

Mirna Gržanić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
mirna.grzanic@fer.hr

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

DISTRIBUTION NETWORK MODELS (*DINEMO*) PLATFORMA – METODOLOGIJA I VALIDACIJA

SAŽETAK

Kao rezultat dekarbonizacije elektroenergetskog sustava sve je više prisutna lokalna proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora. S obzirom na to da većina podataka o sustavu nije dostupna javnosti zbog sigurnosnih razloga, znanstvenici koriste sintetičke mreže za analize integracije distribuiranih izvora.

U radu će se opisati platforma *DiNeMo* koja modelira georeferenciranu sintetičku mrežu čiju lokaciju bira sam korisnik putem *Open Street Map* kartografske podloge. *DiNeMo* platforma gradi sintetičku mrežu na temelju indikatora prikupljenih od strane operatora distribucijskih sustava u Europi (broj potrošača na različitim naponskim razinama, karakteristike vodova, kabela i transformatora, itd.) te ulaznih parametara koje mora unijeti sam korisnik (gustoća stanovništva, faktor opterećenja, naponska razina, broj stanovnika po kućanstvu, itd.). Validacija rezultata sintetičke mreže prikazana je usporedbom indikatora modelirane sintetičke mreže sa stvarnim vrijednostima indikatora za grad Varaždin.

Ključne riječi: analize tokova snaga, električna vozila, modeli distribucijskih mreža, naponska odstupanja, operator distribucijskog sustava, validacija podataka

DISTRIBUTION NETWORK MODELS (*DINEMO*) PLATFORMA – METHODOLOGY AND VALIDATION

SUMMARY

As the result of power system decarbonisation, local electricity production from renewable sources is increased. As the most data on power system are not publicly available due to security reasons, scientists use synthetic networks for multiple analyses with distributed sources.

The paper will describe *DiNeMo* platform used for building georeferenced synthetic network which location is selected by the user through the *Open Street Map*. *DiNeMo* platform builds a synthetic network based on indicators collected from distribution system operators in Europe (number of consumers on different voltage levels, characteristics of lines, cables and transformers, etc.) and input parameters entered by the user (population density, power factor, voltage level, population per household, etc.). The validation of the synthetic network results is demonstrated by comparing the indicators from modelled synthetic network with the actual indicator values for the city of Varaždin.

Key words: power flow analysis, electric vehicles, distribution network models, voltage fluctuations, distribution system operator, data validation

1. UVOD

Cilj energetske tranzicije prema niskouglijčnim sustavima je povećanje energetske učinkovitosti uz efikasnu integraciju sve većeg broja obnovljivih izvora energije (OIE) [1]. Stalni porast OIE isprekidane proizvodnje i punionica električnih vozila (EV) mogli bi uzrokovati nedozvoljena kolebanja napona i preopterećenje visokonaponskih/srednjonaponskih (VN/SN) transformatora. Kako bi se izbjegli navedeni problemi, potrebno je fokusirati se na analize distribucijskih mreža u fazi planiranja ugradnje OIE i punionica EV. Velika prepreka za navedene proračune je nedostatak podataka o mreži. Međutim, znanstvenici su stvorili sintetičke reprezentativne mreže koje služe kao modeli za planiranje i detaljnu analizu distribucijskih mreža. Problem kod generiranja sintetičkih mreža je proces validacije kojim se mora pokazati da su sintetičke mreže realistična reprezentacija stvarnog područja.

Brojni radovi bave se kreiranjem referentnih mreža i njihovom validacijom. Sintetička SN mreža u [2] modelirana je kako bi se pokazao utjecaj distribuirane proizvodnje na mreže pomoću alata *Smart Grid Metric*. Urbana i ruralna mreže modelirane su drugačije zbog nedovoljno podataka za ruralnu mrežu. Dva tipa ruralnih područja izgrađena su koristeći *Google Earth* i statistička izvješća o gustoću potrošnje: veliko područje s malom naseljenosti i malo područje s velikom naseljenosti. Kako bi se pokazao utjecaj distribuiranih izvora na SN mrežu [3], urbana, ruralna i industrijska područja modelirana su na temelju kombinacija tipičnih reprezentativnih izvoda. Također je provedena i ekonomska analiza kroz pružanje pomoćnih usluga na nekoliko tržišnih modela. Statistički alat razvijen je u [4] za generiranje sintetičkih distribucijskih mreža na temelju prikupljenih tehničkih i geografskih mrežnih podataka. Validacija referentne mreže provedena je usporedbom rada realne i sintetičke mreže. Autori u [5] validacijom su pokazali da testne mreže zadovoljavaju metrike proporcija sustava na temelju broja čvorišta po transformatorskoj stanici, naponske razine, potrošnje u svakom čvorištu, kapaciteta generatora, parametra vodova i transformatora te njihove topologije.

