Zasnova orodja za načrtovanje nizkonapetostnih omrežij z velikim deležem razpršenih virov in prožnostjo proizvodnje ter porabe električne energije

Matej Pečjak[1], Chloé Fournely[1], Jernej Zupančič[1], dr. Tomi Medved[1], Borut Jereb[1], dr. Gašper Artač[1], izr. prof. dr. Andrej F. Gubina[1]

[1] – Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Laboratorij za energetske strategije, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

Matej.Pecjak@fe.uni-lj.si, Chloe.Fournely@fe.uni-lj.si, Jernej.Zupancic@fe.uni-lj.si, Tomi.Medved@fe.uni-lj.si, Gasper.Artac@fe.uni-lj.si, Borut.Jereb@fe.uni-lj.si, Andrej.Gubina@fe.uni-lj.si

Povzetek - Nizkonapetostno omrežje se zelo hitro spreminja in se bo v prihodnje še dodatno prilagajalo in preoblikovalo z dodajanjem novih razpršenih proizvodnih virov, hranilnikov električne energije, električnih vozil in toplotnih črpalk. Te spremembe predstavljajo nove izzive za sistemske operaterje, saj v omrežju obstaja večja verjetnost zamašitev in kršitev napetostnih kriterijev. Prožnost na strani proizvodnje in/ali odjema električne energije lahko pripomore k omilitvi ali odpravi teh težav. V tem delu je predstavljena zasnova orodja za načrtovanje nizkonapetostnih omrežij, ki operaterjem omrežij omogoča simulacije pretokov moči ter identifikacijo šibkih točk. Orodje dodatno omogoča simulacije pretokov moči, pri katerih je aktivacija prožnosti proizvodnje in porabe električne energije izvedena na podlagi tržnega pristopa, preko lokalnega elektroenergetskega trga. Rezultat modela, poleg rezultatov simulacij pretokov moči, je tudi predlog nadgradenj oziroma izboljšav omrežja skupaj z oceno stroškov investicij. Med ključne dele priprave orodja sodi razvoj algoritmov za dodajanje naprav za zagotavljanje prožnosti vzdolž obstoječega omrežja in določitev profilov delovanja teh naprav v primeru, ko je za aktivacijo uporabljen tržni pristop in ne tehnična optimizacija delovanja teh naprav.
Razvoj orodja za načrtovanje nizkonapetostnega omrežja je del mednarodnega projekta X-FLEX pod okriljem okvirnega projekta Obzorje 2020 (Horizon 2020). Razvito orodje bo del širšega skupka orodij namenjenih sistemskim operaterjem omrežij za samodejno kontrolo delovanja omrežij in bo testirano na dveh pilotnih lokacijah v Sloveniji in Grčiji. Končni cilj je orodje za dolgoročno načrtovanje razvoja omrežij z možnostjo ocene razpoložljive prožnosti in oceno stroškov nadgradenj omrežja.

Ključne besede: nizkonapetostno omrežje, prožnost, simulacije pretokov moči, razpršeni viri energije

Design of a Grid Planning tool for LV networks with high penetration of distributed energy resources and flexibility provision

Abstract – The low-voltage (LV) grid is changing rapidly and will be even more adapted and transformed with new distributed energy resources (DERs), storage systems, electric vehicles and heat pumps. All these changes create new challenges to the distribution system operators (DSOs) in charge of the grid, as the grid becomes more prone to undergo voltage violations and congestions. Flexibility services from local DERs can help the DSO to mitigate or to eliminate these problems. This paper proposes a design for a grid planning tool directed to the DSO. This tool simulates the power flow in the DSO's grid and defines weak nodes and buses in the grid. The tool also proposes simulation with the use of flexibility provision using a market approach. The main outcomes of the tool are recommendations of grid reinforcement with price estimations. The difficulty lies in the design of algorithms that assign the location of DER technologies adoption along the grid and which define the flexibility provision potential when a market approach is used, i.e. the flexibility solutions are not technically optimised.
This paper defines the preliminary methodology used for the long-term grid planning tool in the Horizon 2020 project X-FLEX. The planning tool will be integrated into a broader toolset to be used by the grid operators for automatic control and observability of the network. The result is a tool with different modes to be used by DSOs that offer long-term grid planning with the possibility of assessing the value of flexibility services in terms of grid reinforcement costs.

Keywords: low voltage grid, flexibility, power flow simulations, distributed energy resources

1 UVOD

Razvijajoča se elektroenergetska omrežja se soočajo s številnimi obstoječimi in prihajajočimi izzivi, ki zadevajo ohranjanje varne in učinkovite oskrbe končnega potrošnika z električno energijo. Naraščajoča količina decentraliziranih obnovljivih virov energije (OVE) v energetskih sistemih, prehod na pametna omrežja in nove prihajajoče tehnologije zahtevajo nove strategije nadzora. Glavni cilj operaterjev omrežij je zagotoviti varno in učinkovito delovanje elektroenergetskih omrežij, zlasti distribucijskih, kjer je priključena velika količina majhnih, razpršenih proizvodnih enot OVE. Večina nizkonapetostnih (NN) omrežij je še vedno zasnovana za klasično radialno delovanje, sistemski operater distribucijskega sistema pa mora reševati vse ključne izzive, ki se pojavljajo pri vodenju omrežja, da lahko zagotavlja zanesljivost oskrbe, kakovost električne energije in hitro odpravo morebitnih motenj. Visoka proizvodnja iz OVE lahko zvišuje napetostne profile, povzroči preobremenitve v sistemu, obratne (reverzne) tokove moči in injiciranje moči v visokonapetostni del (VN) omrežja [1]. Po drugi strani pa lahko veliko število električnih vozil in/ali toplotnih črpalk povzroči prenizke napetosti v primeru neustreznega nadzora ali sočasnega delovanja večine enot [2]. Sistemi za upravljanje z energijo zagotavljajo napreden način nadzora prožnostnih enot odjema, z namenom omejevanja njihovega vpliva na omrežje in zagotavljanja oskrbe z energijo v času velikega povpraševanja [3], [4]. Da pa se lahko vzpostavi učinkovit sistem upravljanja in vodenja prožnostnih enot, je nujno natančno poznavanje zahtev po energiji in razmer v omrežju, ki jih te zahteve prinašajo. Sledenje je pomembno tudi pri dolgoročnem načrtovanju razvoja omrežij. V tem delu je predstavljena zasnova orodja za načrtovanje nizkonapetostnih omrežij (angl. *Grid planning tool*) z velikim deležem razpršenih virov in prožnostjo proizvodnje oziroma porabe električne energije, ki omogoča operaterjem omrežja simulacije pretokov moči z dodajanjem novih tehnologij (porabnikov in proizvodnih virov) v omrežje in identifikacijo morebitnih šibkih točk omrežja, kot posledica dodajanja novih tehnologij. Razvoj program poteka v sklopu projekta X-FLEX.

