HRVATSKI OGRANAK MEĐUNARODNE ELEKTRODISTRIBUCIJSKE KONFERENCIJE - HO CIRED
9. (15.) savjetovanje
Šibenik, 25. - 27. svibnja 2025.

SO3 - 8

Kristijan-Frano Ćavar
HEP-ODS, Sektor za vođenje sustava
kfcavar@hep.hr

Katarina Jurica
HEP-ODS, Elektra Zagreb
Katarina.jurica@hep.hr

Eduard Škec
HEP-ODS, Elektrodalmacija Split
Eduard.skec@hep.hr

Branimir Gabrić
HEP-ODS, Sektor za vođenje sustava
Branimir.gabric1@hep.hr

Ante Franić
HEP – ODS, Sektor za vođenje sustava
Ante.franic@hep.hr

RAZVOJ WEB APLIKACIJE ZA ANALIZU TOKOVA SNAGA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI KORISTEĆI TEHNOLOGIJE OTVORENOG KODA

SAŽETAK

Projekt obuhvaća razvoj web aplikacije koja omogućava korisnicima analizu tokova snaga u elektroenergetskim mrežama. Aplikacija je izgrađena korištenjem Open Source tehnologija, s naglaskom na pandapower paket, koji je ključan za analizu elektroenergetskih mreža. Pandapower omogućuje simulaciju, analizu, optimizaciju i učinkovito upravljanje distribucijskim mrežama, što je ključno za pouzdano funkcioniranje elektroenergetskih sustava. U sklopu projekta razvijeni su i alati za dohvat različitih statičkih i dinamičkih parametara potrebnih za kreiranje mrežnih modela, uključujući mjerenja struja, snage i napona. Aplikacija je osmišljena da bude jednostavno dostupna svim inženjerima, što za naobrazbu mladih inženjera, što za proračune koji postaju nužnost na dnevnoj razini. Razvoj ove aplikacije je od velike važnosti u kontekstu brzih promjena na energetskom tržištu, gdje tradicionalni tokovi energije više nisu jedini fokus, već je potrebno uključiti i sve veći broj elektrana koje postaju integralni dio distribucijskih mreža.

Ključne riječi: Pandapower, proračun tokova snaga, Web aplikacija

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR POWER FLOW ANALYSIS IN DISTRIBUTION NETWORKS USING OPEN SOURCE TECHNOLOGIES

SUMMARY

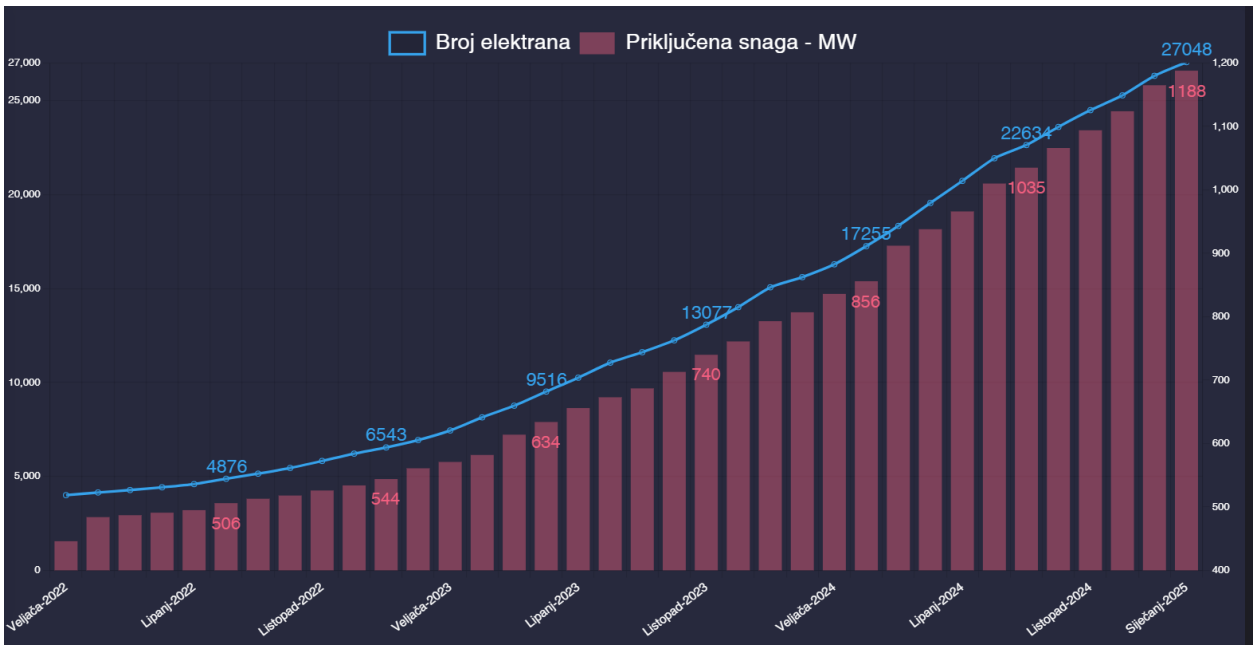
The project involves the development of a web application that allows users to analyze power flows in electrical networks. The application is built using Open Source technologies, with a focus on the pandapower package, which is essential for analyzing electrical networks. Pandapower enables simulation, analysis, optimization, and efficient management of distribution networks, which is crucial for the reliable operation of electrical systems. As part of the project, tools have been developed to retrieve various static and dynamic parameters needed to create network models, including measurements of current, power, and voltage. The application is designed to be easily accessible to all engineers, both for the education of young engineers and for calculations that become necessary on a daily basis.

The development of this application is of great importance in the context of rapid changes in the energy market, where traditional energy flows are no longer the only focus, but it is also necessary to include an increasing number of power plants that are becoming an integral part of distribution networks.