Rad u [6] opisuje generiranje sintetičkih distribucijskih mreža na temelju validacije metrika iz stvarnih mrežnih podataka o sustavu. Metrike zadovoljavaju topologiju vodova, konvergenciju AC tokova snaga, prostornu povezanost i Delaunayeva trokutasta preklapanja. Mreža od 2000 čvorišta u [7] s generatorskom dinamikom validirana je s 3 metrike tranzijentne stabilnosti pokazujući kako dinamički odziv i zadovoljenje tranzijentne stabilnosti su vrlo slični kao i u stvarnoj mreži. Sintetička mreža u [8] generirana je prema metodi *network imitating method based on learning (NIMBLE)*. Mreža je testirana na kvarove naglašavajući važnost prostornih lokacija vodova i transformatorskih stanica koje se mogu odrediti pomoću navedenog algoritma rezultirajući vrlo sličnom mrežnom strukturom kao i u stvarnoj mreži. Kako bi se pokazala sličnost optimalnih tokova snaga u sintetičkoj mreži sa stvarnim tokovima, mreže se modeliraju evolucijskim algoritmima na temelju podataka o topologiji, proizvodnji i potrošnji [9]. Modeliranje sintetičkih mreža u [10] bazirano je na minimizaciji troškova opskrbe električnom energijom i povećanju mrežne pouzdanosti i kvalitete opskrbe oponašajući povijesni razvoj mreže koristeći topološke metrike. Tipični izvodi iz distribucijskim mrežama u [11] modelirani su s ciljem rješavanja strateških odluka pri različitim investicijama u mrežu. Rad u [12] opisuje metodu za kvantificiranje efikasnosti ograničavanja proizvodnje iz OIE koristeći sintetičke mreže i Monte Carlo simulacije za analizu osjetljivosti. Autori u [13] koriste podatke od operatora distribucijskog sustava (ODS) u Nizozemskoj kako bi izgradili realnu SN mrežu. Sintetička distribucijska mreža u Singapuru [15] modelirana je na temelju optimizacije elektroenergetskog sustava uzimajući u obzir AC tokove snaga pri zadovoljenju svih ograničenja u sustavu.

Rad u [16] modelira sintetičke mreže na visokom, srednjem i niskom naponu te je baziran na geografskim podacima iz *Open Street Mapa* koristeći algoritam zasnovan na rješavanju problema trgovačkog putnika koji rezultira u minimalnoj duljini vodova i kabela te minimalnom trošku. *DiNeMo* platforma koristi dodatne ulazne parametre prikupljene od strane ODS-ova koji opskrbljuju različita područja u Europi. Model opisan u ovom članku uzima u obzir i parametre koje unese sam korisnik za odabrano područje. Podaci o naseljenosti i broju stanovnika dostupni su u popisu broja stanovnika. Čitava srednjonaponska mreža Njemačke modelirana je u [17]. U prvom koraku razmatraju se samo potrošnja i topologija mreže s ciljem minimizacije duljine kabela i vodova. Zatim se u drugom koraku dodaju u mrežu OIE i povećanje potrošnje rezultirajući s troškovno optimalnom srednjonaponskom mrežom u Njemačkoj. Za razliku od opisanog modela koji izgrađuje sintetičku mrežu za područje cijele države, *DiNeMo* platforma je fokusirana na manje područje, ali to područje može biti odabrano bilo gdje u Europi.

Kako bi se prikazao utjecaj distribuirane proizvodnje na troškove u distribucijskoj mreži [18], sintetičke mreže modeliraju se *greenfield* metodom pomoću heurističkih algoritama planiranja i geoinformacijskog sustava (GIS). Potrošači su podijeljeni u 5 kategorija te su gradovi identificirani pomoću GISa. Mreže se modeliraju uzimajući u obzir geografska ograničenja gradeći VN mrežu pomoću N-1 kriterija, dok se SN i NN mreže grade kao radialne mreže. Utjecaj različite razine penetracije EV modeliran

je na sintetičkim distribucijskim mrežama [19]. Rezultati pokazuju porast gubitaka u mreži te više troškove investiranja u mrežu s većom penetracijom EV u području visoke naseljenosti. U modeliranju referentnih mreža u [20] koriste se četiri različite slojne strukture. Logički sloj fokusiran je na grafički dizajn mreže koji sadrži čvorišta i grane. Topološki sloj koristi G/S kako bi generirao ulični prikaz i povezoao ga s geografskim koordinatama elemenata u mreži. Električni sloj fokusiran je na električne karakteristike distribuirane proizvodnje, potrošnje, transformatora, vodova i kabela. Sloj kvalitete opskrbe razmatra informacije o pouzdanosti sustava, zaštitne uređaje te preventivne i korektivne radove na održavanju. Rad [21] fokusiran je na planiranju SN/NN transformatorskih stanica u velikim područjima razdvajajući ih na manja područja zbog kompleksnosti izračuna. Koristeći referentnu mrežu izgrađenu u [20], metodologija prvo identificira izolirana područja koja su najudaljenija. Zatim se napravi dekompozicija u tim izoliranim područjima s velikom gustoćom naseljenosti na temelju teorijskog minimalnog broja transformatorskih stanica. U konačnici su ta mala dekomponirana područja neovisno optimizirana minimizirajući troškove investicije u NN i SN mrežu te SN/NN transformatorsku stanicu. Referentne mreže izgrađene su u [22] koristeći indikatore prikupljene od 79 velikih operatora distribucijskih sustava koji opskrbljuju više od 100 000 potrošača. Mreže koje pokrivaju velika područja su modelirane za urbana, semi-urbana i ruralna područja s VN/SN transformatorskim stanicama, SN potrošačima, SN/NN izvodima, SN/NN transformatorskim stanicama te NN potrošačima. Mreže bazirane na modeliranju NN izvoda služe za analize integracija OIE i EV na odabranom području.

