

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

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

MODELIRANJE I ANALIZA NISKONAPONSKIH MREŽA TEMELJENE NA PODATCIMA PRIKAZANIM U GEOINFORMACIJSKIM SUSTAVIMA

SAŽETAK

Tradicionalne distribucijske mreže karakterizirane su niskom dogledljivošću i podatci potrebni za njihovo učinkovito planiranje i vođenje nisu uvijek bili dostupni. Integracijom distribuiranih izvora energije i ostalim promjenama, potreba za kontinuiranim praćenjem stanja u mreži je u porastu.

Korištenje alata temeljenih na geografskim informacijskim sustavima (GIS) i naprednih brojila povećava dogledljivost mreže i olakšava vođenje operatoru distribucijskog sustava. Međutim, podatci prikupljeni iz GIS alata i naprednih brojila nisu uvijek iskoristivi u početnom obliku i prije njihovog korištenja u daljnjim simulacijama distribucijskih mreža, prikupljene podatke je potrebno obraditi, urediti i ukloniti pronađene greške.

U ovom radu prezentirana je metoda detekcije i uklanjanja grešaka u GIS podacima te njihovo daljnje korištenje u proračunima kvalitete električne energije u distribucijskim mrežama.

Ključne riječi: distribucijske mreže, distribuirani izvori energije, geografski informacijski sustavi, harmonička analiza, kvaliteta električne energije, proračun tokova snaga

MODELLING AND ANALYSIS OF LOW VOLTAGE NETWORKS BASED ON DATA REPRESENTED IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

SUMMARY

Traditional distribution networks are characterized by low observability and the data necessary for their effective planning and operation was not always available. With the integration of distributed energy resources and other changes, the need for continuous monitoring of the network is increasing.

The use of tools based on geographic information systems (GIS) and advanced meters increases network observability and facilitates operation for the distribution system operator. However, the data collected from GIS tools and advanced meters are not always usable in their initial form, and before their use in further simulations of distribution networks, the collected data must be processed, edited and found errors must be removed.

This paper presents a method of detecting and removing errors in GIS data and their further use in power quality calculations in distribution networks.

Keywords: distributed energy resources, distribution networks, geographic information systems, harmonic analysis, load flow calculations, power quality

1. UVOD

Distribucijske mreže su u prošlosti bile karakterizirane pasivnim krajnjim korisnicima s lako predvidljivim obrascima potrošnje, što je uvelike olakšavalo planiranje i vođenje distribucijskih mreža. Integracijom distribuiranih izvora energije i ostalim promjenama u elektroenergetskom sustavu, planiranje i vođenje distribucijskih mreža je postalo otežano. Cilj digitalizacije i povećanja dogledljivosti distribucijskih mreža je olakšavanje zadaće operatora distribucijskog sustava (ODS-a). Proces digitalizacije obuhvaća brojne promjene u nadzoru i praćenju stanja distribucijskih mreža, uključujući povećanje udjela naprednih brojila i korištenje alata temeljenih na geografskom informacijskom sustavu (GIS).

GIS alati omogućuju prostornu vizualizaciju distribucijske mreže kao i pohranjivanje tehničkih atributa elemenata mreže, a njihova primjena je moguća i u kreiranju matematičkog modela mreže. Najveći problem korištenja GIS podataka u kreiranju matematičkog modela mreže su česte greške u početnom skupu podataka. Greške je potrebno detektirati, a zatim i ukloniti, kako bi se osiguralo uspješno uređivanje početnog skupa podataka i omogućilo njihovo daljnje korištenje u analizama distribucijskih mreža. Autori rada [1] prezentiraju jedan od načina uklanjanja detektiranih grešaka u GIS podacima koji prikazuju elemente niskonaponske mreže. Nakon uspješnog uklanjanja grešaka, GIS podatke je moguće povezati sa simulacijskim alatima te ih iskoristiti u analizama distribucijskih mreža [2]. Osim kreiranja matematičkog modela mreže, GIS podatci se mogu primijeniti i u brojne druge svrhe, primjerice u određivanju optimalne lokacije instalacije fotonaponskih elektrana [3], određivanju potencijalne maksimalne snage fotonaponskih elektrana u distribucijskoj mreži [4], u vizualizaciji rezultata proračuna tokova snaga [5], itd. U vođenju naprednih distribucijskih mreža sve češće se koriste i podatci prikupljeni s naprednih brojila. Kao i u GIS podacima, prikupljena mjerenja mogu sadržavati određene greške koje onemogućuju njihovo korištenje u potrebnim analizama te zahtijevaju prethodnu obradu i uređivanje podataka [6].

Uređeni GIS podatci i prikupljena mjerenja iskoristiva su u brojnim analizama elektroenergetskog sustava. U radu [7] autori analiziraju utjecaj jednofazno priključenih fotonaponskih sustava na iznose napona i naponske nesimetrije u niskonaponskoj distribucijskoj mreži modeliranoj na temelju prikupljenih GIS podataka. Autori rada [8] modeliraju srednjonaponsku i niskonaponsku mrežu, analiziraju utjecaj distribuiranih izvora energije na pokazatelje kvalitete električne energije i provjeravaju je li moguće promjenom grupe spoja transformatora utjecati na širenje smetnji iz niskonaponske u srednjonaponsku distribucijsku mrežu. Utjecaj distribuiranih izvora energije na pokazatelje kvalitete električne energije analiziran je i u radu [9] u kojem autori dodatno promatraju iznose gubitaka električne energije te uspoređuju efikasnost metoda za poboljšanje kvalitete električne energije i smanjenje gubitaka.

