

Tomislav Antić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[tomislav.antic@fer.hr](mailto:tomislav.antic@fer.hr)

Tomislav Capuder  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
[tomislav.capuder@fer.hr](mailto:tomislav.capuder@fer.hr)

## RAZVOJ PROGRAMSKIH RJEŠENJA ZA MODELIRANJE I ANALIZU NAPREDNIH DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

### SAŽETAK

Kontinuiranim povećanjem udjela distribuiranih izvora energije, zadaća operatora distribucijskog sustava (ODS-a) zahtjevnija je nego prije. Integracija novih tehnologija onemogućuje korištenje tradicionalnih pristupa u planiranju i vođenju distribucijskih mreža. S obzirom na okolišne i ekonomske prednosti integracije distribuiranih izvora energije, od ključne je važnosti razviti metode kojima će se omogućiti analiza tehničkih prilika u distribucijskim mrežama s visokim udjelom niskougličnih tehnologija.

U ovom referatu prikazana su dva razvijena algoritma, algoritam optimalnih tokova snaga u trofaznim distribucijskim mrežama i algoritam harmoničkih tokova snaga u jednofaznim i trofaznim radijalnim distribucijskim mrežama. Za oba algoritma prikazani su matematički modeli kao i rezultati usporedbe s već razvijenim i korištenim simulacijskim alatima. Funkcionalnost razvijenih algoritama prikazana je na dva primjera u kojima se određuje potencijalna maksimalna proizvodnja fotonaponskih panela u niskonaponskim mrežama i analizira utjecaj distribuiranih izvora na harmoničke smetnje u mreži.

**Ključne riječi:** distribucijske mreže, distribuirani izvori energije, harmonička analiza, optimalni tokovi snaga, trofazni elektroenergetski sustavi

### SUMMARY

With the continuous increase in the share of distributed energy resources, the task of the distribution system operator (DSO) is more demanding than before. The integration of new technologies makes it impossible to use traditional approaches in the planning and operation of distribution networks. Given the environmental and economic benefits of integrating distributed energy resources, it is crucial to develop methods that will enable the analysis of technical conditions in distribution networks with a high share of low-carbon technologies.

This report presents two developed algorithms, the three-phase optimal power flow, and the single-phase and three-phase harmonic power flow algorithm. For both algorithms, mathematical models are presented, as well as a comparison of results with already developed and widely-used simulation tools. The functionality of the developed algorithms is shown in two examples in which the potential maximum production of photovoltaic panels in low-voltage networks is determined and the influence of distributed sources on harmonic interference in the network is analyzed.

**Keywords:** distributed energy resources, distribution networks, harmonic analysis, optimal power flow, three-phase power systems

## 1. UVOD

Povećanje udjela obnovljivih izvora energija i ostalih niskougličnih tehnologija u distribucijskim mrežama doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i troškova krajnjih korisnika povezanih s potrošnjom električne energije. Istovremeno, nekoordinirana integracija distribuiranih izvora energije otežava planiranje i vođenje naprednih distribucijskih mreža i negativno utječe na iznose tehničkih veličina u mreži [1,2]. Prilikom brojnih analiza distribucijskih mreža, koristi se veliki broj različitih simulacijskih alata. Alati su komercijalne prirode, temeljeni na razvijenom grafičkom sučelju koje omogućava vizualizaciju elemenata mreže, npr. NEPLAN, Power Factory, ETAP, itd. ili su temeljeni na javno dostupnim programima otvorenog koda, npr. pandapower, OpenDSS, MATPOWER, itd.

Analiza utjecaja jednofaznog priključenja fotonaponskih sustava na iznose napona i naponske nesimetrije u niskonaponskoj distribucijskoj mreži napravljena je korištenjem simulacijskog alata NEPLAN [3]. Detaljan pregled mogućnosti programskog alata NEPLAN u analizama mreža s distribuiranim izvorima priključenim preko energetske elektronike prikazan je u radu [4]. Autori u radu [5] koriste Power Factory u analizi naponske stabilnosti distribucijskog izvoda. Power Factory je korišten i u radu [6], gdje su autori detaljno modelirali distribucijsku mrežu s ciljem analize visokog udjela fotonaponskih sustava na tehničke prilike u mreži. Jedna od primjena programskog alata ETAP je izračun optimalnog udjela električnih vozila u distribucijskim mrežama promatrajući mrežne gubitke i prorađu zaštite [7]. Također, autori rada [8] koriste ETAP u analizi utjecaja punionica električnih vozila s lokalno instaliranim fotonaponskim sustavima na tehničke prilike u distribucijskoj mreži. Glavne prednosti komercijalnih alata su grafičko sučelje koje omogućava jednostavno kreiranje distribucijskih mreža i njihovih elemenata. Najveći nedostaci primjene komercijalnih alata su potreba za često skupim licencama te ograničeni skup mogućih analiza koji u većini slučajeva nije moguće proširiti.