S obzirom na nedostatak javno dostupnih modela realnih distribucijskih mreža koji mogu poslužiti za različite vrste analiza u mreži, razvijena je web platforma *Distribution Network Models (DiNeMo)* temeljena na radovima opisanim u [18-23]. Glavni cilj platforme je prikazati dizajn mreže napajane iz VN/SN transformatorske stanice s prikazanim položajem SN/NN transformatorskih stanica, opreme, sklopki, vodova i kabela. Mreža koja se modelira odgovara prikazu od oko 2km² u stvarnosti. Tehničke informacije prikupljene u Distribution System Operators Observatory 2018 [24] čine *DiNeMo* platformu jedinstvenim alatom za sve djelatnike u sektoru električne energije jer unatoč politički povjerljivosti podataka o mrežama, *DiNeMo* simulacije mogu poslužiti za realne analize.

2. DISTRIBUTION SYSTEM OBSERVATORY 2018 I MREŽNI INDIKATORI

Indikatori korišteni u *DiNeMo* platformi su sljedeći: broj NN potrošača po SN potrošaču, duljina NN mreže po NN potrošaču, omjer duljine podzemnih NN kabela u odnosu na ukupnu duljinu NN mreže, broj NN potrošača po SN/NN transformatorskoj stanici, instalirana snaga SN/NN transformatorske stanice po NN potrošaču, duljina SN mreže po SN točki napajanja, omjer duljine podzemnih SN kabela u odnosu na ukupnu duljinu SN mreže, broj SN točki napajanja po VN/SN transformatorskoj stanici te tipična instalirana snaga SN/NN transformatorske stanice.

- Broj NN potrošača po SN potrošaču je omjer koji predstavlja koliko je promatrano područje komercijalizirano, odnosno industrijalizirano.
- Duljina NN mreže po NN potrošaču opisuje lokaciju i udaljenost između potrošača, kao i njihovu raspodjelu u promatranom području. Više vrijednosti indikatora karakteriziraju velika područja s malom gustoćom naseljenosti gdje su potrošači udaljeniji jedni od drugih, dok niže vrijednosti opisuju područja s velikom gustoćom naseljenosti gdje su potrošači smješteni blizu jedni drugih.
- Omjer duljine podzemnih NN kabela u odnosu na ukupnu duljinu NN mreže karakterizira urbano (omjer veći od 80%), semi-urbano (30%-80%) i ruralno područje (manji od 30%).
- Broj NN potrošača po SN/NN transformatorskoj stanici ovisi o razmještanju potrošača u promatranom području dajući ideju o tome kolika je veličina niskonaponske mreže ispod promatrane SN/NN transformatorske stanice. Viši iznos indikatora predstavlja urbano područje s većom gustoćom naseljenosti, dok niži iznos predstavlja ruralno područje s niskom gustoćom naseljenosti.
- Instalirana snaga SN/NN transformatorske stanice po NN potrošaču je omjer ukupne instalirane snage SN/NN transformatorske stanice i ukupnog broja NN potrošača koji uzima u obzir maksimalnu prosječnu snagu potrošača, energetske učinkovitost i faktor istodobnosti.
- Duljina SN mreže po SN točki napajanja važna je za izgradnju budućih distribuiranih izvora energije.

- Omjer duljine podzemnih SN kabela u odnosu na ukupnu duljinu SN mreže uobičajeno je niži za ruralna područja.
- Broj SN točki napajanja po VN/SN transformatorskoj stanici je ukupan broj SN točki napajanja (SN potrošači i SN/NN transformatorske stanice) podijeljen s brojem VN/SN transformatorskih stanica te označava koliko je promatrano područje industrijalizirano.
- Tipična instalirana snaga SN/NN transformatorske stanice uobičajeno je manja u ruralnim područjima.

Više informacija i detaljnija pojašnjenja navedenih indikatora mogu se pronaći u Distribution System Operators Observatory 2016 [22] i 2018 [24].

3. DiNeMo PLATFORMA

U početku su se reprezentativne mreže modelirale za planiranje prijenosne mreže. S obzirom na to da distribucijske mreže od pasivnih postaju aktivni sudionici, sve se više literature bavi modeliranjem i distribucijske razine. Najčešće korištene sintetičke mreže su standardne IEEE mreže s 15, 33, 69 i 123 čvorišta [25]. Nekoliko primjera izgradnje sintetičkih mreža temelji se na stvarnim mrežnim podacima dobivenim od strane ODS-a [26-28]. S obzirom na nedostatak referentnih modela distribucijskih mreža, razvijena je *DiNeMo* platforma koja se temelji na stvarnim podacima prikupljenim od ODSova diljem Europe u svrhu izgradnje sintetičkih mreža na području Europe. Platforma je dostupna online [29], a cilj joj je okupiti krajnje korisnike iz različitog područja elektroenergetike koji će pomoći u prikupljanju podataka i izgradnji mreža s ciljem razvijanja pametnih gradova budućnosti.