Osim izazova uzrokovanih nekoordiniranom integracijom distribuiranih izvora, zadnje tri godine obilježene pandemijom koronavirusa uzrokovale su dodatne poteškoće u vođenju distribucijskih mreža. Potrošnja električne energije u visokonaponskim i srednjonaponskim mrežama se smanjila, obrasci ponašanja krajnjih korisnika su se promijenili, više vremena su provodili kod kuće, što je dovelo do povećanja potrošnje električne energije korisnika kategorije kućanstvo na niskonaponskoj razini [10]. Unatoč smanjenju utjecaja koronavirusa na svakodnevni život, određene navike, kao što je učestali rad od kuće, nisu se vratile na predpandemijsku razinu. Zbog toga su određeni izazovi u vođenju distribucijskih mreža nastali u pandemijsko vrijeme i dalje aktualni.

Na temelju pregleda literature i uočenih poteškoća u vođenju naprednih distribucijskih mreža, u ovom referatu prezentirani su slijedeći doprinosi:

- Metoda detekcija i uklanjanja grešaka u GIS podacima koji prikazuju elemente niskonaponske distribucijske mreže.
- Povezivanje GIS podataka i programskog alata za simulacije naprednih distribucijskih mreža pandapower.
- Analiza utjecaja pandemije koronavirusa i nekoordinirane integracije distribuiranih izvora energije na pokazatelje kvalitete električne energije u distribucijskim mrežama.

U poglavlju 2 ovog referata prikazan je detaljan pregled metodologije uklanjanja detektiranih grešaka u GIS podacima, u poglavlju 3 su prikazani rezultati simulacija, dok su konačni zaključci izloženi u poglavlju 4.

2. METODOLOGIJA

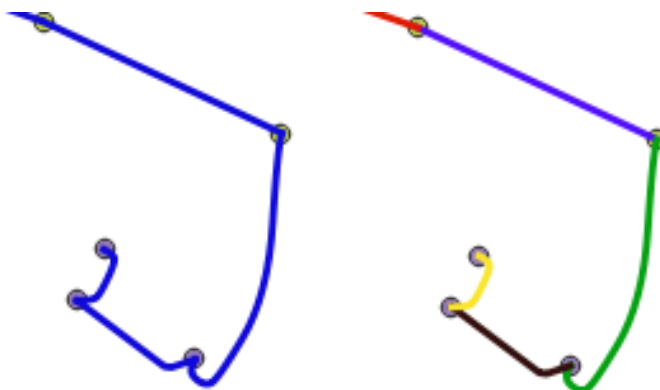
Prije uklanjanja grešaka u GIS podacima potrebno je odrediti skup alata koji će se koristiti u postupku. S obzirom da skup detektiranih grešaka uvelike ovisi o promatranim podacima, tj. o promatranju niskonaponskoj distribucijskoj mreži, ideja je koristiti programska rješenja koja će pružiti određenu fleksibilnost te omogućiti implementaciju dodatnih geoprostornih operacija u slučaju novo otkrivenih

grešaka. Nakon provedene analize dostupnih rješenja odabrani su QGIS – aplikacija za prikaz i uređivanje GIS podataka, Python – programski jezik s brojnim funkcijama koje omogućavaju uređivanje geoprostornih podataka te PostgreSQL s postgis ekstenzijom koji je korišten za stvaranje geoprostorne baze podataka i izvršavanje određenih geoprostornih upita.

Na temelju GIS podataka koji opisuju nekoliko niskonaponskih distribucijskih mreža definiran je skup svih grešaka koje su se pojavile u GIS podatcima promatranih niskonaponskih mreža. Detektirane greške su:

- Neprekinutost linijskih objekata
- Nepovezanost elemenata
- Nepoznata početna i/ili krajnja točka linijskih objekata
- Redundantnost elemenata
- Nepoznati podatci o tehničkim atributima elemenata mreža

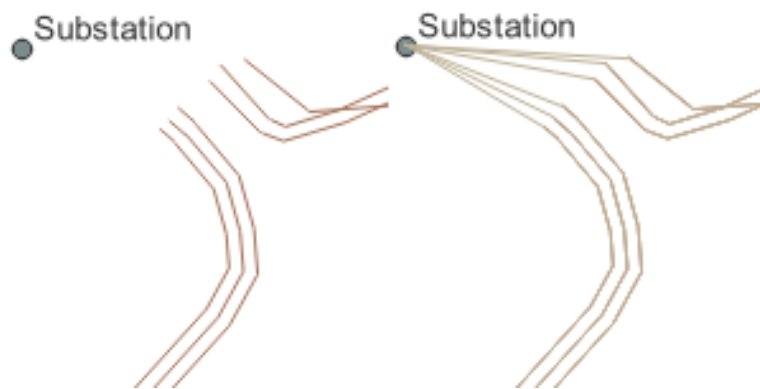
Većina niskonaponskih dionica, tj. vodova i kabela niskonaponskih mreža, je definirano kao linijski objekt koji se sastoji od koordinata više kraćih linijskih objekata. U većini slučajeva vod ili kabel nije topološki podijeljen na više linijskih objekata. Na svakom linijskom objektu koji predstavlja vod ili kabel nalaze se točkasti objekti koji prikazuju niskonaponske spojnice, stupove, kabelaške glave i slične elemente. Iako točkasti elementi dijele koordinate s linijskim objektom na kojem se nalaze, oni nisu topološki povezani i često se za takve elemente kaže da su „u zraku“. Taj problem onemogućuje korištenje linijskih i točkastih objekata u kreiranju matematičkog modela mreže i korištenjem prethodno spomenutih programskih rješenja problem je potrebno riješiti. Na mjestima preklapanja koordinata točkastih i linijskih objekata NN dionica je podijeljena na više segmenata. Na taj način, svaka dva točkasta objekta, primjerice svaka dva stupa povezana su segmentom linijskog objekta, tj. jednim vodom. Sa stajališta matematičkog modela mreže, opisani postupak omogućava kreiranje dvije sabirnice i voda koji ih povezuje. Važno je napomenuti da se prilikom geoprostornih upita čuvaju informacije o tehničkim karakteristikama linijskih objekata, a da se duljina svakog segmenta računa sukladno udjelu njegove duljine u ukupnoj duljini niskonaponske dionice koja je definirana kao atribut linijskog objekta. Opisani postupak podjele dionice na segmente prikazan je slikom Slika 1.