Key words: Pandapower, Power Flow analysis, Web application

1. UVOD

Posljednjih nekoliko godina, Republika Hrvatska je svjedočila značajnom porastu broja elektrana koje su spojene na nacionalnu distribucijsku mrežu HEP ODS-a (Slika 1.). Ovaj značajan rast rezultat je ubrzanih investicija u obnovljive izvore energije i šire potrebe za raznovrsnostima energetskih resursa, koje su u skladu s nacionalnim strategijama i europskim smjernicama održivog razvoja. S obzirom na težnju k postizanju energetske neovisnosti, ovaj trend ne samo da se očekuje nastaviti, već će se vjerojatno i pojačati u nadolazećim godinama, potaknut novim tehnološkim inovacijama, te sve strožim regulatornim zahtjevima.

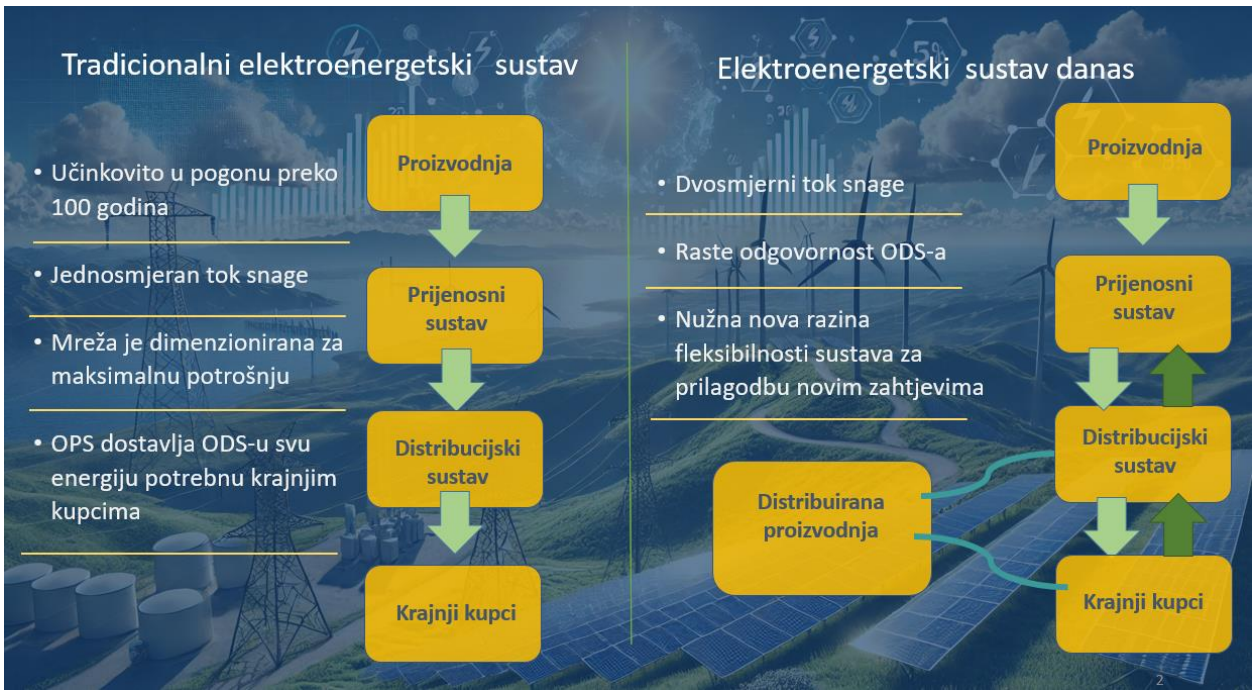


Slika 1. Rast broja elektrana spojenih na distribucijsku mrežu (2021-2024)

Integracija sve većeg broja elektrana, posebice onih koje koriste obnovljive izvore kao što su solarna i energija vjetra, postavlja tehničke zahtjeve na stabilnost i pouzdanost mreže. Varijabilnost u proizvodnji energije iz ovih izvora može dovesti do poteškoća u napajanju koje zahtijevaju napredne metode nadzora i regulacije. To stvara potrebu za inovativnim rješenjima koja mogu precizno pratiti i upravljati distribucijskom mrežom, osiguravajući da se energetska sigurnost ne ugrožava ni u kojim okolnostima.