DiNeMo platforma bazirana je na *green-field* modelu koji dizajnira mrežu od početka s ciljem minimizacije troškova investicije uz održavanje naponskih prilika unutar granica ($\pm 10\%$ u odnosu na nazivnu vrijednost) [20]. Tri su važna bloka u platformi: unos podataka od strane korisnika, jezgra modela i prikaz rezultata. Zadatak samog korisnika je uređivanja i podnošenje zahtjeva za izgradnju mreže (Network Computation Request). U prvom koraku platforma zahtijeva od korisnika odabir geografskog područja u *Open Street Map* kartografskoj podlozi te označavanje lokacije VN/SN transformatorske stanice. Korisnik je također dužan unijeti podatke o broju stanovništva, gustoći naseljenosti, naponskoj razini, faktoru opterećenja te maksimalnoj priključnoj snazi NN i SN potrošača. Uz navedene podatke koje unosi sam korisnik, jezgra modela koristi devet indikatora prikupljenih od strane ODS navedenih u poglavlju 2. koji su specifični za određenu zemlju u Europi. Platforma je bazirana na algoritmu *branch-exchange* koji modelira mrežu počevši od geografskih koordinata potrošača. Uzimajući u obzir fiksne troškove (investicije u transformatore, vodove i kabele) te varijabilne troškove koji su vezani za gubitke snage, algoritam minimizira duljinu vodova i kabela u mreži koristeći se tehnikom Euklidskog minimalnog razapinjajućeg stabla. Stoga je izgrađena mreža primjer optimalne mreže.

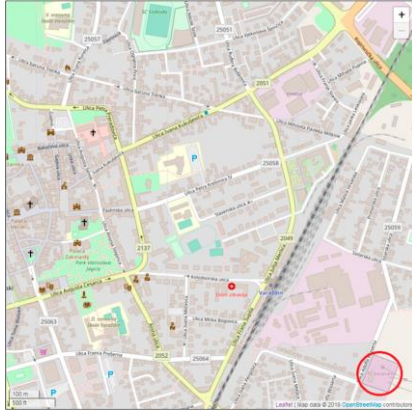
Commented [MS1]: Kojih granica? Navesti.

Commented [M2]:

4. VALIDACIJA TOČNOSTI

Prilikom modeliranja referentnih mreža, važno je validirati točnost izlaznih rezultata kako bi se pokazalo da referentna mreža može služiti kao vjerni prikaz odabranog područja. Hrvatski operator distribucijskog sustava d.o.o. (HEP ODS) izračunao je potrebne indikatore za grad Varaždin. Kako bi se pokazalo da su rezultati *DiNeMo* platforme u skladu s dobivenim podacima od strane ODSa, provedena je validacija modelirane sintetičke mreže.

Na slici 1 prikazano je područje u centru Varaždina u *Open Street Mapu* koje služi kao ulazni podatak u uređivanju zahtjeva za izgradnju mreže. Lokaciju VN/SN transformatorske stanice odabire korisnik te je označena crvenim krugom na slici. Iako transformatorska stanica TS Varaždin ima 3 mogućnosti transformacije: 110/35 kV, 110/20 kV i 110/10 kV, zbog mogućnosti odabira samo jedne VN/SN transformatorske stanice u *DiNeMo* platformi, mi smo odabrali 110/10 kV sa instaliranom snagom 31.5 MVA. Sam centar Varaždina sastoji se od nekoliko glavnih ulica na kojima je instalirano 15 punionica EV [31]. Izgradnja budućih punionica EV biti će u blizini trgovačkih centara, kina, itd. Ukoliko zapravo pogledamo detaljnije sliku 1, možemo uočiti neke od mogućih lokacija: 20ak restorana i barova, 7 banaka, 3 škole i bolnica. Dodatno, postoji više od 20 parkirnih mjesta na kojima bi se mogla pružiti vehicle-to-grid usluga mreži za vrijeme vršnog opterećenja.



Slika 1 Centar Varaždina – prikaz u *Open Street Mapu*

Nakon što je korisnik unio sve potrebne parametre i predao zahtjev za izgradnju mreže, *DiNeMo* platforma konstruira mrežu na način objašnjen u poglavlju 3. Jedan od rezultata simulacije je prikaz mreže na slici 2. Ljubičasti trokut predstavlja lokaciju VN/SN transformatorske stanice koju odabire sam korisnik još pri unosu podataka u *DiNeMo* simulaciju. Crvene linije označavaju SN vodove i kabele, dok crne linije predstavljaju NN razinu. Ukupna duljina vodova i kabela iznosi 90.2 km, od čega 57.6 km pripada NN razini s prosječnom duljinom voda od 51 m. Plavi kružići na slici predstavljaju 33 transformatorske stanice 10/0.4 kV od više od polovine ima nazivnu snagu od 400 kVA. Krajnji potrošači označeni su crnim kružićima, manji predstavljaju NN potrošače (ukupno 3168 NN potrošača), dok veći SN (ukupno 4 SN potrošača). Kao što je vidljivo sa slike, broj vodova i kabela koji prelaze ceste je minimiziran.