Projekt X-FLEX deluje pod okriljem okvirnega projekta Obzorje 2020 (Horizon 2020), pričel se je v letu 2019 in traja štiri leta. V projekt je vključenih 12 partnerjev iz šestih evropskih držav. V projekt so vključene štiri pilotne lokacijah v treh državah: Ravne na Koroškem in Luče v Sloveniji, Albena v Bolgariji in Xanthi v Grčiji. Cilj projekta X-FLEX je zasnovati in razviti celovit nabor orodij, ki bodo omogočala večjo izrabo prožnosti v obstoječem elektroenergetskem sistemu, kar bo pripomoglo k njegovemu stabilnejšem in zanesljivejšem obratovanju [5]. V okviru projekta X-FLEX so v razvoju štirje končni produkti:

- **SERVIFLEX** – Orodje za upravljanje z viri prožnosti namenjeno agregatorjem in ostalim ponudnikom prožnosti.
- **GRIDFLEX** – Napredno orodje za avtomatski nadzor omrežij namenjeno operaterjem omrežij.
- **MARKETFLEX** – Orodje ki združuje tržno platformo in tržne mehanizme za omejevanje omrežnih kapacitet.
- **X-FLEX** platforma – Povezava med prvimi tremi orodji katera omogoča enoten dostop do podatkov in izmenjavo informacij.

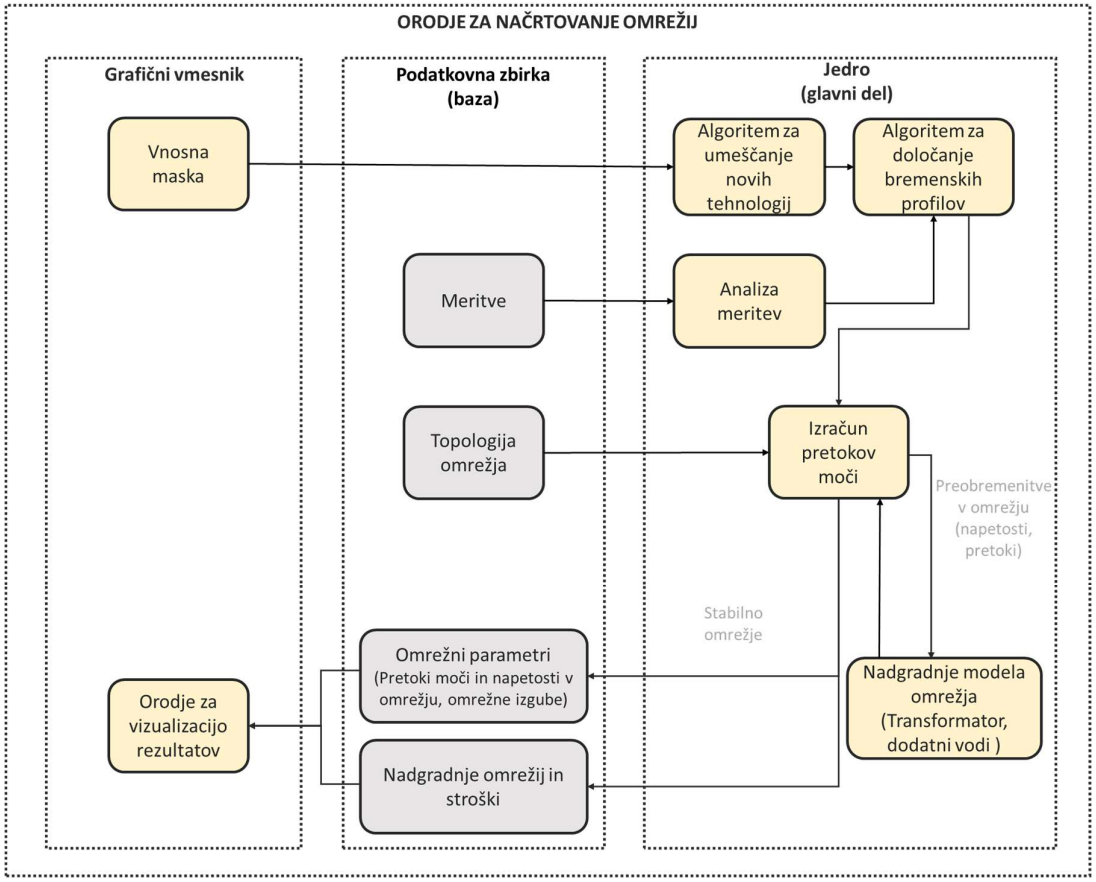
Orodje za načrtovanje NN omrežij je del orodja GRIDFLEX in je v testiranju za dve v projekt X-FLEX vključeni pilotni lokaciji; Luče in Xanthi. Ta prispevek se osredotoča na pilotno lokacijo v Lučah.

