomski rad”, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Fakultet primijenjene matematike i informatike, 2024.
- [58] Chongwu Dong, Tao Yu, Zhenning Pan, Yufeng Wu, Ziyao Wang, Yipeng Wang, Keying Wang „Renewable energy hosting capacity assessment in distribution networks based on multi-strategy improved whale optimization algorithm”, IET Renewable Power Generation, 2024.

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora **Lazar Vučinić**

Broj indeksa/upisa **1018/21**

Studijski program **Elektroenergetski sistemi**

Naslov rada **Optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije**

Mentor **Prof. dr Zoran Miljanić**

Potpisani **Lazar Vučinić**

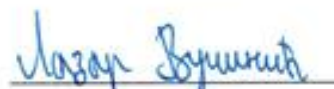
Izjavljujem

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, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

U Podgorici, 06.10.2025. godine

Potpis magistranda



IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

"Optimizacija tehničkih uslova za priključenje distribuiranih izvora energije"

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim priložima predao/la 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

U Podgorici, 06.10.2025. godine

Potpis magistranda