Kako bi se detektirani nedostaci nadomjestili, komercijalni alati se sve češće zamjenjuju javno dostupnim alatima temeljenima na programima otvorenog koda. Jedan od takvih alata je pandapower, programska biblioteka programskog jezika Python koja omogućuje razne analize kao što su proračun tokova snaga [9], proračun kratkog spoja [10], ali i brojne druge analize nakon nadogradnje predstavljene u radu [11]. Osim korištenja programskog jezika Python, određeni alati korišteni u analizi distribucijskih mreža temelje se na drugim programskim jezicima. MATPOWER je simulacijski alat integriran u programski jezik Matlab koji omogućava analize elektroenergetskog sustava u stacionarnom stanju [12]. Programski jezik Julia je sve češće korišten u optimizacijskim postupcima u elektroenergetici, posebice u razvoju i implementaciji algoritama optimalnih tokova snaga u distribucijskim mrežama. Detaljni razvoj lineariziranog algoritma optimalnih tokova snaga u trofaznim distribucijskim mrežama razvijen u programskom jeziku Julia prikazan je u radu [13]. Također, razvoj optimizacijskih algoritma prikazan je u radu [14], u kojem autori prikazuju implementaciju različitih pristupa modeliranju optimalnih tokova snaga u distribucijskim mrežama. Programski jezik Julia korišten je i prilikom proširenja matematičkog modela optimalnih tokova snaga dodatnim harmoničkim ograničenjima [15]. Osim simulacijskih alata temeljenih na raznim programskim jezicima, neki javno dostupni komercijalni alati imaju razvijeno vlastito sučelje i vlastiti pristup kreiranju elemenata mreže. Jedan od takvih alata je OpenDSS, javno dostupni alat korišten u proračunima tokova snaga i harmoničkim analizama, čiji su rezultati korišteni u određivanju optimalne vremenske raspodjele opterećenja i poboljšanju pokazatelja kvalitete električne energije u distribucijskim mrežama [16]. Korištenje javno dostupnih alata ima mnoge prednosti kao što su mogućnost korištenja bez potrebe za skupim licencama, jednostavno povezivanje s drugim vanjskim datotekama i simulacijskim alatima i mogućnost nadogradnje alata. S druge strane, javno dostupni simulacijski alati su često ograničeni brojem simulacija, a iako imaju mogućnost nadogradnje, ona često nije jednostavna i zahtijeva napredno poznavanje određenog programskog jezika.

Nakon detaljnog pregleda literature uočeni su određeni nedostaci u razvoju simulacijskih alata temeljenih na programima otvorenog koda. Fokus istraživanja i razvoja stavljen je na programski jezik Python koji je korišten za razvoj dvije funkcionalnosti:

- Razvoj i implementacija nelinearnog matematičkog modela optimalnih tokova snaga u trofaznim distribucijskim mrežama korištenjem programskog jezika Python i optimizacijskog sučelja Pyomo
- Razvoj i implementacija matematičkog modela harmoničkih tokova snaga u jednofaznim i trofaznim distribucijskim mrežama

Metodologija i matematički model razvijenih i implementiranih algoritama prikazani su u poglavlju 2, verifikacija algoritama i usporedba rezultata s onima dobivenima korištenjem već razvijenih simulacijskih alata prikazani su u poglavlju 3. Primjeri koji pokazuju potencijalnu primjenu razvijenih algoritama prikazani su u poglavlju 4, dok su konačni zaključci dani u poglavlju 5.

## 2. METODOLOGIJA I MATEMATIČKI MODEL

### 2.1. Optimalni tokovi snaga u trofaznim distribucijskim mrežama

Matematički modeli optimalnih tokova snaga često su korišteni algoritmi prilikom rješavanja raznih problema u planiranju i vođenju prijenosnih mreža. Iako se matematički modeli mogu koristiti i u distribucijskim mrežama, njihove karakteristike zahtijevaju određene preinake u modelima kako bi bili iskoristivi u rješavanju problema u distribucijskim mrežama. Dodatne složenije preinake potrebne su u niskonaponskim mrežama s obzirom na to da često korištene pretpostavke o simetričnim elektroenergetskim sustavima i jednofaznim mrežama nisu iskoristive. Zbog toga je matematički model optimalnih tokova snaga potrebno proširiti i nadograditi novim ograničenjima koja će omogućiti razvoj programskog rješenja primjenjivog u planiranju i vođenju naprednih distribucijskih mreža.

Jednadžbama (1) i (2) moguće je odrediti pad realnog i imaginarnog djela napona  $U$ , pri čemu  $i, j$  označavaju promatrana čvorišta,  $p, r$  su oznake faza, a  $t$  je oznaka promatranog vremenskog intervala.

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

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

Tokovi radne i jalove snage grane  $ij$  moguće je odrediti jednadžbama (3) i (4).

$$P_{ij,p,t} = U_{i,p,t}^{re} \cdot I_{ij,p,t}^{re} + U_{i,p,t}^{im} \cdot I_{ij,p,t}^{im} \quad (3)$$

$$Q_{ij,p,t} = U_{i,p,t}^{im} \cdot I_{ij,p,t}^{re} - U_{i,p,t}^{re} \cdot I_{ij,p,t}^{im} \quad (4)$$

Iako se tereti  $ter$  te distribuirani izvori potrošnje i proizvodnje  $DI$  definiraju iznosima radne i jalove snage, korištenjem jednadžbi (5) i (6) definira se njihova veza s njihovim strujama i naponima u čvorištima.