2 STRUKTURA ORODJA ZA NAČRTOVANJE NIZKONAPETOSTNIH OMREŽIJ

Orodje za načrtovanje NN omrežij sestavljajo trije glavni deli:

- Grafični vmesnik,
- podatkovna zbirka oziroma baza in
- jedro (glavni del).

Slika 1 prikazuje strukturo orodja in povezave med posameznimi deli, kateri so podrobneje opisani v nadaljevanju.



Slika 1: Struktura orodja za načrtovanje NN omrežij

2.1. Grafični vmesnik

Grafični vmesnik obsega vnosno masko in orodje za vizualizacijo rezultatov. V vnosno masko uporabnik orodja vnese parametre, ki so zahtevani za izvedbo simulacije in v ozadju uporabljeni za generiranje profilov moči bremen in proizvodnih virov. Del vnosne maske je tudi okno za spremljanje poteka simulacije in javljanje morebitnih napak. Orodje za vizualizacijo rezultatov vsebuje dva elementa. Prvi prikazuje ključne rezultate simulacije v obliki grafov, drugi pa prikazuje vizualizacijo omrežja z lokacijami novih tehnologij v omrežju.

2.2. Podatkovna zbirka

Podatkovna zbirka vsebuje vse podatke nujne za izvedbo simulacij pretokov moči v orodju. Med drugim zajema:

- Meritve porabe obstoječih bremen,
- meritve proizvodnje obstoječih virov,
- podatke o topologiji omrežja,
- podatke o sončnem obsevanju za generiranje profilov proizvodnje sončnih elektrarn,
- podatke za generiranje profilov odjema toplotnih črpalk,
- podatke o stroških nadgradenj v omrežju.

Poleg shrambe podatkov potrebnih za izvedbo simulacij služi podatkovna zbirka tudi kot prostor za shranjevanje rezultatov simulacij. Podatki simulacij so dodatno lahko izvoženi v poljubnih formatih za obdelavo v drugih programskih orodjih.

2.3. Glavni del orodja (jedro)

Glavni del oziroma jedro orodja zajema algoritme za generiranje profilov moči, algoritem za umeščanje novih tehnologij v omrežje in orodje za izračun pretokov moči.

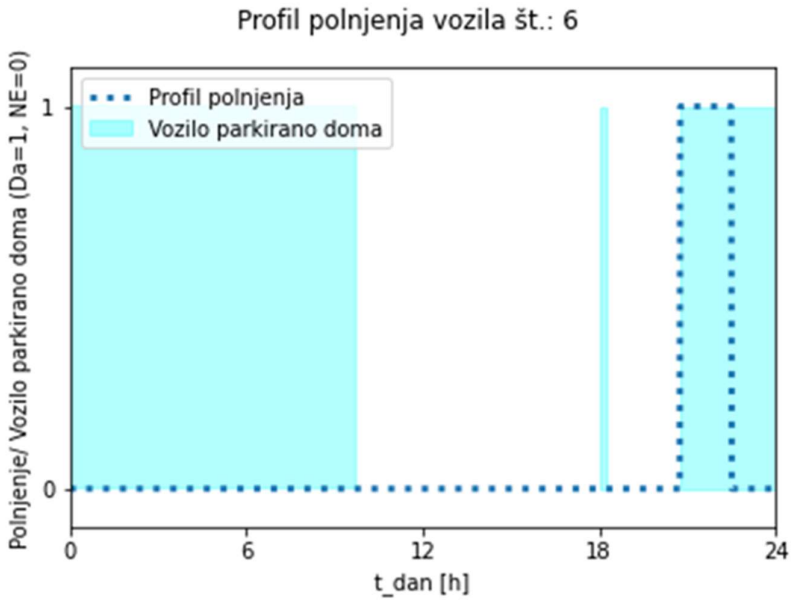
2.3.1. Algoritmi za določanje profilov moči

Profili moči porabnikov in proizvodnih virov predstavljajo vhodne podatke za simulacijo pretokov moči. V orodju za načrtovanje NN omrežij so generirani in v simulacije vključeni štirje tipi profilov moči. To so profili obstoječih nekontroliranih bremen v omrežju, profili novih bremen toplotnih črpalk in električnih vozil, ter profili proizvodnje sončnih elektrarn.

- **Obstoječa nekontrolirana bremena**: Profili obstoječih nekontroliranih bremen so generirani na podlagi meritev odjema teh bremen. Poraba električne energije je močno odvisna od tipa dneva (delavnik, vikend ali drug dela prost dan) in od letnega časa oziroma sezone. Za vsakega uporabnika je zato generiran tipičen tedenski profil odjema električne energije znotraj vsake sezone. Pri dolgoročnem načrtovanju NN omrežij je potrebno upoštevati tudi letno spremembo odjema nekontroliranih bremen. Za potrebe dolgoročnih simulacij je ta sprememba na podlagi analize predlagana kot 3% letno povečanje odjema.

- **Toplotne črpalke:** Toplotne črpalke se delijo na dva razreda. Toplotne črpalke za ogrevanje prostorov in toplotne črpalke za pripravo sanitarne vode. Poznamo tri tipe toplotnih črpalk za ogrevanje prostorov. To so črpalke zrak-voda, zemlja-voda in voda-voda. Pri vsakem od omenjenih treh tipov sta najpogostejša dva načina ogrevanja: radiatorsko in talno ogrevanje. Porabe električne energije toplotne črpalke je odvisna od številnih dejavnikov. Mednje sodita koeficient učinkovitosti toplotne črpalke (angl. *Coefficient Of Performance – COP*) in potreba po dovedeni toploti. Koeficient učinkovitosti je odvisen od tipa toplotne črpalke, načina ogrevanja in od vremenskih dejavnikov. Orodje za načrtovanje NN omrežij omogoča simulacije pretokov moči z dodajanjem toplotnih črpalk zrak-voda z radiatorskim načinom ogrevanja. Profil porabe električne energije toplotne črpalke je določen na podlagi letne potrebe po toploti za ogrevanje stavbe – toplotna učinkovitosti stavbe ($kWh/m^{2)}$ in površine stavbe (m^2). Omenjena podatka izbere uporabnik orodja. Z uporabo metodologije za določanje standardnih profilov ogrevanja in nacionalnih profilov učinkovitosti toplotnih črpalk na razpolago v [6] je nato generiran letni profil porabe električne energije toplotne črpalke.