Commented [MS3]: Navesti koliko ima NN potrošača, a koliko SN potrošača.

Commented [MS4]: Nije baš vidljivo. Poraditi na vidljivosti – npr. smanjiti intenzitet zelene boje, a povećati intenzitet crne.

Commented [MSR4]: Nažalost, trenutno nemam mogućnost pristupa platformi, ali svako ću predložiti promjenu boje.



Slika 2 Slika mreže u *DiNeMo-u*

Validacija točnosti modelirane mreže napravljena je usporedbom 9 indikatora izračunatih u *DiNeMo* simulaciji sa stvarnim indikatorima prikupljenim od HEP ODS-a. Usporedba indikatora prikazana je u Tablici 1:

Tablica I Usporedba indikatora

Redni broj	Indikator	ODS	DiNeMo
1	Broj NN potrošača po SN potrošaču	723	792
2	Duljina NN mreže po NN potrošaču (km/NN potrošaču)	0.02	0.018
3	Omjer duljine podzemnih NN kabela u odnosu na ukupnu duljinu NN mreže (%)	46%	39%
4	Broj NN potrošača po SN/NN transformatorskoj stanici	90.9	96
5	Instalirana snaga SN/NN transformatorske stanice po NN potrošaču (kVA/NN potrošaču)	5.22	5.42
6	Duljina SN mreže po SN točki napajanja (km/SN točki napajanja)	0.9	0.88
7	Omjer duljine podzemnih SN kabela u odnosu na ukupnu duljinu SN mreže (%)	62%	95%
8	Broj SN točki napajanja po VN/SN transformatorskoj stanici	69	37
9	Tipična instalirana snaga SN/NN transformatorske stanice (kVA)	630	400, 630

Commented [MS6]: U poglavlju 2 to su „SN potrošači i SN/NN transformatorske stanice“?

Commented [M7R6]: Tako je, SN točke napajanja su SN potrošači i SN/NN transformatorske stanice

Indikator 1 predstavlja broj NN potrošača po SN potrošaču. Njegova vrijednost je veća u *DiNeMo* simulaciji u usporedbi s realnim podacima prikupljenim od HEP ODS-a. Ta nepodudarnost je razumna jer se u testnom slučaju u *DiNeMo* simulaciji promatra čisto urbano područje koje ima manje SN točki napajanja. Uspoređujući tu vrijednost s indikatorom broj 8, možemo uočiti da je manji broj SN kupaca. Indikator broj 2 manji je *DiNeMo* simulaciji u usporedbi s realnim vrijednostima jer razmatrano područje u simulaciji je centar grada u kojem je gustoća naseljenosti vrlo visoka te su potrošači smješteni vrlo blizu jedni drugima. Dodatno, *DiNeMo* platforma minimizira duljinu vodova uzimajući u obzir investicijske troškove te se uvijek očekuje optimalna konfiguracija. Omjer duljine podzemnih NN kabela u odnosu na ukupnu duljinu NN mreže je neznatno manji u *DiNeMo* simulaciji, dok indikatori 4,5,6 vrlo realno prikazuju stvarnu stanje. Indikator 7 ima veću vrijednost u *DiNeMo* simulaciji zbog toga što smo unijeli u *DiNeMo* simulaciju gustoću naseljenosti koja odgovara samom centru grada koja je veća od prosječne gustoće naseljenosti uzimajući u obzir čitav grad. Algoritam također uzima u obzir prirodna ograničenja i minimizira vodove koji prelaze preko zgrada i ulica.

5. ANALIZE TOKOVA SNAGA

Rezultati *DiNeMo* simulacije i zahtjeva za izgradnju mreže su brojni: Excel tablice s podacima o vodovima, kablama i sklopnim uređajima, vršno opterećenje potrošača (koje u našem slučaju iznosi 100kVA) karakteristike VN/SN i SN/NN transformatorskih stanica, slika mreže te MATLAB datoteka s podacima o čvorištima, granama i generatorima potrebna za AC analizu tokova snaga u MATPOWER-u.

5.1. Opis ulaznih podataka za analize u MATPOWERu

U modelu je razmatrano područje centra Varaždina napajano iz 110/10 kV transformatorske stanice s nazivnom snagom od 31.5 MVA. Kao rezultat *DiNeMo* simulacije u mreži su izgrađene 33 transformatorske stanice naponske razine 10/0.4 kV od kojih 19 nazivne snage 400 kVA, 12 nazivne snage 630 kVA te 2 nazivne snage 1000 kVA. Iz popisa stanovništva provedenog 2011. godine u Republici Hrvatskoj [32], definirali smo u Tablici II ulazne podatke o broju potrošača u zgradi te aproksimirali njihov

Commented [MS8]: Za transformaciju 35/10 kV nazivne snage 400 kVA, 630 kVA i 1000 kVA nisu realne?