$$P_{ter/DI,i,p,t} = U_{i,p,t}^{re} \cdot I_{ter/DI,i,p,t}^{re} + U_{i,p,t}^{im} \cdot I_{ter/DI,i,p,t}^{im} \quad (5)$$

$$Q_{ter/DI,i,p,t} = U_{i,p,t}^{im} \cdot I_{ter/DI,i,p,t}^{re} - U_{i,p,t}^{re} \cdot I_{ter/DI,i,p,t}^{im} \quad (6)$$

Kako bi se osigurao Kirchoffov zakon struja za realni i imaginarni dio struje, potrebno je implementirati jednadžbu (7).

$$I_{ter,i,p,t}^{re/im} + I_{DI,i,p,t}^{re/im} + I_{i \rightarrow j,p,t}^{re/im} - I_{h \rightarrow i,p,t}^{re/im} = 0 \quad (7)$$

Konačno, potrebno je osigurati da su vrijednosti napona (8), struje (9) i naponske nesimetrije (10) unutar dozvoljenih granica.

$$(U^{min})^2 \leq (U_{i,p,t}^{re})^2 + (U_{i,p,t}^{im})^2 \leq (U^{max})^2 \quad (8)$$

$$(I_{ij,p,t}^{re})^2 + (I_{ij,p,t}^{im})^2 \leq (I^{max})^2 \quad (9)$$

$$\frac{|U_{2,n,t}|^2}{|U_{1,n,t}|^2} \leq (nesimetrija^{max})^2 \quad (10)$$

Prikazane jednadžbe koriste se u implementaciji formulacije temeljene na strujama i naponima (*current-voltage*). Model trofaznih optimalnih tokova snaga moguće je implementirati i korištenjem formulacije temeljene na snagama i naponima (*power-voltage*).

U ovom slučaju, tokovi radne i jalove snage definirani su jednadžbama (11) i (12).

$$P_{ij,p,t} = \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{i,q,t}^{re} + U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{i,q,t}^{im}) \cdot G_{ij,pq} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{i,q,t}^{re} - U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{i,q,t}^{im}) \cdot B_{ij,pq} \\ - \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{j,q,t}^{re} + U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{j,q,t}^{im}) \cdot G_{ij,pq} \\ - \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{j,q,t}^{re} - U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{j,q,t}^{im}) \cdot B_{ij,pq} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij,p,t} = & - \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{i,q,t}^{re} + U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{i,q,t}^{im}) \cdot B_{ij,pq} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{i,q,t}^{re} - U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{i,q,t}^{im}) \\
& \cdot G_{ij,pq} + \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{j,q,t}^{re} + U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{j,q,t}^{im}) \cdot B_{ij,pq} \\
& - \sum_{q \in \{a,b,c\}} (U_{i,p,t}^{im} \cdot U_{j,q,t}^{re} - U_{i,p,t}^{re} \cdot U_{j,q,t}^{im}) \cdot G_{ij,pq}
\end{aligned} \quad (12)$$

Kirchoffov zakon definiran je jednadžbama (13) i (14) za iznose radne i jalove snage svake faze  $p$  i svakog čvorišta  $i$ .

$$P_{ter,i,p,t} + P_{DI,i,p,t} + P_{i \rightarrow j,p,t} - P_{h \rightarrow i,p,t} = 0 \quad (13)$$

$$Q_{ter,i,p,t} + Q_{DI,i,p,t} + Q_{i \rightarrow j,p,t} - Q_{h \rightarrow i,p,t} = 0 \quad (14)$$

Iznosi napona i naponske nesimetrije ograničeni su jednadžbama (9) i (10), kao i u slučaju formulacije temeljene na strujama i naponima, a iznos toka snage ograničen je jednadžbom .

$$P_{ij,p,t}^2 + Q_{ij,p,t}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 \quad (15)$$

## 2.2. Harmonički tokovi snaga u jednofaznim i trofaznim distribucijskim mrežama

Integracija novih distribuiranih izvora proizvodnje i potrošnje može uzrokovati narušavanje kvalitete električne energije. Osim pojave podnapona i nadnapona, te povećane naponske nesimetrije prilikom jednofaznog priključenja novih tehnologija, distribuirani izvori priključeni preko uređaja energetske elektronike doprinose pojavi viših harmonika u distribucijskim mrežama. Kako bi se omogućila procjena doprinosa harmoničkog izvora ukupnom harmoničkom izobličenju, implementiran je matematički model koji omogućuje harmoničke analize u jednofaznim i trofaznim distribucijskim mrežama. Detaljni model proračuna prikazan je u članku [17], a u ovom referatu prikazan je samo skup osnovnih jednadžbi čija implementacija omogućava harmoničku analizu.