- **Električna vozila:** Del orodja za načrtovanje NN omrežij je tudi algoritem polnjenja električnih vozil. Algoritem simulira dnevne vožnje električnih vozil in generira urnike, ko so vozila parkirana doma. Vhodni podatki za algoritem so število električnih vozil, povprečna poraba (kWh/100km), kapaciteta baterije (kWh) in moč polnjenja. Število električnih vozil določi uporabnik orodja, ostale spremenljivke so definirane v okviru algoritma. Predvidene so tri različne moči polnjenja 7,4kW, 11kW in 22kW. Moč polnjenja je za vsakega uporabnika izbrana na podlagi priključne moči in tipa priključitve (1 ali 3 fazno). Pri generiranju voženj se predpostavlja tri destinacije: dom, služba, drugo. Izbiro in pogostost posamezne destinacije določa set pravil (npr. vožnja se vedno začne in konča doma, odhod v službo je vedno pred 12:00). Čas odhoda od doma določa logaritemsko normalna porazdelitev [7], [8], razdalje med destinacijami pa določa gama porazdelitev na podlagi statističnih podatkov [9]. Kot rezultat algoritem vrne profile voženj in urnike, ko je vozilo parkirano doma. Ko je vozilo parkirano doma, se predpostavlja, da se tudi polni z obzirom na stanje napolnjenosti baterije, katero je prav tako upoštevano. Kot moč polnjenja se upošteva ena od prej naštetih vrednosti. Primer profila polnjenja električnega vozila prikazuje Slika 2.



Slika 2: Profil polnjenja električnega vozila

- **Sončne elektrarne:** Profili proizvodnje sončnih elektrarn so generirani na podlagi podatkov o sončnem obsevanju in tehničnih parametrov solarnih panelov. Moč proizvodnje sončne elektrarne podaja spodnja enačba:

$$P_{PV} = G \cdot A \cdot Eff \cdot PR \quad (1)$$

V enačbi (1) predstavlja G sončno obsevanje [W/m^2] , A skupno površino sončne elektrarne [m^2], Eff izkoristek solarnih panelov in PR učinkovitost elektrarne. Uporabnik orodja vnese število novih sončnih elektrarn in inštalirano moč posamezne sončne elektrarne. Površina sončne elektrarne je določena glede na število solarnih panelov (celo število) potrebnih za željeno inštalirano moč sončne elektrarne.

2.3.2. Algoritem za umeščanje novih tehnologij v omrežje

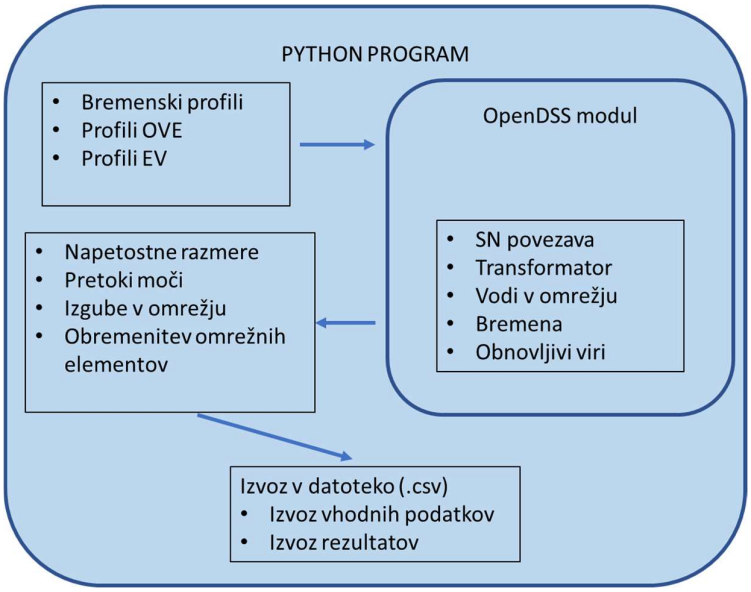
Algoritem za umeščanje novih tehnologij v omrežje omogoča dodajanje novih tehnologij v omrežje na podlagi vnaprej določenih pravil. Vhodi v algoritem so število naprav posameznega tipa in topologija omrežja. Topologija omrežja zajema lokacije vseh uporabnikov omrežja, njihovo oddaljenost od transformatorja, priključno moč, tip priključitve (1 ali 3 fazno) in podatke o morebitnih že obstoječih naprav, katere omogočajo prožnost. Algoritem na podlagi vhodnih podatkov generira seznam uporabnikov z novimi tehnologijami. Pri tem upošteva, da imajo uporabniki, kateri imajo nameščeno sončno elektrarno, prioriteto pred ostalimi uporabniki kar zadeva dodajanja ostalih tehnologij. Pravila določajo še, da imajo prioriteto uporabniki s trifazno priključitvijo, kateri so bolj oddaljeni od transformatorja. V primeru, da pravilom o umeščanju novih tehnologij v omrežje zadošča večje število uporabnikov, kot je število novih tehnologij, je umeščanje izvedeno na podlagi stohastičnega pristopa.