Commented [M9R8]: Moje isprike, riječ je o 33 transformatorske stanice 10/0.4 kV

postotak u odnosu na ukupan broj stanovništva (u prvoj fazi razvoja platforme moglo se unijeti samo 4 podataka o broju potrošača u zgradi).

Tablica II Ulazni podaci o potrošačima u *DiNeMo* simulaciji

Broj potrošača u zgradi	1	3	5	7
Postotak	24.34	64.51	9.71	1.44

S obzirom na nedostatak podataka o profilima potrošnje za grad Varaždin, proračuni tokova snaga modelirani su s podacima dobivenim od strane Talijanske nacionalne regulatorne vlasti (Italian national regulatory authority ARERA). Podaci su skalirani i normalizirani kako bi odgovarali veličini i kapacitetu distribucijske mreže za grad Varaždin. Kako je broj čvorišta u modeliranoj mreži čak 3 puta veći od broja krivulja potrošnje potrošača, skalirani profil potrošnje dodijeljen je svakom čvorištu na slučajno odabran način Monte Carlo simulacijom s 10 000 iteracija. Ista metoda primijenjena je na punionice EV čiji je profil potrošnje prikazan u [33]. Kako je predloženo u [34], jedna ili više sporih punionica potrebne su za 15 EV. U analizama smo razmatrali dva slučaja penetracije: 10 % čvorišta u sustavu ima punionicu (kao realan prikaz baziran na EAFO [35]) i 20% čvorišta (kao ekstrem primjer) s instaliranom snagom punjenja od 22 kW (s obzirom na to da jedino takve punionice postoje u Varaždinu [31]). Utjecaj na naponska odstupanja pri integraciji električnih punionica analiziran je za 1194 čvorišta u sustavu.

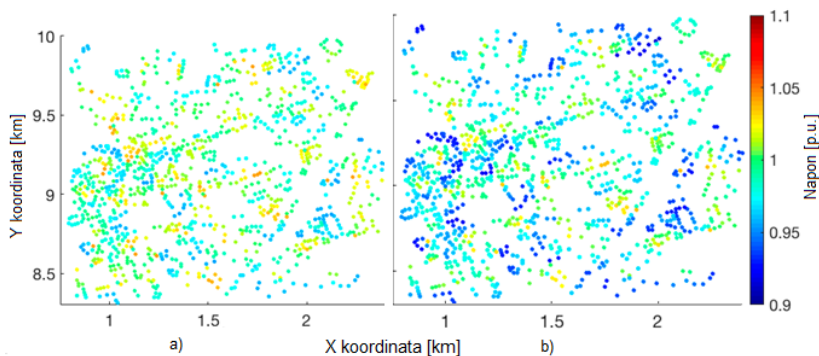
5.2. Rezultati AC analiza tokova snaga u MATPOWERu

AC proračun tokova snaga u MATPOWER-u izvodi se Newton-Raphson metodom s tolerancijom od $1e-08$. Najveći pad napona je u 20:00 sati te su rezultati za taj sat prikazani na slici 3. Lijeva slika označena slovom a) prikazuje pad napona u slučaju kad niti jedno čvorište nema instaliranu punionicu EV, dok desna slika b) prikazuje stanje u mreži pri instalaciji punionica EV na 10% svih čvorišta u mreži.

Slika 3 a) prikazuje prosječan pad napona nakon 10 000 iteracija za svako čvorište u modeliranoj mreži bez punionica EV u 20 sati. Pad napona u mreži ne bi smio biti veći od 10% u odnosu na nazivnu vrijednost (prema standardu EN 50160). U ovom slučaju, prosječan napon u mreži iznosi 0.9967 p.u. s prosječnom potrošnjom od 61.3 MWh (očitano na VN/SN transformatorskoj stanici) s ukupnim gubicima od 2.5%.

Pri instalaciji punionica na 10% čvorišta u sustavu, ukupna potrošnja porasla je za 11%, kao i gubici na 3%. Srednja vrijednost napona svih čvorišta iznosi 0.9777 p.u. i kroz 10 000 Monte Carlo simulacija prikazano je da 5% svih čvorišta u sustavu ima pad napona ispod 0.9 p.u.

Vidljivo je da već pri penetraciji od 10% postoje problemi s naponskim odstupanjima u čvorištima koji se nalaze na kraju izvoda. S penetracijom punionica u iznosu od 20%, prosječna vrijednost napona na čvorištima iznosi 0.95 p.u. te je potrebno razmotriti pojačanje mreže ili pametno punjenje EV.



Slika 3 Pad napona u centru Varaždina s penetracijom od a) 0% punionica EV i b) 10%

Commented [M10]:

Commented [MS11]: Navesti u kojem vremenskom razdoblju.