U prvom koraku potrebno je kreirati matricu impedancija  $[Z]$ , odnosno  $[Z_{abc}]$  u slučaju trofaznih distribucijskih mreža. Nakon kreiranja matrice za osnovni harmonik, vrijednosti otpora i reaktancije na nenazivnim frekvencijama moguće je izračunati pomoću jednadžbi (16) i (17).

$$R_{ij,h} = R_{ij,1} \quad (16)$$

$$X_{ij,h} = h \cdot X_{ij,1} \quad (17)$$

Prilikom implementacija matematičkog modela harmonički izvori su promatrani kao strujni izvori s definiranim udjelom struje višeg harmonika u osnovnom harmoniku  $i_{n,s,h}$ , odnosno  $i_{p,n,s,h}$  kod jednofaznih izvora te kutom  $\theta_{n,s,h}$ , odnosno  $\theta_{p,n,s,h}$  kod jednofaznih izvora. Iznos struje višeg harmonika  $h$  određen je jednadžbama (18) i (19).

$$I_{n,s,h} = i_{n,s,h} \angle \theta_{n,s,h} \cdot I_{n,s,1} \quad (18)$$

$$I_{n,p,s,h} = i_{n,p,s,h} \angle \theta_{n,p,s,h} \cdot I_{n,p,s,1} \quad (19)$$

pri čemu je  $I_{n,s,1}$  iznos struje osnovnog harmonika određen proračunom tokova snaga za osnovnu frekvenciju, a indeksi  $p, n, s, h$  označavaju fazu, čvorište, harmonički izvor i red višeg harmonika.

U jednom čvorištu moguće je priključiti više različitih harmoničkih izvora  $s$ , npr. fotonaponski sustav i punionicu električnih vozila. U takvim slučajevima potrebno je jednadžbama (20) i (21) odrediti ukupnu struju koju u mrežu injektiraju svi izvori zajedno.

$$I_{n,h} = \sum_{s \in S} I_{n,s,h} \quad (20)$$

$$I_{n,p,h} = \sum_{s \in S} I_{n,p,s,h} \quad (21)$$

Nakon određivanja struje viših harmonika svakog čvorišta, jednadžbama (22) i (23) potrebno je odrediti vektor pada napona za svaki red harmonika, a korištenjem jednadžbi (24) i (25) pomoću izračunatog i poznatog iznosa napona referentnog čvorišta svakog višeg harmonika iznose harmoničkih napona svakog čvorišta

$$[\Delta U_h] = [Z_h] \cdot [I_h] \quad (22)$$

$$[\Delta U_{abc,h}] = [Z_{abc,h}] \cdot [I_{abc,h}] \quad (23)$$

$$U_{n,h} = U_{ref,h} - \Delta U_{n,h} \quad (24)$$

$$U_{n,p,h} = U_{ref,p,h} - \Delta U_{n,p,h} \quad (25)$$

Nakon određivanja iznosa napona i struja svih viših harmonika, jednadžbama (26) i (27) moguće je odrediti faktor ukupnog naponskog i strujnog harmoničkog izobličenja (THD) svakog čvorišta, tj. jednadžbama (28) i (29) vrijednost THD faktora za svaku fazu pojedinog čvorišta.

$$THD_{u,n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_{n,h}^2}}{U_{n,1}} \quad (26)$$

$$THD_{i,n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_{n,h}^2}}{I_{n,1}} \quad (27)$$

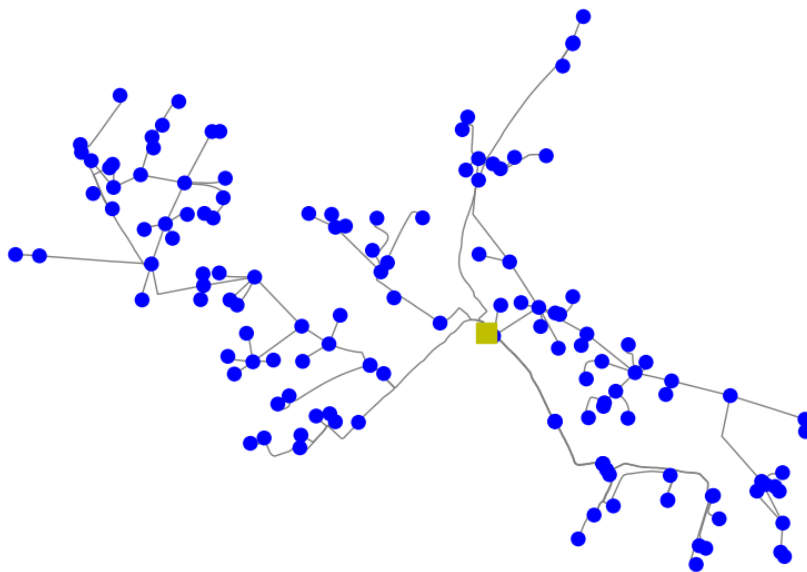
$$THD_{u,p,n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_{n,p,h}^2}}{U_{n,p,1}} \quad (28)$$

$$THD_{i,p,n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_{n,p,h}^2}}{I_{n,p,1}} \quad (29)$$

### 3. VALIDACIJA TOČNOSTI RAZVIJENIH ALGORITAMA

Oba matematička modela implementirana su korištenjem programskog jezika *Python* i nadogradnjom programske biblioteke *pandapower*. Kako bi se potvrdila njihova točnost, rezultati dobiveni simulacijama koristeći implementirane algoritme uspoređeni su s rezultatima dobivenim korištenjem drugih, već razvijenih i implementiranih algoritama.