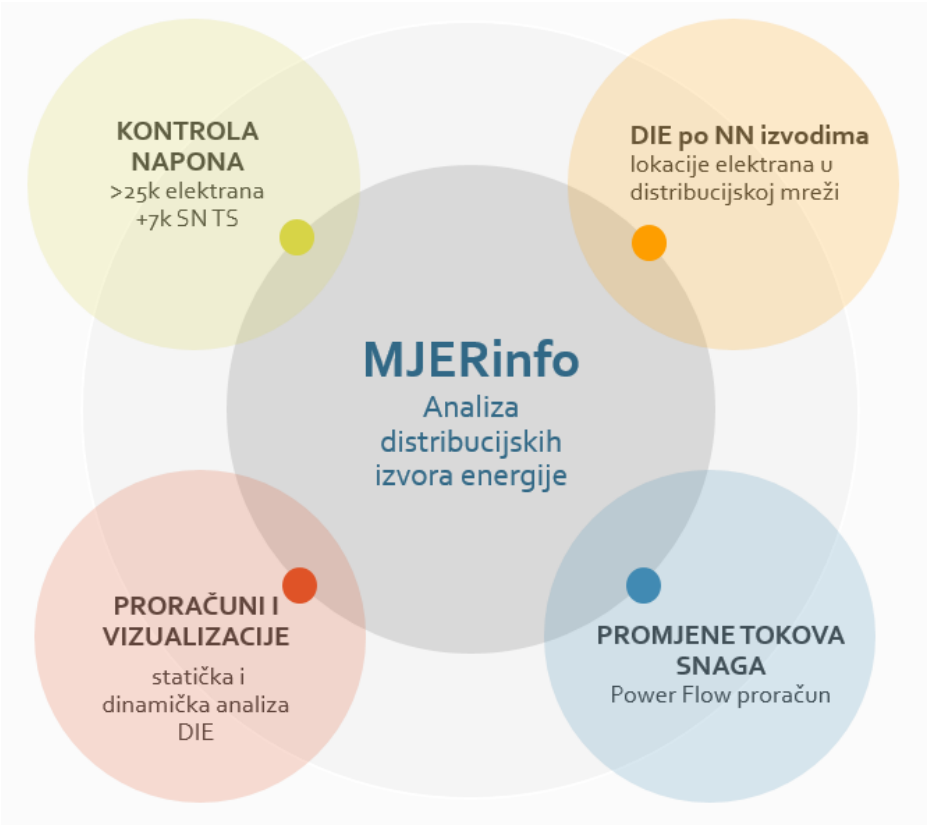
U tom kontekstu, neophodno je implementirati sofisticirane alate i tehnologije koje mogu učinkovito pratiti i analizirati električnu energiju u realnom vremenu, kako bi se osigurala stabilnost mreže i zadovoljile sve veće potrebe potrošača.

Sektor za vođenje sustava HEP ODS-a već dugi niz godina aktivno razvija i implementira sustave analize procesnih informacija kroz različite aplikacije. Među njima se posebno izdvaja **MJERinfo** platforma [1], koja je postavila temelje za daljnji razvoj aplikacija u procesnom "data science" svijetu. Na temelju stečenih iskustava, trenutno se radi na razvoju novog modula pod radnim nazivom **'MJERinfo – DIE analize'** (Slika 3.)**.** Ovaj modul uključuje niz aplikacija, a jedna od njih je i web aplikacija za računanje tokova snaga u distribucijskoj mreži koja je razvijena s posebnim fokusom na potrebe Sektora za vođenje sustava. Aplikacija omogućuje brzo i precizno modeliranje distribucijske mreže i analizu tokova snage, čime doprinosi optimizaciji rada mreže i poboljšanju učinkovitosti sustava. Razvoj ove aplikacije je od važnosti u kontekstu brzi promjena na energetskom tržištu, gdje tradicionalni tokovi energije više nisu jedini fokus (Slika 2.), već je potrebno uključiti i sve veći broj elektrana koje postaju integralni dio distribucijskih mreža.



Slika 2. Distribucijski sustav jučer/danas

Iako je prvobitno razvijena za specifične potrebe Sektora za vođenje sustava, aplikacija je dovoljno fleksibilna i može se primijeniti i u drugim dijelovima energetskog sustava, kao što su poslovi planiranja, održavanja, i upravljanja energetskom infrastrukturom.