Slika 1 Podjela niskonaponske dionice na segmente

U promatranom skupu podataka određeni točkasti i linijski objekti nisu topološki povezani, a taj problem se ne može riješiti na isti način kao i kod točkastih elemenata koji se nalaze na niskonaponskim dionicama. Transformatorske stanice i niskonaponski ormarići u GIS aplikaciji su definirani kao poligoni s jednom središnjom točkom. Prilikom ucrtavanja elemenata, niskonaponske dionice ne idu do središta poligona nego do vanjskog ruba njegove površine, a s obzirom na to da se u bazi pohranjuje samo koordinata centra poligona, niskonaponska dionica i centar poligona ne dijele niti jednu koordinatu, tj. nisu međusobno topološki povezani. S obzirom da su niskonaponski ormarići i transformatorska stanica u matematičkom modelu mreže prikazani kao niskonaponsko čvorište, između tog i drugog čvorišta niskonaponske mreže mora postojati vod ili kabel koji ih povezuje. Kako bi se povezanost osigurala, u slučajevima u kojima početna ili konačna koordinata linijskog objekta ne odgovaraju niti jednom točkastom objektu, provodi se prostorna pretraga koordinate transformatorske stanice ili niskonaponskog objekta unutar kruga definiranog promjera. Isto kao i u prethodno opisanoj geoprostornoj operaciji, vrijednost tehničkih atributa potrebnih u daljnjim analizama ostaje sačuvana kroz sve upite. Povezivanje točkastog i linijskog objekta nakon opisanog postupka prikazano je na slici Slika 2.

Prilikom kreiranja modela mreže u raznim simulacijskim alatima u većini se slučajeva koriste datoteke koje osim tehničkih parametara mreže sadrže i informacije o povezanosti mreže, tj. informacije o tome koja dva čvorišta mreže povezuje jedan vod ili kabel. Prilikom korištenja GIS podataka u početnom obliku, informacije o početnom i konačnom čvorištu linijskog objekta nisu dostupne. Iz tog je razloga



Slika 2 Povezivanje točkastog i linijskog objekta

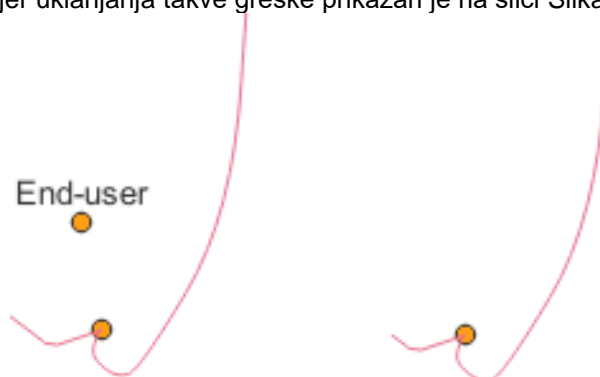
određenim upitima potrebno odrediti koja su to čvorišta koja određeni vod ili kabel povezuje. Većina niskonaponskih dionica dijeli početnu i/ili konačnu koordinatu s nekom od koordinata točkastih objekata u promatranom skupu GIS podataka. Pronalaženjem zajedničkih koordinata postojeći skup podataka moguće je proširiti informacijama o točkama koje linijski objekt povezuje čime je omogućen jednostavan i automatiziran pristup kreiranju matematičkog modela mreže.

Nakon svih geoprостornih upita i pretrage cijelog skupa GIS podataka, određenim niskonaponskim dionicama i dalje nije moguće odrediti početnu i/ili konačnu točku. U takvim slučajevima potrebno je kreirati novi točkasti element nazvan virtualno čvorište. Virtualno čvorište je definirano kao pomoćni element u kojem je iznos potrošnje jednak nuli i koristi se isključivo za omogućavanje kreiranja matematičkog modela mreže s obzirom na to da u simulacijskim alatima svi kabeli i vodovi moraju povezivati dva elementa i slučaj u kojemu početak ili kraj voda, odnosno kabela nema pripadajući element uzrokuje grešku u modelu i onemogućuje daljnje proračune. Virtualna sabirnica kao konačno čvorište linijskog objekta prikazana je na slici Slika 3.



Slika 3 Kreiranje točkastog objekta (virtualno čvorište)

Nakon povezivanja svih točkastih i linijskih objekata u mreži određene točkaste objekte i dalje nije moguće pridružiti niti jednom linijskom objektu, tj. svi linijski objekti imaju poznate početne i konačne točke, a i dalje postoje nepridruženi točkasti objekti. Takvi objekti onemogućuju analize niskonaponskih mreža i potrebno ih je ukloniti. Primjer uklanjanja takve greške prikazan je na slici Slika 4.