Verifikacija implementiranog algoritma optimalnih tokova snaga u trofaznim distribucijskim mrežama napravljena je usporedbom s rezultatima dobivenim proračunom tokova snaga koristeći *pandapower*. Za funkciju cilja maksimizacije instalirane snage fotonaponskih panela u niskonaponskoj distribucijskoj mreži osim snage fotonaponskog sustava u svakom čvorištu izračunati su i iznosi napona i struja u mreži. Iste snage fotonaponskog sustava korištene su prilikom kreiranja elemenata mreže u biblioteci *pandapower*. Nakon kreiranja svih elemenata mreže i proračuna tokova snaga iznosi napona su uspoređeni s iznosima dobivenim koristeći implementirani matematički model. Niskonaponska mreža korištena za verifikaciju je stvarna niskonaponska mreža u Republici Hrvatskoj čija je topologija prikazana na slici Slika 1. Model niskonaponske distribucijske mreže kreiran je na temelju prikupljenih GIS podataka koji su prvotno uređeni i prilagođeni za povezivanje s razvijenim programskim alatom. Iznosi faznog opterećenja krajnjih korisnika određeni su na temelju mjerenja i nasumičnom raspodjelom opterećenja s obzirom na to da instalirana napredna brojila mjere isključivo kumulativnu potrošnju u čvorištu.



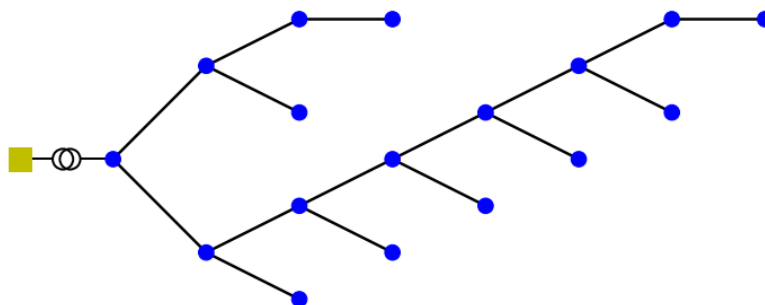
Slika 1 Niskonaponska mreža korištena za verifikaciju algoritma optimalnih tokova snaga

Rezultati usporedbe prikazani su u tablici Tablica I. Usporedbom rezultata vidljive su određene razlike u iznosima napona izračunatima implementiranim algoritmom optimalnih tokova snaga i pandapower programskom bibliotekom. Minimalna greška u oba slučaja je jednaka nuli, a najveća greška je značajno manja od 0,1 p.u. Iznosi ostalih promatranih grešaka su i po nekoliko puta manji od iznosa najveće greške. Nastale razlike posljedica su određenih pretpostavki i različitih pristupa modeliranju elemenata mreže. Unatoč razlikama, njihov iznos ne predstavlja prepreku u korištenju implementiranog algoritma optimalnih tokova snaga u trofaznim distribucijskim mrežama.

**Tablica I Usporedba rezultata – optimalni tokovi snaga**

	Maksimalna greška (p.u.)	Minimalna greška (p.u.)	Prosječna greška (p.u.)	Medijan greške (p.u.)	Root-mean square greška (p.u.)
Formulacija struja-napon	0,0624	0,0000	0,0024	0,0000	0,0086
Formulacija snaga-napon	0,0472	0,0000	0,0074	0,0055	0,0097

Verifikacija algoritma koji omogućuje harmoničke analize napravljena je na isti način kao i verifikacija algoritma optimalnih tokova snaga u distribucijskim mrežama. Implementirani model verificiran je na dva različita primjera usporedbom s rezultatima dobivenim korištenjem NEPLAN i Power Factory simulacijskih alata. U prvom primjeru prikazanom na slici Slika 2 riječ je o jednofaznoj sintetičkoj distribucijskoj mreži.



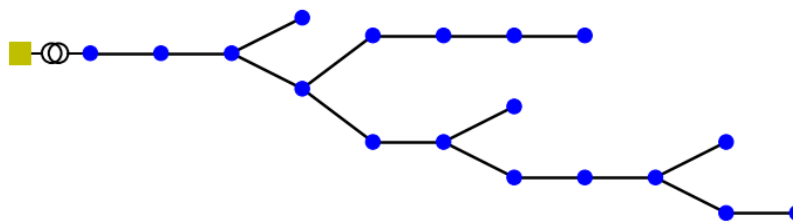
**Slika 2 Kerber sintetička distribucijska mreža**

Tablica II prikazuje usporedbu rezultata dobivenih korištenjem razvijenog alata i NEPLAN i Power Factory komercijalnih alata. Na temelju rezultata moguće je zaključiti da ne postoji značajno odstupanje u točnosti prilikom korištenja razvijenog alata. Pri usporedbi s rezultatima dobivenim korištenjem Power Factory simulacijskog alata, odstupanje je jednako nuli za sve promatrane greške, dok se pri usporedbi s rezultatima dobivenim NEPLAN-om u određenim slučajevima pojavljuje zanemariva greška.

**Tablica II Usporedba rezultata - harmonička analiza u jednofaznim mrežama**

	NEPLAN			Power Factory		
	Minimalna greška (p.u.)	Maksimalna greška (p.u.)	Medijan greške (p.u.)	Minimalna greška (p.u.)	Maksimalna greška (p.u.)	Medijan greške (p.u.)
$U_h$	0,0000	0,0001	0,000	0,0000	0,0000	0,0000
$THD_u$	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
$I_h$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$THD_i$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

S obzirom na razlike pri modeliranju trofaznih distribucijskih mreža, rezultati usporedbe u slučaju jednofaznih mreža nisu dovoljan pokazatelj točnosti algoritma. Zbog toga, modelirana je trofazna niskonaponska CIRED mreža (Slika 3) koja je iskorištena za verifikaciju algoritma s potencijalnom primjenom u trofaznim distribucijskim mrežama.