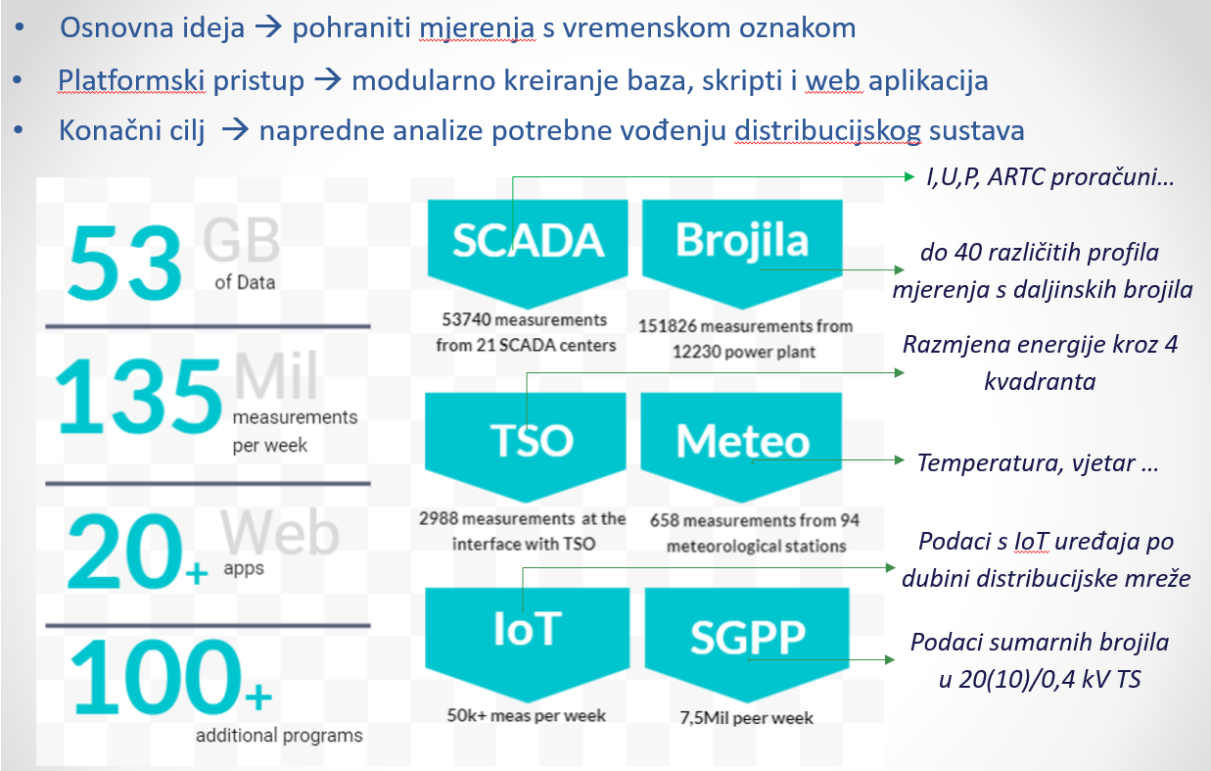


Slika 3.Koncept aplikacija MJERinfo Analiza DIE

2. Početni razvoj proračuna

Kao što smo već spomenuli, živimo u vremenu brzih promjena u energetici, napušta se tradicionalni elektroenergetski sustav i prelazi se na moderni sustav s dvosmjernim tokom energije sa mnoštvom elektrana spojenih na distribucijsku mrežu. Ponukani promjenama u tokovima energije odlučili smo se da kroz MJERinfo projekt krenemo i u smjeru kreiranja brzih proračuna koji bi olakšavali vođenje sustava.

Budući da kroz MJERinfo projekt dugi niz godina sustavno pohranjujemo i analiziramo različita mjerenja iz elektroenergetskog sustava (Slika 4.), došli smo do mogućnosti da ta nam mjerenja mogu poslužiti kao čvrst temelj za pripremu ulaznih podataka za proračune tokova snaga. Navedena mjerenja nam omogućavaju preciznije rezultate u analizama elektroenergetskih tokova, što je ključno za učinkovito planiranje, optimizaciju i upravljanje distribucijskom mrežom.



Slika 4.MJERinfo platforma- proces pohrane

Na temelju navedenog krenuli smo u razvoj web aplikaciju koja omogućava izračunavanje tokova snage na specifičnim dijelovima elektroenergetske mreže. Aplikacija je osmišljena da bude jednostavno dostupna svim inženjerima, što za naobrazbu mladih inženjera što za proračune koji postaju nužnost na dnevnoj razini.

Funkcija tokova snaga (engl. Power Flow) u je matematički postupak koji se koristi za izračunavanje električnih parametara i određivanje stabilnog načina rada elektroenergetske mreže. Cilj analize proračuna tokova snaga je izračunati nepoznate električne parametre u čvorištima tako da se zadovolje Kirchhoffovi zakoni struja i snaga, uzimajući u obzir specificirane snage proizvođača i opterećenja te vodova mreže.

Aplikacija je u cijelosti razvijena korištenjem tehnologija otvorenog koda - programskog jezika Python i biblioteke PandasPower [2], koji koristimo za izračunavanje tokova snage te Django web frameworka.

Pandapower je Python biblioteka koja se koristi za analizu elektroenergetskih mreža, s naglaskom na analizu tokova snaga, napona, analize struja kratkog spoja i estimaciju stanja u energetskoj mreži. Kao alat otvorenog koda, omogućuje inženjerima i istraživačima rad s elektroenergetskim sustavima bez potrebe za komercijalnim softverima. Razvijen je u okviru inicijative za stvaranje jednostavnog,

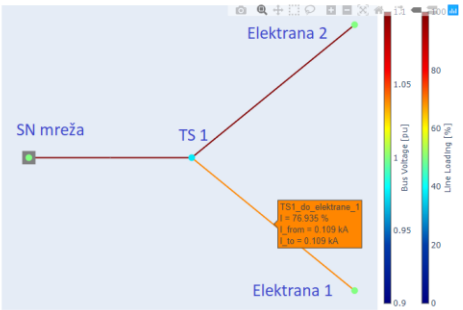
fleksibilnog i efikasnog alata za elektroenergetske analize, a razvoj je započeo od strane Fraunhofer UMSICHT u suradnji s različitim istraživačkim institutima i inženjerskim timovima.

Pandapower koristi osnovne komponente poput NetworkX i PyPSA za modeliranje elektroenergetskih mreža. Također, podržava modeliranje distribucijskih i prijenosnih mreža, od manjih lokalnih sustava do velikih regionalnih mreža. Zbog svoje fleksibilnosti i otvorenog koda, Pandapower je postao vrlo popularan u istraživačkim institucijama, energetskim tvrtkama i u razvoju energetske infrastrukture. Posebno je koristan u akademskim radovima i projektima vezanim uz obnovljive izvore energije, jer omogućuje jednostavnu integraciju novih tehnologija u elektroenergetske mreže. Također se koristi u razvoju i optimizaciji distribucijskih mreža, osobito u planiranju i analizi energetskih sustava.

Pandapower omogućuje korisnicima simulaciju, analizu, optimizaciju i učinkovito upravljanje distribucijskim mrežama, što je ključno za pouzdano funkcioniranje elektroenergetskih sustava.