Commented [M12R11]:

6. ZAKLJUČAK

Kako bi se istražio utjecaj zelene energetske tranzicije na distribucijske mreže, važno je modelirati buduće scenarije integracije distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav. Zbog nedostatka javno dostupnih podataka o mreži, za simulacije se koriste referentne sintetičke mreže. Platforma *DiNeMo* služi za modeliranje georeferenciranih mreža koje nemaju ograničenja u broju čvorišta, kabela i vodova. Platforma koristi stvarne podatke o distribucijskim mrežama prikupljene od strane operatora distribucijskih sustava u Europi s ciljem što preciznijeg modeliranja odabranog područja. *DiNeMo* platforma fokusirana je urbane gradske sredine naglašavajući time važnost tranzicije prema budućim pametnim gradovima i mrežama. Algoritam na kojem je bazirana platforma koristi tzv. *green-field* pristup modeliranja mreža od samog početka. Platforma započinje modeliranje mreže od geografskih koordinata krajnjih potrošača uzimajući u obzir fiksne i varijabilne troškove minimizirajući duljinu vodova i kabela te kao rezultat daje optimalnu konfiguraciju mreže. Platforma koristi 9 indikatora prikupljenih u Distribution System Operator Observatory 2018 [24] uzimajući u obzir lokaciju opskrbe pojedinog operatora sustava odabranu u kartografskom prikazu *Open Street Map*.

Kako bi se validirala točnost platforme i izgrađene referentne mreže, uspoređene su vrijednosti indikatora prikupljenih od strane HEP-ODS-a s indikatorima izračunatim u modeliranoj mreži u centru grada Varaždina. Pokazano je kako je *DiNeMo* platforma točan, koristan i jednostavan alat za modeliranje georeferenciranih sintetičkih mreža.

Dodatno su provedene analize tokova snaga u MATPOWER-u pri integraciji novih punionica EV u centru Varaždina. Rezultati su pokazali da ako se punionice ugrade na 10% čvorišta u sustavu, 5% čvorišta će imati pad napona ispod dozvoljene razine od 0.9 p.u., dok integracija od 20% zahtijeva pojačanje mreže ili pametno punjenje EV.

ZAHVALA

Ovaj rad financiran je dijelom od strane Hrvatske zaklade za znanost i u suradnji s Operatorom distribucijskog sustava (HEP ODS d.o.o.) unutar projekta IMAGINE (PAR2018-12).

Posebice bismo htjeli zahvaliti HEP ODS d.o.o. za prikupljanje indikatora za grad Varaždin u svrhu provođenja validacije točnosti *DiNeMo* platforme.

7. LITERATURA

- [1] Clean Energy for All Europeans. Available online: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fa6ea15b-b7b0-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
- [2] Rui, H.; Arnold, M.; Wellssow, W.H. Synthetic Medium Voltage Grids for the Assessment of Smart Grid Techniques. In Proceedings of the 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, Germany, 14–17 October 2012.
- [3] Petretto, G.; Cantù, M.; Gigliucci, G.; Pilo, F.; Pisano, G.; Natale, N.; Soma, G.G.; Coppo, M.; Turri, R. Representative Distribution Network Models for Assessing the Role of Active Distribution Systems in Bulk Ancillary Services Markets. In Proceedings of the 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, Italy, 20–24 June 2016.
- [4] Abeyasingha, S.; Wua, J.; Sooriyabandarab, M. A Statistical Assessment Tool for Electricity Distribution Networks. In Proceedings of the 8th International Conference on Applied Energy—ICAE, Beijing, China, 8–11 October 2016. *Energies* 2019, 12, 4079 16 of 17
- [5] Birchfield, A.B.; Schweitzer, E.; Athari, M.H.; Xu, T.; Overbye, T.J.; Scaglione, A.; Wang, Z. A Metric-Based Validation Process to Assess the Realism of Synthetic Power Grids. *Energies* 2017, 10, 1233, doi:10.3390/en10081233.
- [6] Birchfield, A.B.; Xu, T.; Gegner, K.M.; Shetye, K.S.; Overbye, T.J. Grid Structural Characteristics as Validation Criteria for Synthetic Networks. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 32, 3258–3265.
- [7] Xu, T.; Birchfield, A.B.; Overbye, T.J. Modeling, Tuning, and Validating System Dynamics in Synthetic Electric Grids. *IEEE Trans. Power Syst.* 2018, 33, 6501–6509.