Slika 3 Niskonaponska CIRED mreža

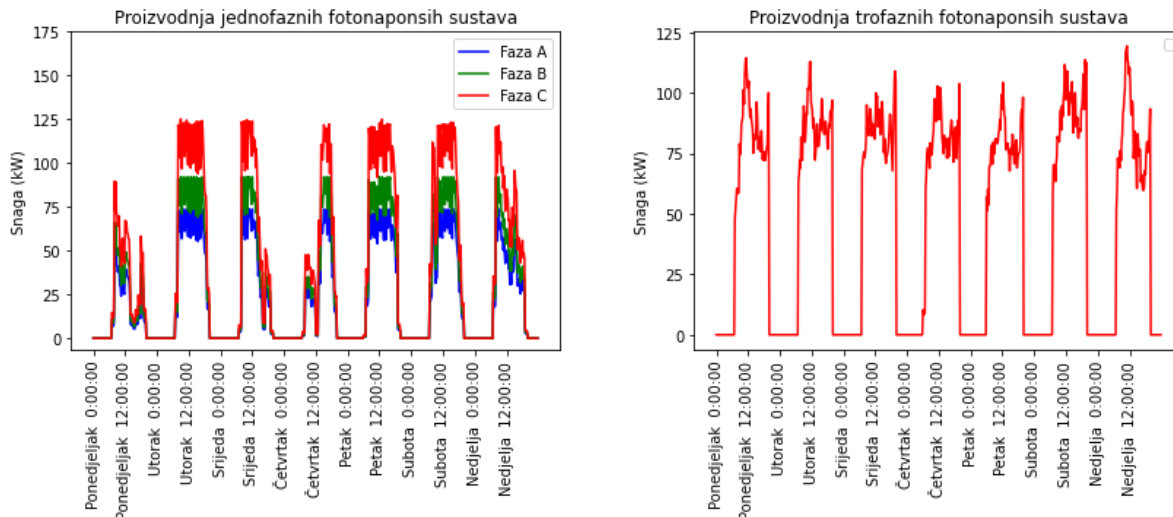
Tablica III prikazuje rezultate usporede u slučaju simulacija provedenih za matematički model trofazne CIGRE niskonaponske mreže. Prilikom izračuna strujnih harmoničkih vrijednosti, greška ne postoji, bez obzira na to promatra li se najveći iznos, najmanji iznosi ili medijan greške i bez obzira na to koristi li se za usporedbu NEPLAN ili Power Factory. U slučaju naponskih harmoničkih veličina, minimalna greška prilikom usporedbe rezultata jednaka je nuli u slučaju korištenja oba alata. Maksimalna greška i medijan greške su manje od grešaka izračunatih za algoritam optimalnih tokova snaga, što dovodi do zaključka o zadovoljavajućoj točnosti algoritma.

Tablica III Usporedba rezultata - harmonička analiza u trofaznim mrežama

	NEPLAN			Power Factory		
	Minimalna greška (p.u.)	Maksimalna greška (p.u.)	Medijan greške (p.u.)	Minimalna greška (p.u.)	Maksimalna greška (p.u.)	Medijan greške (p.u.)
$U_h$	0,0000	0,0027	0,0013	0,0000	0,0085	0,0009
$THD_u$	0,0000	0,0022	0,0006	0,0000	0,0134	0,0025
$I_h$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$THD_i$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

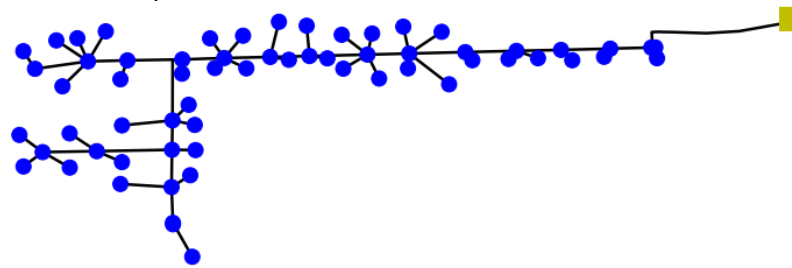
#### 4. POTENCIJALNA PRIMJENA ALGORITMA

Nakon uspješne verifikacije razvijenih alata njihova funkcionalnost dodatno je testirana na dva primjera. U prvom primjeru implementirani algoritam optimalnih tokova snaga primijenjen je u problemu određivanja maksimalne snage instalacije fotonaponskih panela u niskonaponskoj distribucijskoj mreži. Korištena niskonaponska mreža prikazana je na slici Slika 1. Prema Mrežnim pravilima distribucijskog sustava [18] maksimalna priključna snaga proizvođača s jednofaznim priključkom je 3,68 kW, a maksimalna priključna snaga proizvođača s trofaznim priključkom koji se može priključiti na niskonaponski vod iznosi 100 kW. Uz ograničenja i jednadžbe prikazane u poglavlju 2, maksimalne priključne snage su dodatna ograničenja u problemu određivanja kapaciteta mreže prilikom instalacije fotonaponskih panela. Slika 4 prikazuje snagu proizvodnje fotonaponskih sustava u slučaju jednofaznog, odnosno trofaznog priključenja. U ovom slučaju, tehnička ograničenja mreže ograničavaju proizvodnju te je iznos snage proizvodnje sličan u slučaju jednofaznog i trofaznog priključenja. Prikazani rezultati pokazuju jednu od potencijalnih funkcionalnosti razvijenog alata i na temelju njih nije moguće izvesti generalne zaključke, za koje su potrebne detaljnije tehno-ekonomske analize.