Slika 4 Uklanjanje topološki nepovezanog čvorišta

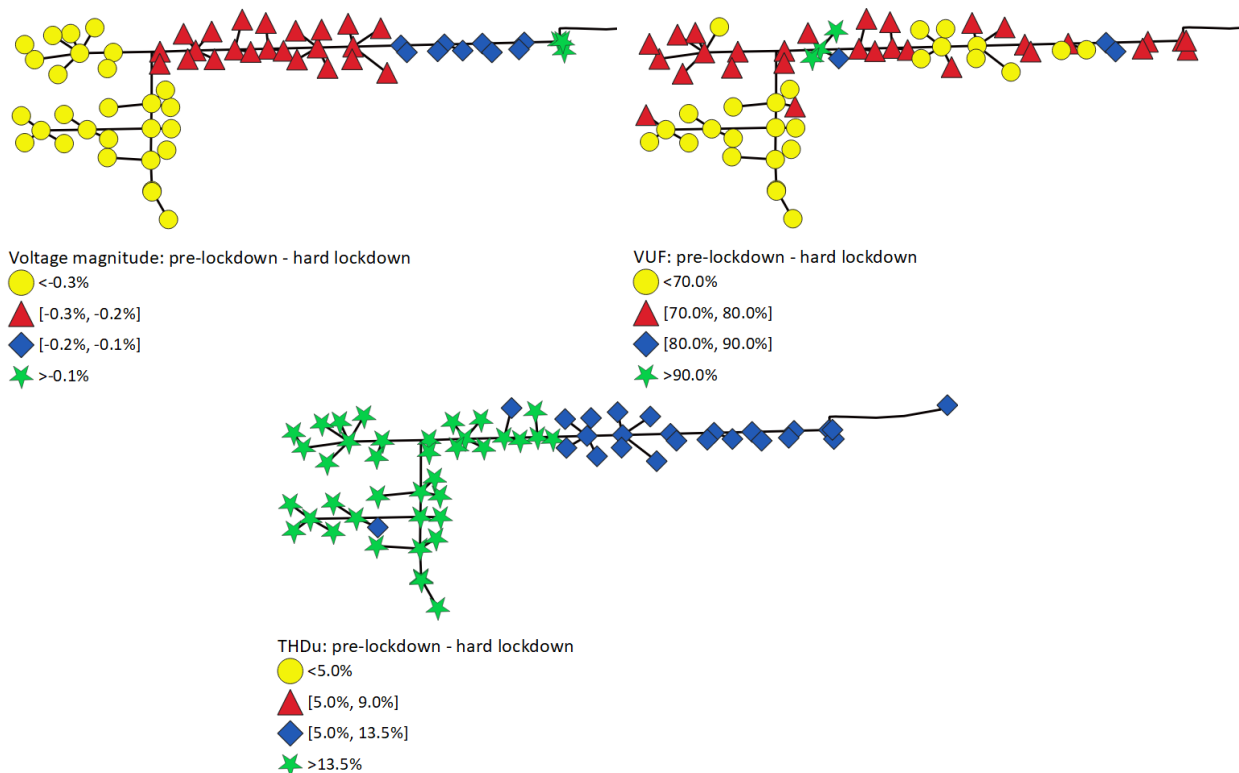
Posljednja uočena greška vezana je uz nepoznate podatke o tehničkim atributima elemenata sustava. Najčešće je riječ o niskonaponskim dionicama kojima nedostaje atribut tipa voda/kabela, odnosno nedostaju podatci o otporu, reaktanciji, nazivnoj struji itd. Pretragom u bazi s podacima o karakterističnim kabelima i vodovima određuje se najčešći tip kabela ili voda uz razlikovanje tipova koji su karakteristični za magistralne vodove/kabele i vodove/kabele koji od stupa ili ormarića idu do krajnjih korisnika. Nakon pretrage baze i određivanja najčešćih vrijednosti, nepoznatim atributima se pridjeljuju tipske vrijednosti.

S obzirom na to da su izvršene sve geoprostorne operacije kojima su uspješno uklonjene greške u početnom skupu GIS podataka, uređeni skup podataka je moguće povezati s programskim alatom pandapower koji omogućuje kreiranje matematičkog modela mreža i analize u naprednim distribucijskim mrežama. GIS podatci i pandapower korišteni su u analizi utjecaja pandemije koronavirusa na kvalitetu električne energije, u kojoj su GIS podatci dodatno korišteni i za vizualizaciju, odnosno prikaz rezultata te u analizi utjecaja distribuiranih izvora energije na širenje smetnji vezanih uz nezadovoljavajuću kvalitetu električne energije iz niskonaponskih u srednjonaponske distribucijske mreže.

3. REZULTATI

3.1. Primjena GIS alata u vizualizaciji rezultata proračuna

Kao što je ranije spomenuto, pandemija koronavirusa utjecala je na mnoge sektore, uključujući i elektroenergetski sektor. Brojne mjere i restrikcije uzrokovale su promjene ponašanja i ograničavanje rada brojnih poslova i industrija što je dovelo do sveukupnog smanjenja potrošnje, ali i porasta potrošnje kućanstava priključenih na niski napon. S obzirom na veliki utjecaj opterećenja korisnika na iznos napona u čvorištu, cilj ovog referata je analizirati utjecaj povećanja potrošnje u vrijeme pandemije koronavirusa na iznos napona, ali i ostale pokazatelje kvalitete električne energije, faktor naponske nesimetrije i faktor naponskog harmoničkog izobličenja (THD). Slika 5 prikazuje GIS vizualizaciju rezultata analize utjecaja pandemije na pokazatelje kvalitete električne energije u rezidencijalnoj niskonaponskoj distribucijskoj mreži.