2.3.3. Orodje za izračun pretokov moči

Za izračun pretokov moči je kot samostojen gradnik orodja ustvarjena simulacijska platforma v programskih okoljih Python in OpenDSS. Programsko okolje OpenDSS [10] se uporablja za simulacije elektroenergetskih distribucijskih omrežij. Omogoča analizo vpliva integracije obnovljivih virov v omrežje, nadgradnje omrežja in razvoj pametnih omrežij. Vsebuje topologijo omrežja, v katerem so modelirani vsi končni uporabniki, NN vodi, transformatorska postaja in povezava s srednje napetostnim (SN) nivojem. Definirani so tudi vsi obnovljivi viri, ki se nahajajo v omrežju, polnilnice električnih vozil, baterijski hranilniki energije in ostali uporabniki oziroma enote v omrežju. OpenDSS omogoča izračun pretokov moči v modeliranem omrežju, s čimer na podlagi podanega

odjema uporabnikov določimo napetostne razmere v celotnem omrežju, pretoke moči skozi elemente in izgube v omrežju.

Izračuni pretokov moči se prožijo iz programskega okolja Python, ki med svojimi funkcijami omogoča tudi razvoj programskih kod za analizo in oblikovanje sistemov. V simulacijski platformi je Python uporabljen za kreiranje podatkovne baze podatkov za uporabnike v omrežju, umeščanje tehnologij in proženje izračunov pretokov moči v OpenDSS-u. Po izvedenih simulacijah se ustvarijo matrike z rezultati simulacij, ki se dodatno lahko izvozijo v datoteke poljubnih formatov (npr. csv). Strukturo programa za izračun pretokov moči prikazuje Slika 3.



Slika 3: Program za izračun pretokov moči

3 TESTNO OMREŽJE IN FUNKCIJE ORODJA

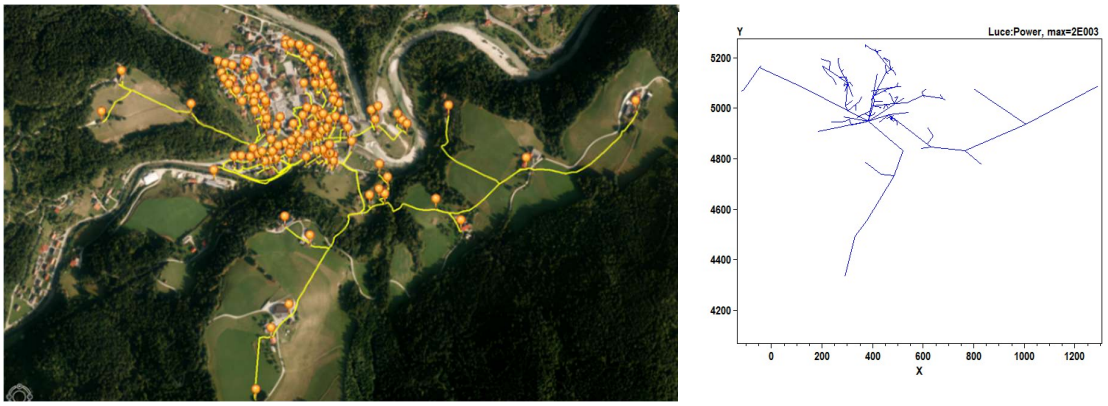
Testno NN omrežje obsega del naselja Luče in zajema porabnike, ki so oddaljeni do 1 km od središča naselja, kjer je nameščen SN/NN transformator moči 400kVA. Naselje je ruralnega tipa, omrežje pa je klasično radialno. Dolgi izvodi iz transformatorja so podvrženi pogostim zamašitvam. Testno omrežje obsega 155 uporabnikov (vsi so opremljeni s pametnimi števci), od teh ima 14 vključeno proizvodnjo OVE, 5 pa tudi hišno baterijo. V omrežju je nameščena tudi skupnostna baterija.

3.1. Model omrežja

Za model omrežja v OpenDSS-u so bili uporabljeni dejanski podatki modeliranega omrežja. Operater distribucijskih omrežij, ki upravlja obravnavano omrežje, je posredoval naslednje tipe podatkov:

- Podatke transformatorja: napetostni nivoji, nazivna moč, izgube prostega teka in polne obremenitve, kratkostične napetosti in upornosti navitij.
- Podatke o kratkostičnih močeh in tokovih SN omrežja na točki priklopa.
- Podatke o vodih v omrežju: lokacija, dolžine, električni parametri.
- Podatke o bremenih: lokacija v omrežju, tip priklopa in priključna moč.
- Podatke OVE in industrijskih porabnikov: lokacija in priključna moč.
- Meritve: hišni odjemalci, industrijski uporabniki in transformatorske meritve.

Na podlagi podatkov v različnih formatih in podatkovnih sistemih je bila ustvarjena eno-linijska shema omrežja, z definiranimi dolžinami in tipi kablov/vodov ter lokacijo priklopa odjemalcev. Ko je bila ustvarjena celovita slika omrežja, je sledilo modeliranje omrežja v programu OpenDSS. Program temelji na besedilni definiciji gradnikov omrežja, kjer se ločeno definira parametre vsakega posameznega gradnika. Shemo testnega omrežja v sistemu GIS in prikaz vodov v programu OpenDSS prikazuje Slika 4.