Da bi imali proračun prvi korak je napraviti model mreže, statički model elektroenergetskog sustava se može modelirati kao kompleksna mreža sastavljena od čvorišta (eng. Buses - mjesta gdje se sastaju dva elementa) i grana (kabeli, transformatori, elektrane, potrošači,…). Kroz par linija koda skiciramo početni model mreže i pokrećemo proračun tokova snaga. Primjer mrežnog modela i rezultati osnovnog proračuna se nalaze na slici ispod.

```
Podaci o modelu i elementima mreže.

      Lokacija  Bus ID                Loads          Generators                                          Lines
0      SN mreža       0                   []                  []                                 [SNmreža_do_TS1]
1          TS_1       1  [Teret na TS - 8MW]                  []  [SNmreža_do_TS1, TS1_do_elektrane_1, TS1_do_el...
2  Elektrana_1       2                   []       [Izvor novi]                              [TS1_do_elektrane_1]
3  Elektrana_2       3                   []  [Stare elektrane]                              [TS1_do_elektrane_2]
Podaci o vodovima

                name      std_type  from_bus  to_bus  length_km  r_ohm_per_km  x_ohm_per_km  c_nf_per_km  g_us_per_km  max_i_ka   df  parallel type  in_service
0       SNmreža_do_TS1  NAYY 4x50 SE         0       1        1.0         0.642         0.083        210.0          0.0     0.142  1.0         1   cs        True
1  TS1_do_elektrane_1  NAYY 4x50 SE         1       2        2.0         0.642         0.083        210.0          0.0     0.142  1.0         1   cs        True
2  TS1_do_elektrane_2  NAYY 4x50 SE         1       3        1.5         0.642         0.083        210.0          0.0     0.142  1.0         1   cs        True

==================================================

numba cannot be imported and numba functions are disabled.
Probably the execution is slow.
Please install numba to gain a massive speedup.
(or if you prefer slow execution, set the flag numba=False to avoid this warning!)


Podaci o tokovima snaga u na određenim lokacijama (točkama)

      Lokacija     vm_pu  va_degree      p_mw    q_mvar     Cosinus
0      SN mreža  1.000000   0.000000 -3.784251 -0.025143  100.000000
1          TS_1  0.975686  -0.173724  8.000000  0.050000   99.826276
2  Elektrana_1  1.000000   0.000000 -1.892125 -0.007623  100.000000
3  Elektrana_2  1.000000   0.000000 -2.522834 -0.014013  100.000000

** vm_pu - omjer stvarnog i nazivnog napona
** va_degree - kut napona
** p_mw - aktivna snaga u točki (koja se generira(-) ili troši(+)
** q_mvar - reaktivna snaga (koja se generira(-) ili troši(+)

==================================================

Tokovi snaga po vodovima:

             Lokacija  p_from_mw  q_from_mvar   p_to_mw  q_to_mvar     pl_mw   ql_mvar  i_from_ka  i_to_ka      i_ka  vm_from_pu  va_from_degree  vm_to_pu  va_to_degree  loading_percent
0       SNmreža_do_TS1   3.784251     0.025143 -3.692308  -0.019695  0.091943  0.005448   0.218489  0.218491  0.218491    1.000000        0.000000  0.975686     -0.173724       153.866836
1  TS1_do_elektrane_1  -1.846154    -0.014558  1.892125   0.007623  0.045972 -0.006934   0.109247  0.109243  0.109247    0.975686       -0.173724  1.000000      0.000000        76.934715
2  TS1_do_elektrane_2  -2.461538    -0.015747  2.522834   0.014013  0.061295 -0.001734   0.145662  0.145658  0.145662    0.975686       -0.173724  1.000000      0.000000       102.578530

** p_from_mw - aktivna snaga koja ulazi u vod
** q_from_mvar - reaktivna snaga koja ulazi u vod
** p_to_mw - aktivna snaga koja izlazi iz voda
** pl_mw - gubitak aktivne snage u vodu
** ql_mvar - gubitak reaktivne snage u vodu (kiloAmperi)
** i_from_ka - struja koja ulazi u vod (kiloAmperi)
** i_to_ka - struja koja izlazi iz voda (kiloAmperi)
** i_ka - ukupna struja u vodu
** vm_from_pu - amplituda napona na početku voda (per unit)
** va_from_degree - fazni kut na početku voda
** vm_to_pu - amplituda napona na kraju voda (per unit)
** va_to_degree - fazni kut na kraju voda
** loading_percent - omjer stvarne snage voda i njegovog kapaciteta
```



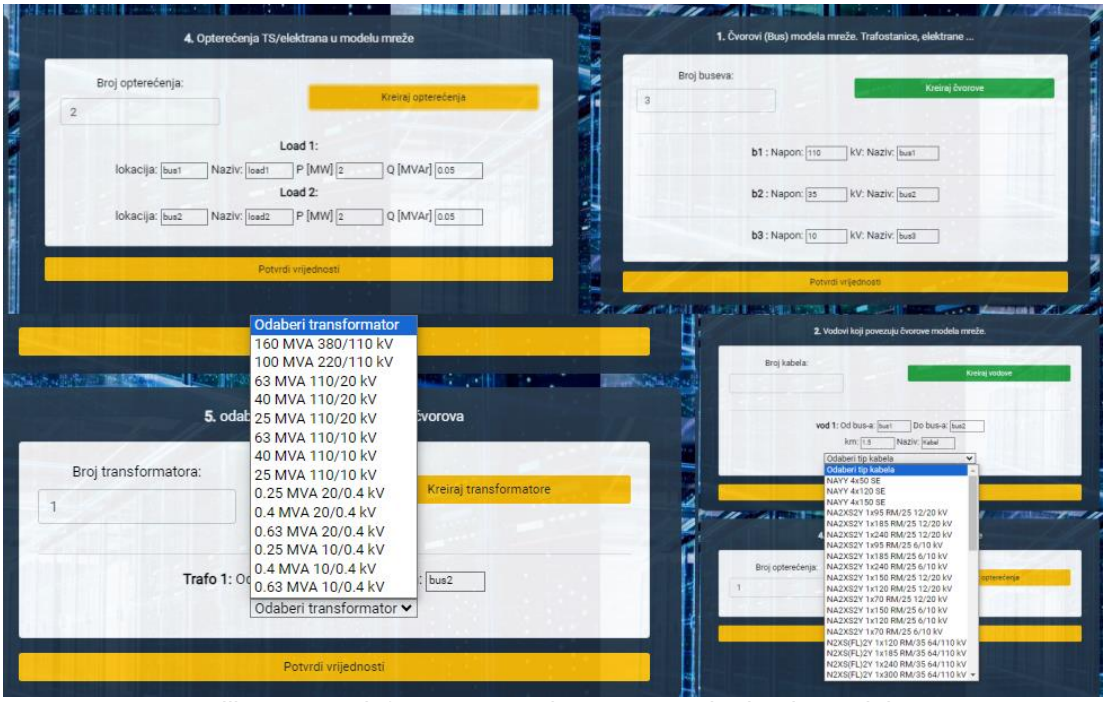
Slika 5.Rezultati Python programa za proračun tokova snaga na dijelu mreže

Nakon što smo izradili željeni mrežni model, daljnji koraci uključuju nadogradnju modela dodavanjem svih relevantnih parametara elektroenergetskog sustava. Ovi parametri obuhvaćaju statičke karakteristike, poput dužine vodova, tipova kabela i transformatora, kao i dinamičke elemente, uključujući mjerenja struja, snage i napona.