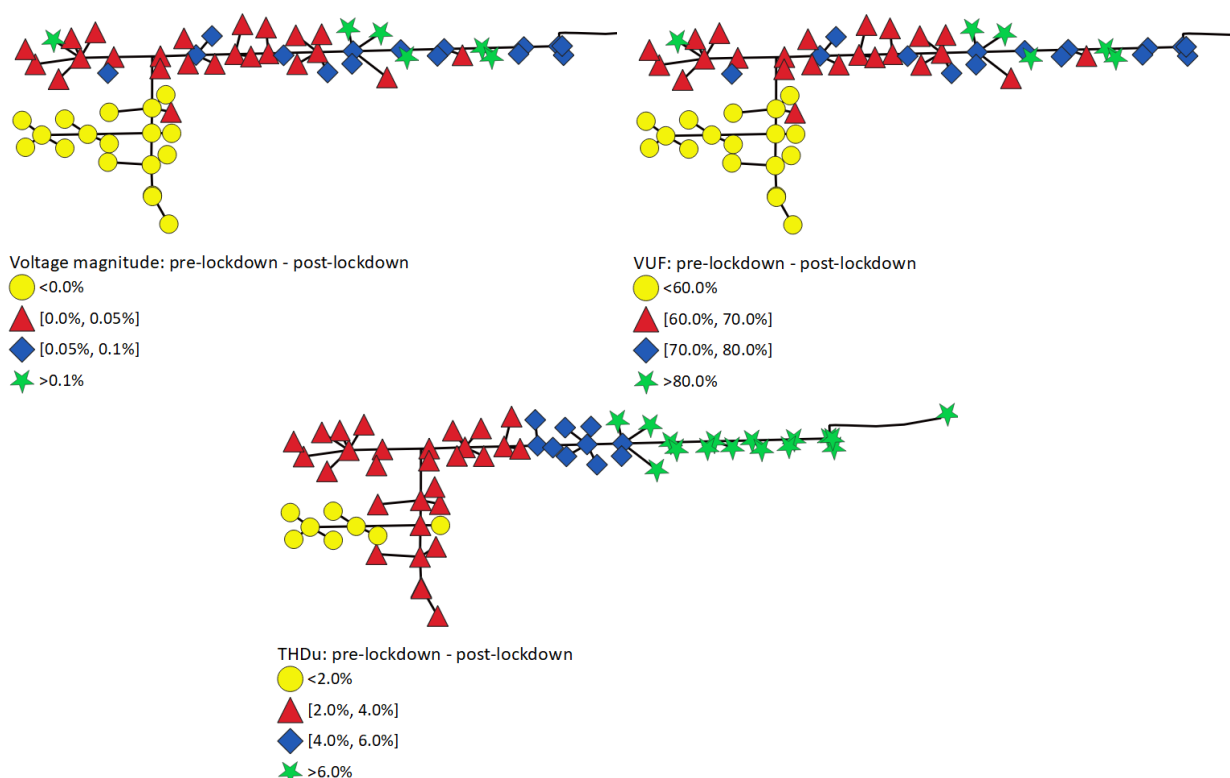


Slika 5 Promjena iznosa pokazatelja kvalitete električne energije za vrijeme pandemije

Prilikom simulacija korišteni su podaci o potrošnji krajnjih korisnika prikupljeni s naprednih brojlara u stvarnoj distribucijskoj mreži. Prikupljena mjerenja prikazuju kumulativnu potrošnju svakog korisnika, a u

svrhu analize, kumulativna krivulja potrošnje je uređena kako bi se dobili iznosi fazne potrošnje, tj. faznog opterećenja svakog korisnika. Prosječna promjena iznosa napona (*voltage magnitude*) u promatranom jednotjednom razdoblju je negativna u većini čvorišta, što znači da su vrijednosti napona za vrijeme pandemije generalno manjeg iznosa nego u predpandemijsko vrijeme. Takvi rezultati su bili i očekivani s obzirom na spomenuti porast potrošnje električne energije kućanstava i direktni utjecaj opterećenja na iznos napona u mreži. Drugi promatrani pokazatelj kvalitete električne energije je faktor naponske nesimetrije (*Voltage Unbalance Factor*). Rezultati pokazuju još i značajniju promjenu, tj. prosječno povećanje iznosa naponske nesimetrije nego u slučaju iznosa napona. Iznos naponske nesimetrije ne ovisi toliko o ukupnom iznosu opterećenja koliko o razlici između opterećenja pojedinih faza, a na temelju rezultata moguće je zaključiti generalni trend porasta razlike između iznosa opterećenja faza u promatranom distribucijskoj mreži. Posljednji promatrani pokazatelj kvalitete električne energije je faktor harmoničkog izobličenja (THD). Povećanje potrošnje je dovelo do porasta struje osnovnog harmonika, a samim time i struje svih viših harmonika. S obzirom na vezu struja i napona, u prosjeku se dogodio porast udjela napona viših harmonika u osnovnom harmoniku, tj. porast faktora ukupnog harmoničkog izobličenja.

S obzirom da je najveći broj restrikcija donesenih za vrijeme pandemije koronavirusa ublažen ili u potpunosti ukinut, donesene zaključke je potrebno uzeti s rezervom. Kako bi se promotrio utjecaj potrošnje na pokazatelje kvalitete električne energije u razdoblju nakon ublažavanja mjera, mjerenja potrošnje električne energije prikupljena u postpandemijskom razdoblju su iskorištena za isti skup analiza. Slika 6 pokazuje rezultate provedenih analiza.



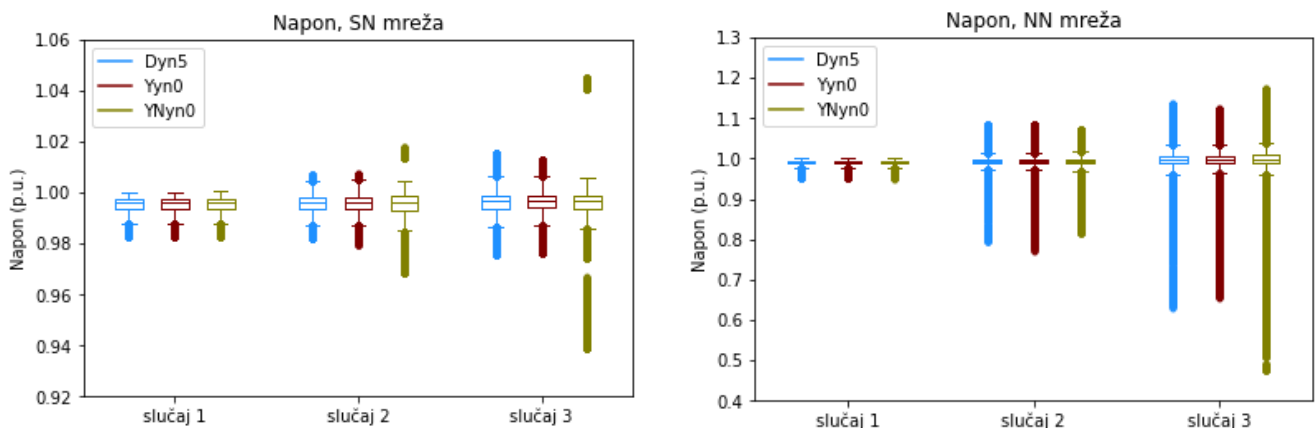
Slika 6 Promjena iznosa pokazatelja kvalitete električne energije nakon pandemijskih mjera