- [8] Soltan, S.; Loh, A.; Zussman, G. A Learning-Based Method for Generating Synthetic Power Grids. *IEEE Syst. J.* 2019, 13, 625–634.
- [9] Schweitzer, E.; Scaglione, A. A Mathematical Programming Solution for Automatic Generation of Synthetic Power Flow Cases. *IEEE Trans. Power Syst.* 2019, 34, 729–741.
- [10] Espejo, R.; Lumbreras, S.; Ramos, A. A Complex-Network Approach to the Generation of Synthetic Power Transmission Networks. *IEEE Syst. J.* 2018, 99, 1–4, doi:10.1109/JSYST.2018.2865104.
- [11] Levi, V.; Strbac, G.; Allan, R. Assessment of performance-driven investment strategies of distribution systems using reference networks. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* 2005, 152, 1–10.
- [12] Kellermann, J.; Larscheid, P.; Moser, A. Applying Synthetic Distribution Grids for Sensitivity Studies of Grid Expansion Reduction by Curtailment Schemes. In *Proceedings of the NEIS 2017 Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, 21–22 September 2017*.
- [13] Sarstedt, M.; Garske, S.; Blaufuß, C.; Hofmann, L. Modelling of Integrated Transmission and Distribution Grids based on Synthetic Distribution Grid Models. In *Proceedings of the 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 23–27 June 2019*.
- [14] Schweitzer, E.; Scaglione, A.; Monti, A.; Pagani, G.A. Automated Generation Algorithm for Synthetic Medium Voltage Radial Distribution Systems. *J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.* 2017, 7, 271–284.
- [15] Trpovski, A.; Recalde Melo, D.F.; Hamacher, T. Synthetic Distribution Grid Generation Using Power System Planning: Case Study of Singapore. In *Proceedings of the International Universities Power Engineering Conference UPEC, Glasgow, Scotland, 4–7 September 2018*.
- [16] Kays, J.; Seack, A.; Smirek, T.; Westkamp, F.; Rehtanz, C. The Generation of Distribution Grid Models on the Basis of Public Available Data. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 32, 2346–2353.
- [17] Amme, J.; Pleßmann, G.; Buhler, J.; Hulk, L.; Kotter, E.; Schwaegerl, P. The eGo grid model: An open-source and open-data based synthetic medium-voltage grid model for distribution power supply systems. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018, 977, 012007.
- [18] Cossent, R.; Olmos, L.; Gomez, T.; Mateo, C.; Frias, P. Distribution network costs under different penetration levels of distributed generation. *Eur. Trans. Electr. Power* 2011, 21, 1869–1888.
- [19] Fernández, L.P.; Román, T.G.S.; Cossent, R.; Domingo, C.M.; Frias, P. Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks. *IEEE Trans. Power Syst.* 2011, 26, 206–213.
- [20] Domingo, C.M.; Román, T.G.S.; Sánchez-Miralles, Á.; González, J.P.P.; Martínez, A.C. A Reference Network Model for Large-Scale Distribution Planning with Automatic Street Map Generation. *IEEE Trans. Power Syst.* 2011, 26, 190–197.
- [21] González-Sotres, L.; Domingo, C.M.; Sánchez-Miralles, Á.; Miró, M.A. Large-Scale MV/LV Transformer Substation Planning Considering Network Costs and Flexible Area Decomposition. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013, 28, 2245–2253.
- [22] Prettico, G.; Gangale, F.; Mengolini, A.; Lucas, A.; Fulli, G. DISTRIBUTION SYSTEM OPERATORS OBSERVATORY: From European Electricity Distribution Systems to Representative Distribution Networks; EUR 27927 EN; Publications Office of the European Union, 2016; doi:10.2790/701791.
- [23] Mateo, C.; Prettico, G.; Gómez, T.; Cossent, R.; Gangale, F.; Frias, P.; Fulli, G. European representative electricity distribution networks. *Electr. Power Energy Syst.* 2018, 99, 273–280.
- [24] Prettico, G.; Flammini, M.G.; Andreadou, N.; Vitello, S.; Fulli, G.; Masera, M. Distribution System Operators Observatory 2018. Available online: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113926/jrc113926_kjna29615enn_newer.pdf
- [25] Kersting, W.H. Radial distribution test feeders. In *Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 28 January–1 February 2001; Volume 2, pp. 908–912. Energies* 2019, 12, 4079 17 of 17
- [26] Mousavi, S.M.; Flynn, D. Controlled charging of electric vehicles to minimize energy losses in distribution systems. *IFAC-PapersOnLine* 2016, 49, 324–329.
- [27] Yang, J.; He, L.; Fu, S. An improved pso-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid. *Appl. Energy* 2014, 128, 82–92.
- [28] Leemput, N.; Geth, F.; Roy, J.; Büscher, J.; Driesen, J. Reactive power support in residential LV distribution grids through electric vehicle charging. *Sustain. Energy Grids Netw.* 2015, 3, 24–35.

- [29] SES JRC. Available online: <https://ses.jrc.ec.europa.eu/dinemo> (accessed on 23 July 2019).
- [30] Miguez, E.; Cidras, J.; Diaz-Dorado, E.; Garcia-Dornelas, J. L. An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning. *IEEE Trans. Power Syst.* 2002, 17, 931–936.
- [31] EVway. Available online: <https://evway.net> (accessed on 1 August 2019).
- [32] Croatian Population Census 2011. Available online: <https://www.dzs.hr/Hrv/censuses/census2011/censuslogo.htm>
- [33] Flammini, M.G.; Prettico, G.; Julea, A.; Fulli, G.; Mazza, A.; Chicco, G. Statistical characterisation of real transaction data gathered from electric vehicle charging stations. *Electr. Power Syst. Res.* 2019, 166, 36–150.
- [34] EV30@30 Campaign Document. Available online: <https://www.iea.org/media/topics/transport/3030CampaignDocumentFinal.pdf>
- [35] European Alternative Fuel Observatory. Available online: <https://www.eafo.eu>