3. Razvoj web aplikacije

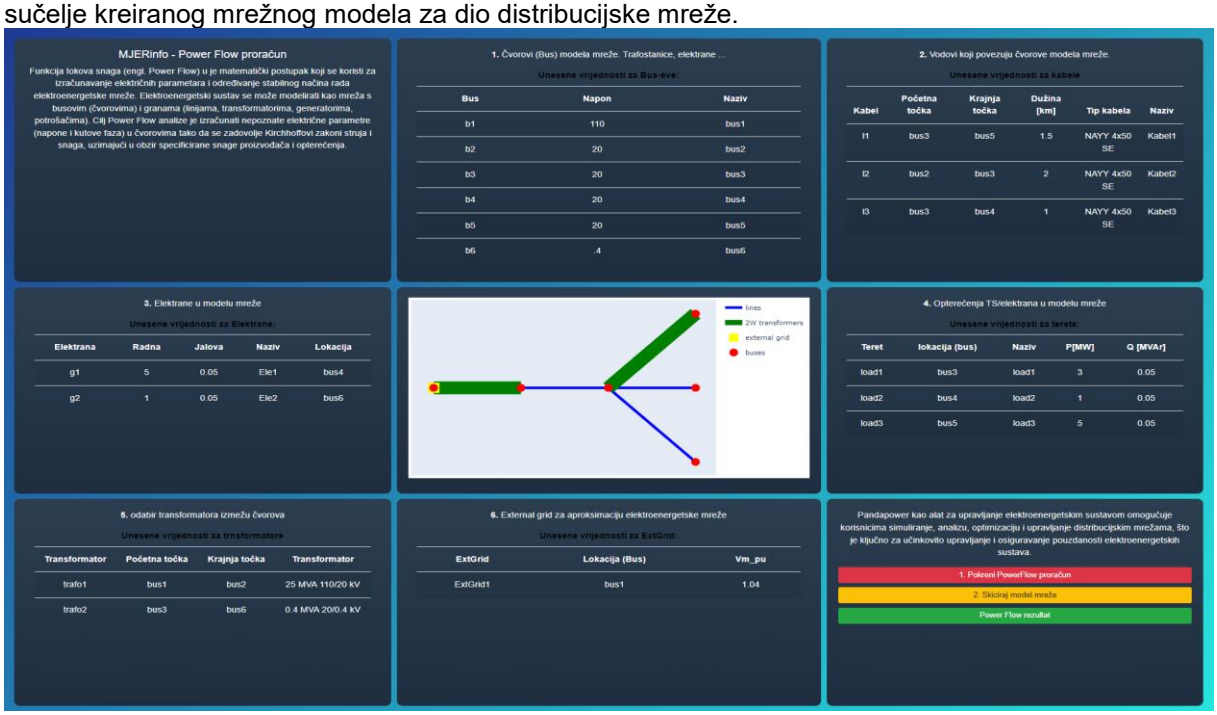
Nakon što smo kreirali program koji računa tokove snaga, željeli smo da isti omogućiti svima kojima bi isti mogao biti od pomoći pa smo kreirali web aplikaciju. Kreirana je na način da korisnici aplikacije imaju mogućnost unosa podataka putem web formi, gdje mogu skicirati vlastiti model mreže te specificirati

karakteristike vodova i transformatora, elektrana i tereta u segmentu nad kojim se vrši analiza. Na temelju tih unesenih podataka, aplikacija automatski generira mrežni model i računa proračun tokova snaga, čime se omogućava brza i precizna analiza tokova snaga unutar definiranog dijela mreže.
Slika 6. pokazuje dio ekranskog sučelja web aplikaciju – forme za odabir dijelova mreže.