Za razliku od iznosa napona izračunatog u vrijeme pandemije, potrošnja u razdoblju nakon ublažavanja mjera se u određenim čvorištima smanjila što je dovelo do prosječnog porasta napona u istim čvorištima. Međutim, iznos potrošnje, a time i napona, u nekim je čvorištima i dalje niži nego u predpandemijsko vrijeme što je direktna posljedica promjene određenih navika u ljudskom ponašanju, npr. češći rad od doma. Usporedba vrijednosti naponske nesimetrije pokazuje njeno povećanje u usporedbi s predpandemijskim razdobljem. Međutim to povećanje je manje nego u pandemijskom razdoblju. Posljedica blagog smanjenja je veća ujednačenost među opterećenjem faza koje i dalje postoji te dovodi do većeg prosječnog iznosa faktora naponske nesimetrije. Vrijednosti posljednjeg promatranog pokazatelja kvalitete električne energije THD-a su u prosjeku i dalje veće nego prije početka pandemije, ali taj porast nije toliko izražen kao za vrijeme restriktivnih mjera. Smanjenje potrošnje i struje osnovnog harmonika dovelo je do smanjenja struje viših harmonika. S obzirom na vezu napona i struje viših harmonika, došlo je do povećanja THD-a, ali za manji iznos nego u pandemijsko vrijeme.

3.2. Utjecaj distribuiranih izvora na kvalitetu električne energije

Integracija distribuiranih izvora energije u niskonaponskim mrežama u većini slučajeva je nekoordinirana, što na vođenje distribucijskih mreža utječe značajnije od izazova kreiranih promjenama potrošnje za vrijeme pandemije koronavirusa. Kako bi se promotrio utjecaj distribuiranih izvora na pokazatelje kvalitete električne energije u niskonaponskoj mreži i njihovo širenje iz niskonaponske u srednjonaponsku mrežu modelirana je distribucijska mreža koja se sastoji od srednjonaponske distribucijske mreže i nekoliko niskonaponskih mreža s krajnjim korisnicima od kojih određeni udio posjeduje fotonaponske panele i punionicu električnih vozila. Definirana su tri slučaja, slučaj 1 u kojem niti jedan niskonaponski korisnik nema instalirane distribuirane izvore, slučaj 2 u kojem 40% krajnjih korisnika ima instalirane fotonaponske panele i punionicu električnih vozila te slučaj 3 u kojem 80% krajnjih korisnika ima instalirane distribuirane izvore energije. Osim osnovne analize, napravljena je analiza u kojoj je promatrano kako grupa spoja SN/NN transformatora utječe na iznose napona, naponske nesimetrije i THD-a u niskonaponskim i srednjonaponskim mrežama.

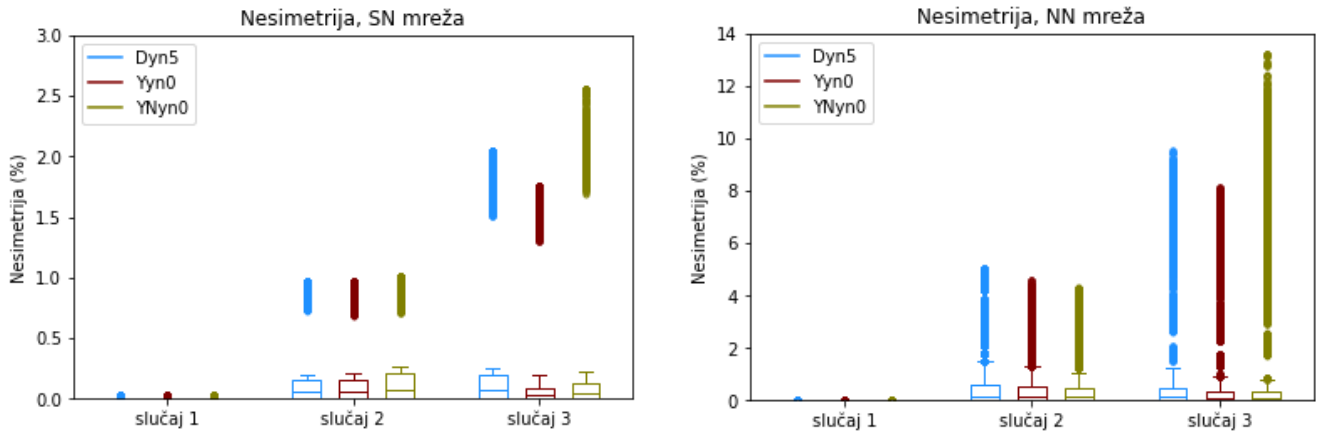
Slika 7 prikazuje iznos napona u srednjonaponskoj i promatranim niskonaponskim mrežama. Bez obzira na udio korisnika s instaliranim distribuiranim izvorima energije i na grupu spoja transformatora, iznos napona u srednjonaponskoj mreži se uvijek nalazi unutar dozvoljenih granica $U_n \pm 10\%$. U niskonaponskoj mreži je situacija drugačija i unatoč činjenici da u slučaju 1 nema prekoračenja naponskih ograničenja, ona se javljaju već u drugom slučaju kada se javljaju naponi manji od 0.9 p.u., bez obzira na grupu spoja transformatora. Najveći utjecaj grupe spoja transformatora na iznos napona je vidljiv u slučaju 3. Kod svih grupa spoja transformatora pojava vrijednosti napona ispod 0.9 p.u. i iznad 1.1 p.u. je učestala i kršenje graničnih vrijednosti se događa u većini promatranih čvorišta i vremenskih intervala. Iako visoki udio distribuiranih izvora energije vodi do smanjenja emisija stakleničkih plinova i može pomoći krajnjem korisniku na uštedi cijene električne energije, rezultati pokazuju da nekoordinirana integracija vodi do narušavanja naponskih prilika, otežava vođenje i potencijalno ugrožava sigurnost elektroenergetskog sustava.