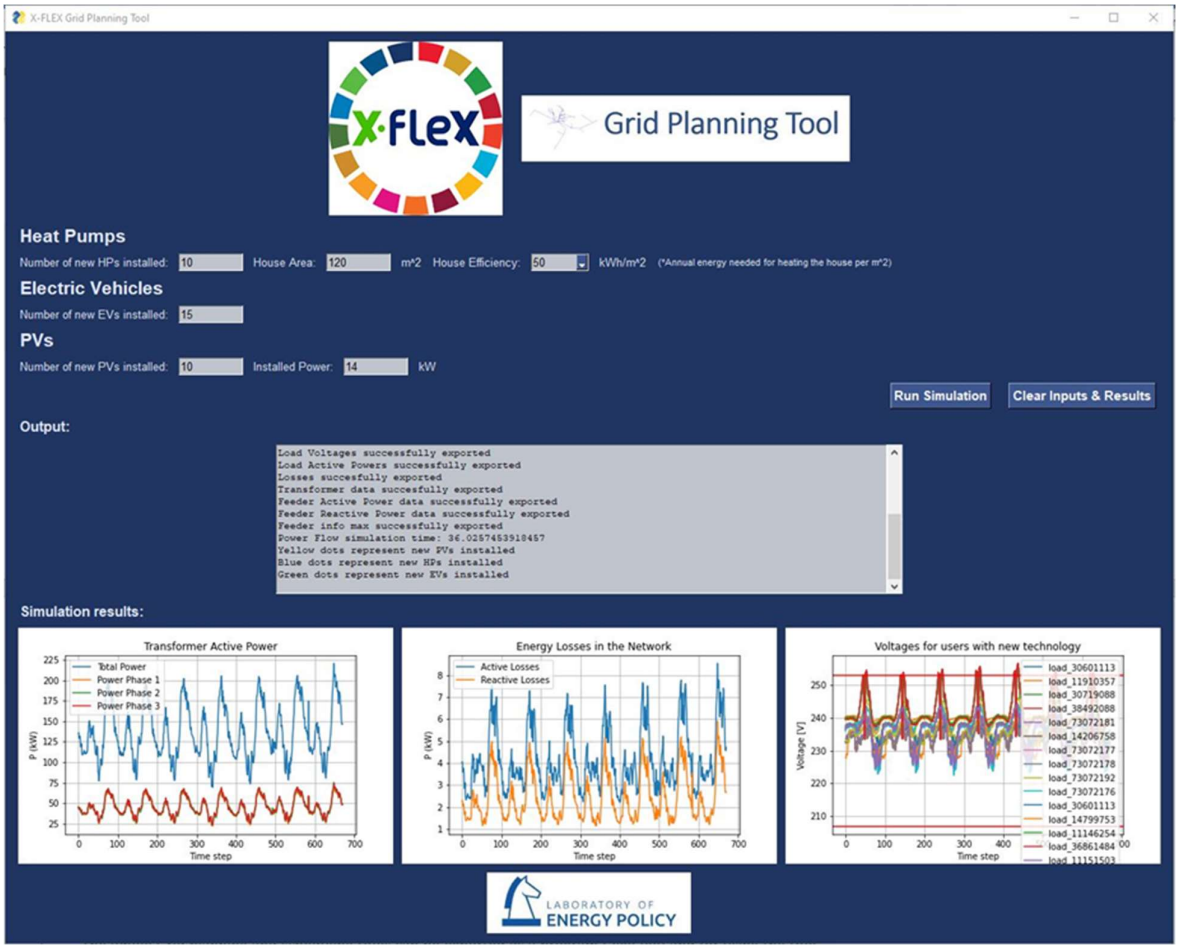
Slika 4: Shema omrežja v sistemu GIS (levo) in prikaz v vodov v programu OpenDSS (desno)

3.2. Funkcije orodja za načrtovanje NN omrežij

Orodje za načrtovanje NN omrežij omogoča simulacije pretokov moči v omrežju z dodajanjem novih tehnologij. Za uporabo orodja je nujna namestitev programa OpenDSS. Skozi vnosno masko grafičnega vmesnika orodja uporabnik izbere naslednje parametre:

- Število novih toplotnih črpalk v omrežju,
- površino ogrevanja,
- toplotno učinkovitost stavbe,
- število novih električnih vozil v omrežju,
- število novih sončnih elektrarn,
- inštalirano moč posamezne nove sončne elektrarne.

Ko so določeni vsi parametri, se v ozadju zažene simulacija. Potek simulacije uporabnik lahko spremlja preko grafičnega vmesnika, v katerem se po uspešno izvedeni simulaciji izrišejo grafi, kateri prikazujejo delovno moč transformatorja, izgube v omrežju in napetosti uporabnikov omrežja katerim je bila tekom simulacije dodana katera od omenjenih novih tehnologij. Slika 5 prikazuje grafični vmesnik orodja za načrtovanje NN omrežij skupaj z rezultati simulacije za testno omrežje Luč.



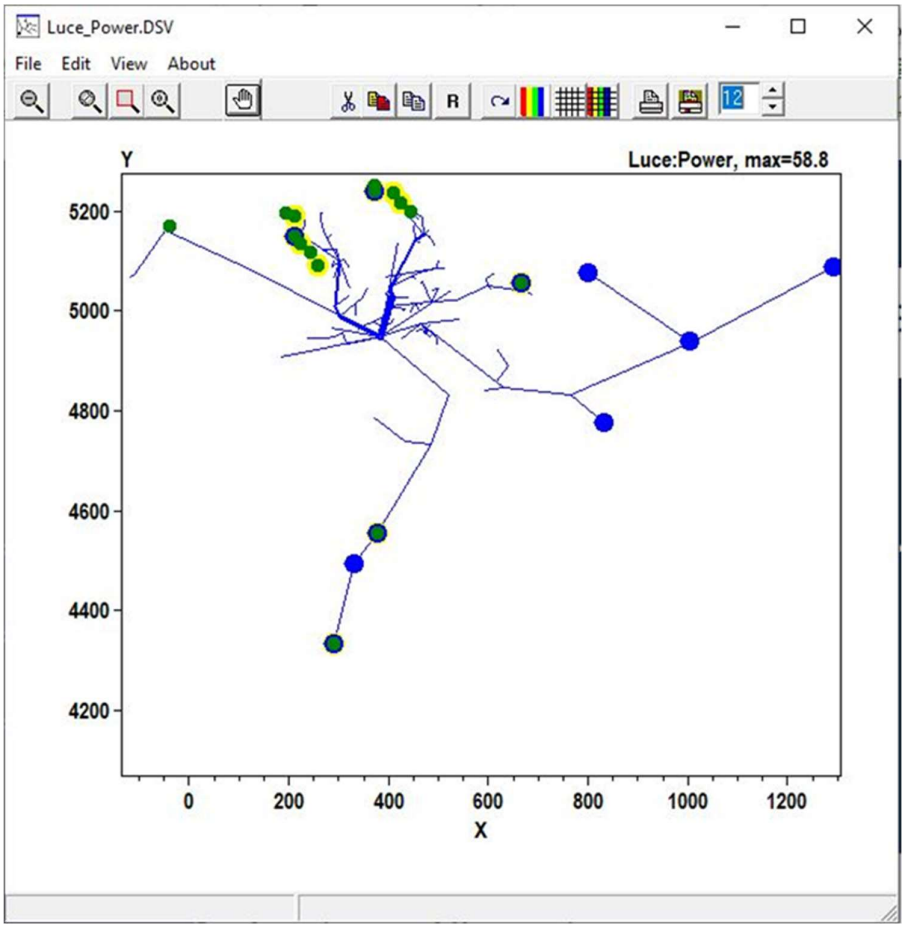
Slika 5: Grafični vmesnik z rezultati simulacije