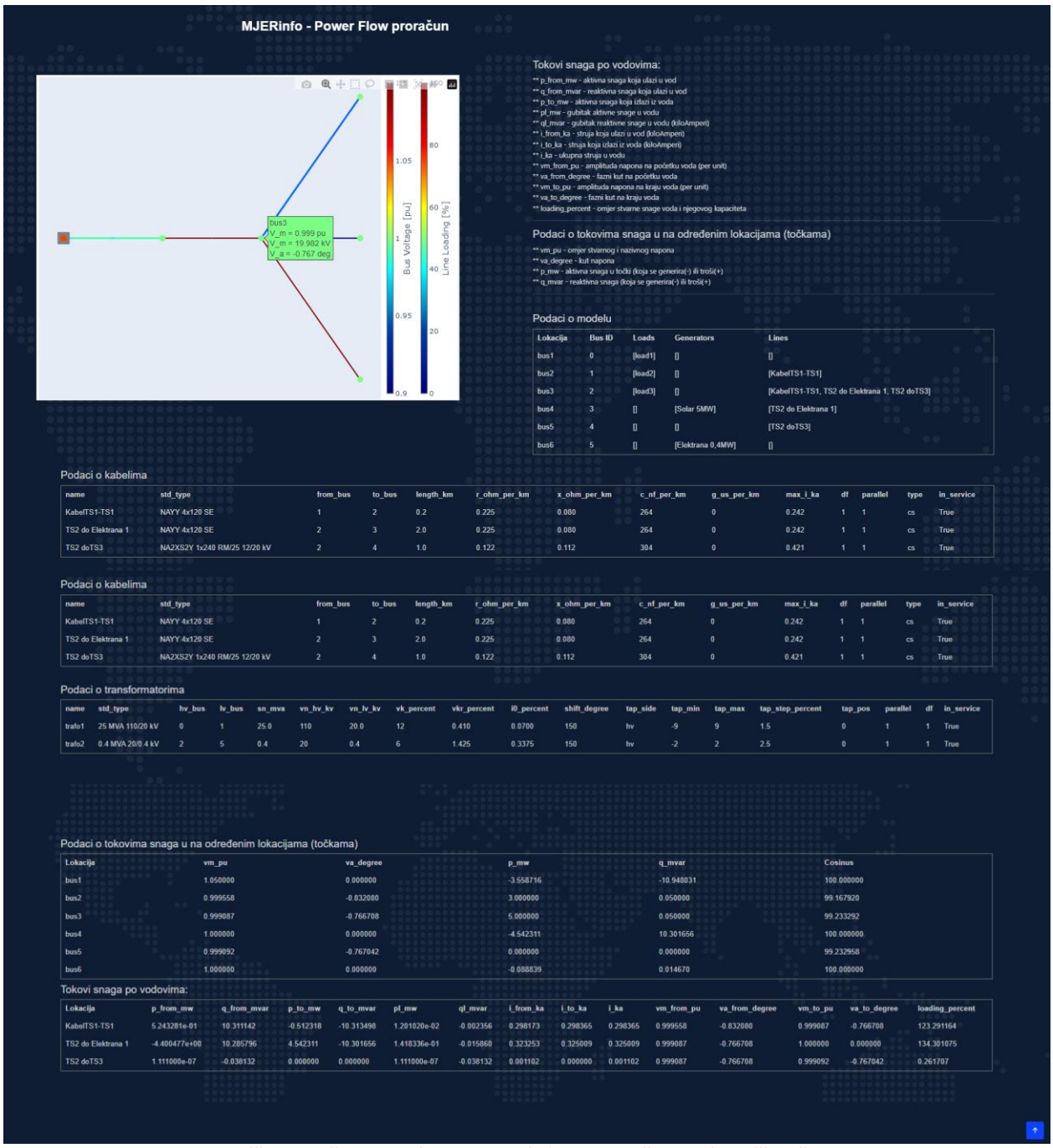


Slika 6.MJERinfo proračun tokova snaga - kreiranje modela

Kreirani model mreže se može jednostavno mijenjati, dodavati putem web tablica. Slika ispod prikazuje sučelje kreiranog mrežnog modela za dio distribucijske mreže.



Slika 7. Proračun tokova snaga - kreirani model



Slika 8.Prikaz rezultata MJERinfo PF analize web aplikacije

Ekranski prikaz na slici 8. prikazuje rezultate analize. Parametri uključuju informacije koje pomažu inženjerima da razumiju i upravljaju različitim aspektima mreže, kao što su gubici energije, tokovi snage i naponski uvjeti. Tokovi snage pružaju uvid u distribuciju energije kroz mrežu, pomažući u optimizaciji opterećenja i osiguravanju stabilnosti sustava. Naponski uvjeti omogućuju praćenje i održavanje stabilnih naponskih razina, što je važno za pouzdano funkcioniranje mreže i zaštitu opreme.

Ekranski prikaz također opširnije opisuje pojedine dijelove proračuna, uključujući teoretski dio o rezultatima analize. Ovaj teoretski dio pruža temelj za razumijevanje kako se proračuni provode i kako se dobiveni rezultati mogu koristiti za optimizaciju i upravljanje elektroenergetskim sustavom.

Parameter	Description
vm_pu	Amplituda napona: Omjer stvarnog napona na čvoru i baznog napona, obično 1 pu.
va_degree	Kut napona u stupnjevima: Fazni kut napona na čvoru u odnosu na referentni kut.
p_mw	Aktivna snaga u megavatima: Snaga koju generira ili troši generator na čvoru.
q_mvar	Reaktivna snaga u megavarima: Snaga koja održava napone u sustavu, ali se ne troši.
from_mw i q_from_mvar	Aktivna i reaktivna snaga koja ulazi u vod.
p_to_mw i q_to_mvar	Aktivna i reaktivna snaga koja izlazi iz voda.
pl_mw i ql_mvar	Gubitak aktivne i reaktivne snage u vodu.
i_from_ka i i_to_ka	Struja koja ulazi i izlazi iz voda.
i_ka	Ukupna struja u vodu.
vm_from_pu i vm_to_pu	Amplituda napona na početnom i završnom kraju voda.
va_from_degree i va_to_degree	Fazni kut napona na početnom i završnom kraju voda.
loading_percent	Postotak opterećenja voda, izražen kao omjer stvarne snage i kapaciteta voda.