Slika 7 Iznos napona u SN i NN distribucijskim mrežama

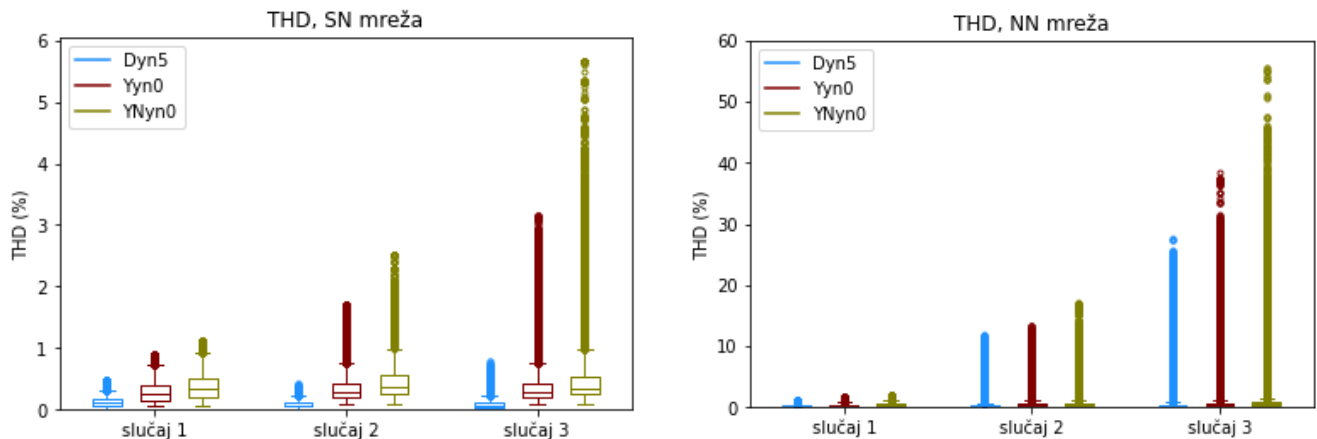
Utjecaj nekoordinirane integracije distribuiranih izvora energije na iznos naponske nesimetrije u srednjonaponskim i niskonaponskim distribucijskim mrežama prikazan je na slici Slika 8. Za razliku od iznosa napona, iznos naponske nesimetrije u srednjonaponskim mrežama prelazi dozvoljenu granicu od 2% u slučaju 3 kada je transformator modeliran grupom spoja Dyn5 i YNyn0. U ostalim slučajevima iznos naponske nesimetrije je ispod granične vrijednosti. U niskonaponskim mrežama u slučaju 1, bez korisnika s distribuiranim izvorima, nema problema s iznosom naponske nesimetrije. Prekoračenja granične vrijednosti javljaju se već u slučaju 2 kada je najviši iznos naponske nesimetrije između 4% i 6% bez obzira na grupu spoja transformatora. Trend porasta iznosa naponske nesimetrije vidljiv je i u slučaju 3, kada povećanje udjela krajnjih korisnika s instaliranim distribuiranim izvorima dodatno podiže iznose naponske nesimetrije. Kao što je vidljivo iz rezultata, nije moguće direktno odrediti utjecaj grupe spoja transformatora na iznos naponske nesimetrije i širenje smetnji iz niskonaponske u srednjonaponsku distribucijsku mrežu. Naponska nesimetrija je povezana s opterećenjem faza, točnije s razlikom između faznih opterećenja.

Nekoordinirana integracija jednofaznih distribuiranih izvora energije podrazumijeva njihovo priključivanje u nasumično odabranu fazu, što dovodi do rizika od povećane razlike između potrošnje pojedinih faza, a time i povećanja naponske nesimetrije i štetnih utjecaja do kojih ona dovodi.



Slika 8 Iznos naponske nesimetrije u SN i NN distribucijskim mrežama

Slika 9 prikazuje rezultate analize posljednjeg promatranog parametra kvalitete električne energije, faktora harmoničkog izobličenja THD-a. Iznosi THD-a u srednjonaponskoj mreži su niži od granične vrijednosti od 8% u svim slučajevima i za sve grupe spoja. Utjecaj grupe spoja je značajniji u odnosu na prethodno promatrane pokazatelje kvalitete električne energije i to zbog konfiguracije grupe spoja Dyn5 koja blokira struje nultog harmonika. U slučaju 1 u niskonaponskoj mreži ne postoje prekoračenja granične vrijednosti THD-a dok iznosi harmoničkog izobličenja u određenim čvorištima i vremenskim trenutcima dosežu vrlo visoke vrijednosti, što je posebice izraženo u slučaju 3. Kao i u slučaju srednjonaponske mreže, utjecaj grupe spoja na širenje harmoničke smetnje je jasno vidljiv i značajno ga ograničava. Međutim, korištenje Dyn grupe spoja nije dovoljno za ograničavanje utjecaja distribuiranih izvora na harmoničke prilike u mreži. Kako bi se negativan utjecaj viših harmonika u potpunosti izbjegao potrebna je instalacija uređaja kao što su aktivni ili pasivni filteri.