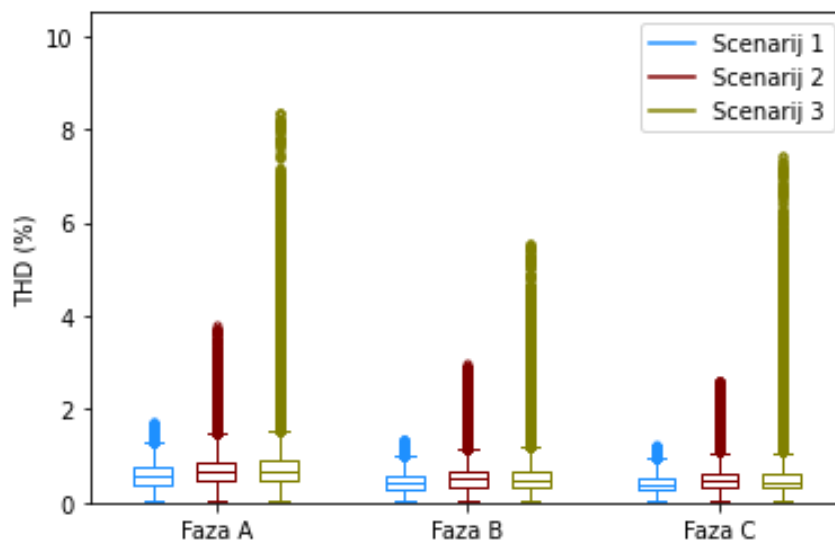
**Slika 4 Snaga proizvodnje fotonaponskih sustava**

Kao i u slučaju algoritma optimalnih tokova snaga, funkcionalnost algoritma koji omogućuje harmoničku analizu u trofaznim distribucijskim mrežama testiran je na matematičkom modelu izvoda stvarne niskonaponske mreže prikazane na slici Slika 5. Osim elemenata mreže, prilikom harmoničke analize korišteni su podaci o potrošnji krajnjih korisnika te nadomjesne krivulje harmoničkih struja za kućanstva, fotonaponske sustave i punionice električnih vozila.



**Slika 5 Niskonaponski izvod**

Nakon matematičkog modela mreže, kreirana su i tri scenarija u kojima u mreži nema fotonaponskih panela i punionica električnih vozila te u kojima se distribuirani izvori nalaze u 40% (scenarij 2) i 80% (scenarij 3) niskonaponskih čvorišta u kojima su priključeni krajnji korisnici. Rezultati prikazani na slici Slika 6 pokazuju porast THD faktora s porastom udjela, što je i očekivano s obzirom na povećani udio i iznos struja, a time i napona viših harmonika. Detaljnije analize i metode kojima se smanjuje utjecaj distribuiranih izvora na iznos harmoničkih smetnji izlaze izvan opsega ovog referata.



**Slika 6 Rezultati harmoničke analize niskonaponskog izvoda**



## 5. ZAKLJUČAK

Nekoordinirana integracija distribuiranih izvora energija stvara izazove u planiranju i vođenju naprednih distribucijskih mreža i zahtijeva od operatora distribucijskog sustava korištenje novih metoda i alata koji će omogućiti razne tehničke analize mreže, kao i procjenu učinka distribuiranih izvora na tehnokonomске aspekte planiranja i vođenja naprednih distribucijskih mreža. S ciljem omogućavanja takvih analiza, razvijena su dva alata temeljena na programskom jeziku Python i programskoj biblioteci pandapower. Koristeći već postojeće funkcionalnosti, ali i dodavanjem određenih novih funkcija, uspješno su implementirani algoritam optimalnih i harmoničkih tokova snaga u distribucijskim mrežama.

Iznosi napona izračunati razvijenim algoritmom optimalnih tokova snaga uspoređeni su s rezultatima napona izračunatima korištenjem pandapower biblioteke, a harmoničke strujne i naponske veličine izračunate razvijenim algoritmom koji omogućava harmoničku analizu uspoređene su s iznosima izračunatima korištenjem simulacijskih alata NEPLAN i Power Factory. Usporedba rezultata ne pokazuje značajna odstupanja prilikom korištenja razvijenih alata, čime je omogućena primjena razvijenih alata u daljnjim analizama i simulacijama.

Nakon verifikacije, potencijalne funkcionalnosti alata prikazane su na primjerima stvarnih distribucijskih mreža, pri čemu je algoritam optimalnih tokova snaga testiran za određivanje maksimalne instalirane snage fotonaponskih sustava u niskonaponskoj distribucijskoj mreži, a algoritam harmoničkih tokova snaga iskorišten je za simulacije koje pokazuju utjecaj priključenja distribuiranih izvora na povećanje harmoničkog izobličenja u niskonaponskoj mreži. Funkcionalnost oba testirana algoritma omogućuje njihovo daljnje korištenje u vođenju naprednih distribucijskih mreža.