Kot rezulat simulacij pretokov moči so uporabniku na voljo naslednji podatki:

- Največja delovna moč posameznega izvoda iz transformatorja,
- delovne in jalove moči posameznega izvoda iz transformatorja,
- napetosti in moči vseh uporabnikov oziroma bremen v omrežju,
- izgube v omrežju in
- podatki transformatorja (skupna delovna in jalova moč transformatorja, delovne in jalove moči za posamezno fazo ter fazne napetosti).

Vsi rezultati, z izjemo največje moči posameznega izvoda iz transformatorja, so časovne vrste z vrednostmi za vsak simuliran časovni interval. Časovna resolucija simulacij je 15 minut, časovno obdobje simulacij pa je za potrebe testiranja nastavljeno na en teden. Rezultati posamezne simulacije so shranjeni na lokaciji orodja in na voljo uporabniku za podrobnejšo analizo.

Kot omenjeno v podpoglavju 2.1 je del orodja za vizualizacijo rezultatov tudi grafična ponazoritev uporabnikov oziroma lokacij z novimi tehnologijami. Primer prikazuje Slika 6.



Slika 6:Vizualizacija testnega omrežja skupaj z lokacijami novih tehnologij

Na sliki so z rumeno barvo označene lokacije novih sončnih elektrarn, z modro lokacije novih toplotnih črpalk in z zeleno lokacije novih električnih vozil oziroma njihovih hišnih polnilnikov.

4 NADGRADNJE OMREŽJA IN ALTERNATIVNE REŠITVE ZA ODPRAVLJANJE TEŽAV

Z uporabo orodja za načrtovanje NN omrežij uporabnik dobi vpogled v stabilnost omrežja preko napetostnih razmer, obremenitev transformatorja in izvodov. Preko omenjenih parametrov je možno ovrednotenje vpliva novih tehnologij na omrežje. Če se izkaže, da so vrednosti za določen simuliran scenarij (število novih tehnologij) izven predpisanih meja, so nujne nadgradnje omrežja. Možne nagradnje omrežja so:

- **Nadgradnja vodov**: Te nadgradnje spadajo med enostavnejše nadgradnje omrežij, saj gre pri njih zgolj za zamenjavo obstoječih šibkejših vodov (ali kablov) z močnejšimi. Zamenjava vodov odpravlja zamašitve, saj nov vod omogoča večje pretoke moči, kar se odraža tudi v manjših padcih napetosti vzdolž voda.
- **Zamenjava transformatorja**: Ena od nadgradenj omrežja je tudi zamenjava obstoječega SN/NN transformatorja s transformatorjem večje moči. Nov transformator omogoča višje pretoke moči in zmanjša napetostne deviacije.
- **Vgradnja baterijskega hranilnika**: Vgradnja baterijskega hranilnika predstavlja alternativo klasičnim nadgradnjam omrežja, predvsem zamenjavi transformatorja. Pri odločitvi za vgradnjo baterijskega hranilnika ima ključno vlogo izbira primerne lokacije. Če problem v omrežju predstavlja kršitev napetostnih kriterijev ali dopustnih obremenitev na nivoju transformatorja ali izvoda, potem je baterijski hranilnik potrebno vgraditi blizu transformatorske postaje. Če pa težava zadeva zgolj določen del omrežja, potem je vgradnja baterijskega hranilnika bolj smiselna v problematičnem delu omrežja.

Baterijski hranilnih rešuje težave s shranjevanjem odvečne energije v primeru visoke proizvodnje OVE, oziroma z injiciranjem shranjene energije v primeru visokega odjema.

Za testno omrežje sta bila pripravljana dva scenarija razvoja omrežja do leta 2030. Po izvedeni analizi rezultatov simuacij teh dveh scenarijev bodo za testno omrežje pripravljeni predlogi nadgradenj omrežja. Uporabnik orodja bo tako imel možnost simulacij z uporabo modela obstoječega omrežja in modela nadgrajenega omrežja. Ker je pri načrtovanju omrežij poleg tehničnega pomemben tudi ekonomski vidik investicij, je del orodja za načrtovanje NN omrežij tudi pregled stroškov nadgradenj omrežja. Pregled je bil narejen v sodelovanju s sistemskima operaterjema, ki sta partnerja v projektu X-FLEX in vsebuje stroške vodov, transformatorjev in baterijskih hranilnikov. Alternativo fizičnim nadgradnjam omrežij pa predstavljajo tudi različni mehanizmi za izkoriščanje prožnosti proizvodnje in/ali porabe električne energije. Eden od teh je tudi tržni pristop.