Slika 9 Iznos THD-a u SN i NN distribucijskim mrežama

4. ZAKLJUČAK

Tradicionalne distribucijske mreže karakterizirane su pasivnim krajnjim korisnicima, a njihovo vođenje nije zahtijevalo visok stupanj digitalizacije i dogledljivosti mreže. Integracija distribuiranih izvora i promjene u vođenju distribucijskih mreža zahtijevaju korištenje novih metoda koje se često oslanjaju na digitalne tehnologije kao što su GIS i napredna brojila. Unatoč većoj dogledljivosti mreže i dostupnosti podataka, neki od njih nisu iskoristivi u početnom obliku.

GIS podatci koji prikazuju elemente niskonaponske distribucijske mreže daju uvid u prostorne i tehničke parametre promatrane mreže. Zajedno s mjerenjima prikupljenima očitanjem naprednih brojila, korištenje GIS podataka omogućava kreiranje matematičkog modela mreže i simulacije u distribucijskim mrežama. Međutim, primjeri iz prakse su pokazali da skup GIS podataka u početnom obliku sadrži mnoge greške koje je potrebno ukloniti prije daljnjeg korištenja. Detektirane greške u skupu GIS podataka odnose se na neprekinutost linijskog objekta, nepovezanost voda, odnosno kabela s niskonaponskim ormarićima i transformatorskim stanicama, nepoznata čvorišta koja vod, odnosno kabel povezuje, redundantnost elemenata i nepoznati tehnički atributi elemenata mreže. Kako bi se navedeni problemi riješili, razvijen je automatizirani pristup uklanjanja grešaka temeljen na alatu QGIS, programskom jeziku Python te programskom rješenju za rad s bazama podataka PostgreSQL s uključenom postgis ekstenzijom.

Na temelju uređenih GIS podataka koji predstavljaju elemente jednog niskonaponskog izvoda kreiran je matematički model mreže koji je zajedno s prikupljenim mjerenjima korišten u dvije analize niskonaponske mreže. U prvoj analizi promatran je utjecaj promjene potrošnje električne energije krajnjih korisnika na pokazatelje kvalitete električne energije u rezidencijalnoj niskonaponskoj mreži. Rezultati pokazuju porast opterećenja promatrane mreže u odnosu na predpandemijsko razdoblje što je dovelo do smanjenja iznosa napona te povećanja iznosa naponske nesimetrija i faktora harmoničkog izobličenja. Druga analiza obuhvaća nekoordiniranu integraciju fotonaponskih panela i punionica električnih vozila i njihov utjecaj na pokazatelje kvalitete električne energije u niskonaponskim i srednjonaponskim mrežama. Rezultati pokazuju da u početnom stanju bez integriranih distribuiranih izvora energije u srednjonaponskim i niskonaponskim mrežama ne dolazi do prekoračenja graničnih vrijednosti promatranih parametara električne energije. Povećanje udjela distribuiranih izvora dovodi do pogoršanja vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije, ali u srednjonaponskoj mreži ipak ne dolazi do značajnih problema, s obzirom na to da se jedino prekoračenje graničnih vrijednosti javlja kod faktora naponske nesimetrije prilikom udjela distribuiranih izvora energije od 80%. U niskonaponskoj mreži prekoračene su granične vrijednosti svih promatranih pokazatelja kvalitete električne energije u slučajevima udjela distribuiranih izvora energije od 40% i 80%.

Rezultati analiza ukazuju na potencijalne izazove s kojima se operatori distribucijskog sustava susreću. Kako bi se izazovi uspješno savladali i kako bi se osiguralo vođenje distribucijskih mreža, potrebno je kontinuirano povećavati stupanj dogledljivosti mreže s obzirom na brojne prednosti koje omogućuje pristup podacima. Također, dostupnost podataka je nužan preduvjet za analize koje će pomoći u donošenju odluka i sprječavanju tehničkih poteškoća koje uzrokuje nekoordinirana integracija novih tehnologija. Iz tog razloga potrebno se češće oslanjati na nove metode, kao što je prezentirana metoda uklanjanja grešaka u GIS podacima, ali i razvijati nove, inovativne metode i modele koji će osigurati nesmetano vođenje naprednih distribucijskih mreža.

5. 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.

6. LITERATURA

- [1] A. Guzman, A. Arguello, J. Quiros-Tortos, G. Valverde, Processing and correction of secondary system models in geographic information systems, *IEEE Trans. Ind. Informatics*. 15 (2019) 3482–3491. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2876356>.
- [2] G. Valverde, A. Arguello, R. González, J. Quirós-Tortós, Integration of open source tools for studying large-scale distribution networks, *IET Gener. Transm. Distrib.* 11 (2017) 3106–3114. <https://doi.org/10.1049/IET-GTD.2016.1560>.
- [3] S. Zambrano-Asanza, J. Quiros-Tortos, J.F. Franco, Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 143 (2021) 110853. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110853>.

- [4] R. Torquato, D. Salles, C.O. Pereira, P.C.M. Meira, W. Freitas, A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems, *IEEE Trans. Power Deliv.* 33 (2018) 1002–1012. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2798707>.
- [5] E. Vega-Fuentes, J. Yang, C. Lou, Power flow visualization in DER-Rich low voltage networks, *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.* 2020-October (2020) 735–738. <https://doi.org/10.1109/ISGT-EUROPE47291.2020.9248930>.
- [6] Y. Wang, Q. Chen, T. Hong, C. Kang, Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges, *IEEE Trans. Smart Grid.* 10 (2019) 3125–3148. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2818167>.
- [7] 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>.
- [8] 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>.
- [9] 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>.
- [10] S.M. Mahfuz Alam, M.H. Ali, Analysis of COVID-19 effect on residential loads and distribution transformers, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 129 (2021) 106832. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2021.106832>.