## 6. ZAHVALA

Rad je sufinanciran projektom FLEXIGRID (sporazum o dodjeli sredstava 854579) iz istraživačkog i razvojnog programa Europske unije Horizon 2020. Ovaj rad odražava stajalište FLEXIGIRD konzorcija i Europska komisija nije odgovorna za bilo kakvo korištenje na temelju informacija koje rad sadrži.

Rad je sufinancirala Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj projektom KK.01.2.1.02.0042 DINGO.

## 7. LITERATURA

- [1] T. Antić, T. Capuder, Utilization of physical devices for the improvement of power quality indicators during the COVID-19 pandemic and uncoordinated integration of low carbon units, *Sustain. Energy, Grids Networks*. 32 (2022) 100926. <https://doi.org/10.1016/J.SEGAN.2022.100926>.
- [2] T. Antic, T. Capuder, Analysis of power quality concerning COVID-19-related anomalies and integration of distributed energy resources, *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP. 2022-May (2022)*. <https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808683>.
- [3] T. Antić, T. Capuder, M. Bolfek, A Comprehensive Analysis of the Voltage Unbalance Factor in PV and EV Rich Non-Synthetic Low Voltage Distribution Networks, *Energies* 2021, Vol. 14, Page 117. 14 (2020) 117. <https://doi.org/10.3390/EN14010117>.
- [4] M. Zidar, N. Holjevac, I. Kuzle, Mogućnosti programskog alata Neplan pri modeliranju distribuiranih izvora priključenih preko učinske elektronike, in: 15. Simp. o Vođenju EES-A, Cavtat, 2022.
- [5] S. Maharjan, D. Sampath Kumar, A.M. Khambadkone, Enhancing the voltage stability of distribution network during PV ramping conditions with variable speed drive loads, *Appl. Energy*. 264 (2020) 114733. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114733>.
- [6] D. Chaturangi, U. Jayatunga, M. Rathnayake, A. Wickramasinghe, A. Agalgaonkar, S. Perera, Potential power quality impacts on LV distribution networks with high penetration levels of solar PV, *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP. 2018-May (2018)* 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378890>.
- [7] S.R.K. Najafabadi, B. Fani, I. Sadeghkhani, Optimal Determination of Photovoltaic Penetration Level

- Considering Protection Coordination, *IEEE Syst. J.* 16 (2022) 2121–2124. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3052527>.
- [8] M.T. Turan, Y. Ates, O. Erdinc, E. Gokalp, J.P.S. Catalão, Effect of electric vehicle parking lots equipped with roof mounted photovoltaic panels on the distribution network, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 109 (2019) 283–289. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2019.02.014>.
- [9] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schafer, J.H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, M. Braun, Pandapower - An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems, *IEEE Trans. Power Syst.* 33 (2018) 6510–6521. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829021>.
- [10] L. Thurner, M. Braun, Vectorized Calculation of Short Circuit Currents Considering Distributed Generation-An Open Source Implementation of IEC 60909, *Proc. - 2018 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT-Europe 2018.* (2018). <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE.2018.8571529>.
- [11] R. Bolgaryn, G. Banerjee, D. Cronbach, S. Drauz, Z. Liu, M. Majidi, H. Maschke, Z. Wang, L. Thurner, Recent Developments in Open Source Simulation Software pandapower and pandapipes, 1st Int. Work. Open Source Model. Simul. Energy Syst. OSMSES 2022 - Proc. (2022). <https://doi.org/10.1109/OSMSES54027.2022.9769084>.
- [12] R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, R.J. Thomas, MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education, *IEEE Trans. Power Syst.* 26 (2011) 12–19. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>.
- [13] S. Claeys, F. Geth, M. Sankur, G. Deconinck, No-Load Linearization of the Lifted Multi-Phase Branch Flow Model: Equivalence and Case Studies, *Proc. 2021 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Eur. Smart Grids Towar. a Carbon-Free Futur. ISGT Eur. 2021.* (2021). <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE52324.2021.9639999>.
- [14] D.M. Fobes, S. Claeys, F. Geth, C. Coffrin, PowerModelsDistribution.jl: An open-source framework for exploring distribution power flow formulations, *Electr. Power Syst. Res.* 189 (2020) 106664. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2020.106664>.
- [15] F. Geth, T. Van Acker, Harmonic optimal power flow with transformer excitation, *Electr. Power Syst. Res.* 213 (2022) 108604. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2022.108604>.
- [16] D. Thomas, G. D'Hoop, O. Deblecker, K.N. Genikomsakis, C.S. Ioakimidis, An integrated tool for optimal energy scheduling and power quality improvement of a microgrid under multiple demand response schemes, *Appl. Energy.* 260 (2020) 114314. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114314>.
- [17] T. Antić, L. Thurner, T. Capuder, I. Pavić, Modeling and open source implementation of balanced and unbalanced harmonic analysis in radial distribution networks, *Electr. Power Syst. Res.* 209 (2022) 107935. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2022.107935>.
- [18] Mrežna pravila distribucijskog sustava, (n.d.). [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_08\\_74\\_1539.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html) (accessed January 24, 2023).