4.1. Tržni pristop k omejevanju razpoložljivih omrežnih kapacitet

Eden od ciljev orodja za načrtovanje NN omrežij je tudi omogočiti uporabnikom simulacije pretokov moči, kjer za določitev profilov moči ni uporabljana tehnična optimizacija ampak tržni pristop. Funkcionalnost omogoča simulacije s spreminjanjem profilov moči. V okviru projekta X-FLEX je slednje izvedeno preko orodja MARKETFLEX (MF), ki omogoča omejevanje omrežnih kapacitet z vzpostavitvijo lokalnega elektroenergetskega trga. MF hkrati omogoča komunikacijo med sistemskim operaterjem distribucijskega omrežja in lastniki oziroma upravitelji (agregatorji) prožnostnih enot. Z vzpostavitvijo lokalnega elektroenergetskega trga se namreč lahko odpravi težave povezane z zamašitvami in kršitvami napetostnih kriterijev. Lokalni elektroenergetski trg tako ponuja alternativo obstoječim rešitvam povezanim z nadgradnjami v omrežju.

Preko simulacij pretokov moči lahko dobimo oceno razpoložljivih kapacitet posameznega izvoda iz transformatorja. Če ugotovimo presežene vrednosti lahko to odpravimo s spreminjanjem zahtev po aktivaciji enot, katere omogočajo prožnost. MF omogoča spreminjanje urnikov aktivacije enot, katerih vpliv na omrežje lahko analiziramo preko orodja za načrtovanje NN omrežij. Pri tem je potrebno zasledovati dve stvari: da zadostimo pogojem za normalno obratovanje omrežja in da zadostimo dnevnim potrebam po energiji vseh uporabnikov omrežja.

5 ZAKLJUČKI

V referatu je predstavljena zasnova orodja za načrtovanje nizkonapetostnih omrežij z velikim deležem razpršenih virov in prožnostjo proizvodnje ter porabe električne energije, katerega razvoj poteka v okviru projekta X-FLEX. Orodje je namenjeno sistemskim operaterjem omrežij in omogoča simulacije pretokov moči z dodajanjem novih tehnologij (naprav) v omrežje. Preko analize rezultatov simulacije je mogoča identifikacija šibkih točk omrežja. Orodje obsega tri glavne dele: grafični vmesnik, podatkovno zbirko in jedro (glavni del), ki vsebuje vse ključne gradnike orodja za izvedbo simulacij pretokov moči. Med gradnike orodja sodijo tudi algoritmi za določanje profilov moči obstoječih uporabnikov (bremen) in novih naprav v omrežju; električnih vozil, toplotnih črpalk in sončnih elektrarn. Orodje je zasnovano na način, da uporabniku omogoča prosto izbiro števila posameznih novih naprav in s tem simulacije različnih scenarijev razvoja omrežja. Simulacije pretokov moči se izvajajo preko orodja, ki temelji na programu OpenDSS. Predstavitev rezultatov posamezne simulacije je izvedena preko grafičnega vmesnika in vključuje grafično prezentacijo lokacij novih tehnologij v omrežju.

Nadaljnji razvoj orodja predvideva vključitev hišnih hranilnikov energije (baterij) in modelov omrežja z nadgradnjami. Za vse v modele omrežij vključene nadgradnje bo uporabniku na voljo tudi ocena investicij, izdelana na podlagi zbirke podatkov o stroških nadgradenj. Uporabnik bo imel tudi možnost izbire časovnega obdobja simulacije, hkrati bomo poskrbeli tudi za posodobitev celostne grafične podobe orodja.

Veliko število električnih vozil, oziroma njihovih polnilnikov, in toplotnih črpalk pomeni veliko dodatno breme za omrežje, še posebej če se sočasno pojavi več zahtev za aktivacijo. Oba tipa porabnikov pa lahko obravnavamo kot prilagodljiva, tudi toplotne črpalke če imajo dodan dovolj velik hranilnik toplote. Lastniki oziroma upravljalci teh in podobnih naprav lahko sodelujejo na lokalnem elektroenergetskem trgu, katerega vpliv na delovanje in razvoj elektroenergetskih omrežij bo predmet nadaljnjih raziskav v okviru razvoja orodja za načrtovanje nizkonapetostnih omrežij in projekta X-FLEX.

REFERENCE

[1] P. L. a. e. all, „Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Izv. 45, pp. 785-807, 2014.

[2] E. a. G. R. Meissner, „Battery monitoring and electrical energy management: Precondition for future vehicle electric power systems,“ *Journal of power sources,* Izv. 116, št. 1-2, pp. 79-98, 2003.

[3] J. A. Momoh, „Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control,“ *Power Systems Conference and Exposition,* Izv. IEEE/PES, št. PSCE'09, 2009.

[4] D. P. B. a. E. B. D. A. Sbordone, „Energy analysis of a real grid connected lithium battery energy storage system,“ *Energy Procedia,* Izv. 75, pp. 1881-1887, 2015.

[5] X-FLEX Project, „Description of X-FLEX,“ [Elektronski]. Available: http://xflexproject.eu/. [Poskus dostopa 30. 8. 2021].

[6] O. Ruhnau, „When2Heat Heating Profiles. Open Power System Data.,“ 2019. [Elektronski]. Available: https://doi.org/10.25832/when2heat/2019-08-06. [Poskus dostopa 19. 7. 2021].

[7] L. K. X. X. W. J. Y. Y. y. Z. J. T. Shun, „Charging demand for electric vehicle based on stochastic analysis of trip chain,“ *IET Generation, Transmission & Distribution,* 2016.

[8] JRC, „Driving and parking patterns of European car drivers - a mobility survey,“ 2012.

[9] Statistični Urad Republika Slovenija, „Average distance per mobile person completed on a working or non-working day due to the stated purpose of the route (in km),“ 2017. [Elektronski]. Available: https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/2281305S.px/. [Poskus dostopa 3. 8. 2021].

[10] SourceForge, „OpenDSS,“ [Elektronski]. Available: https://sourceforge.net/projects/electricdss/. [Poskus dostopa 18. 8. 2021].

ZAHVALA

Predstavljene rešitve so del raziskovalnih aktivnosti v projektu X-FLEX, ki se financira iz Okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije Obzorje 2020 (HORIZON 2020) v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. 863927.