Tablica 1. Teoretski dio o rezultatima analize

Osluškujući korisnike aplikacije, trenutno je u izradi dodatni web modul koji će za input primati Excel datoteke s definiranim podacima za mrežni model, na temelju kojih će program nuditi proračun tokova snaga. Također radimo na modulu koji će korisnicima omogućiti skiciranje modela mreže pomoću drag-and-drop web funkcija.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		name	bus	p_mw	q_mvar	st_z_perc	st_i_perc	sn_mva	scaling	in_service	type
2	0	Teret1	1	28,85	0,01	0	0		1	TRUE	wye
3	1	Teret_Nova_TS	2	1,965	0,01	0	0		1	TRUE	wye
4	2	Teret_1TS1998	3	0,258	0,01	0	0		1	TRUE	wye
5	3	Teret_1TS2618	4	0,133	0,01	0	0		1	TRUE	wye
6	4	Teret_1TS500	5	0,587	0,01	0	0		1	TRUE	wye
7	5	Teret_1TS2154	6	0,32	0,01	0	0		1	TRUE	wye
8	6	Teret_1TS2153	7	0,32	0,01	0	0		1	TRUE	wye
9	7	Teret_1TS2155	8	0,294	0,01	0	0		1	TRUE	wye
10	8	Teret_1TS402	9	0,1	0,01	0	0		1	TRUE	wye
11	9	Teret_1TS2654	10	0,1	0,01	0	0		1	TRUE	wye
12	10	Teret_1TS2613	11	0,204	0,01	0	0		1	TRUE	wye
13	11	Teret_1TS785	12	0,133	0,01	0	0		1	TRUE	wye
14	12	Teret_1TS2590	15	0,16	0,01	0	0		1	TRUE	wye

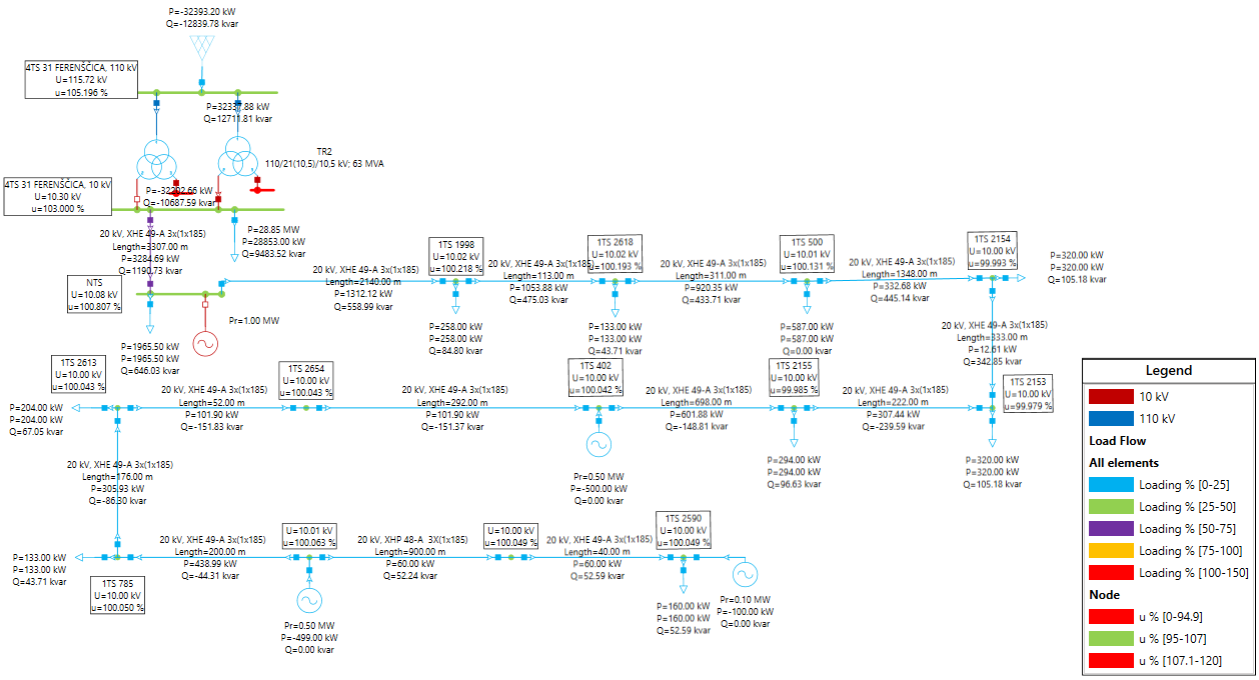
Bus | Line | Trafo | Load | Meas | ext_grid | gen

Slika 9: Primjer excel filea iz kojega se radi automatizirani proračun

U budućnosti, aplikacija može imati automatizirani spoj na GIS podatke za kreiranje modela mreže te na sve MJERinfo proračune i vremenske serije mjerenja. Pri Sektoru za vođenje sustava je u tijeku uvođenje projekta PowerCIM firme Končar Digital. Na ovaj način će se unutar ODS-a uspostaviti CIM repozitorij te će se izraditi adapteri za razmjenu topoloških i geografskih podataka između ključnih sustava za potrebe vođenja energetskog sustava. Sustav će omogućiti prihvat podataka iz GIS-a i SCADA-e, pohranu istih u CIM repozitorij, provjeru i usporedbu tih podataka te konačno izvoz podataka u sustave poput ADMS-a, NEPLAN-a i Pandapower aplikacija. Također će se omogućiti razmjena podataka o distribucijskoj mreži s firmama kojima su ti podaci od interesa, poput susjednih operatora prijenosnog i distribucijskog sustava, različitih regulatornih tijela i sl.
Također smo u procesu kreiranja Pandapower biblioteke koja će sadržavati detaljne informacije o kabelima i transformatorima koji se koriste u HEP ODS-u. Ova biblioteka će uključivati tehničke specifikacije, karakteristike i performanse različitih komponenti, što će omogućiti brže i preciznije kreiranje modela mreže. Korištenjem Pandapower biblioteke, inženjeri će moći jednostavno pristupiti potrebnim podacima i integrirati ih u svoje analize, čime će se značajno ubrzati proces modeliranja i optimizacije mreže. Biblioteka će također omogućiti standardizaciju podataka, što će olakšati razmjenu informacija i suradnju između različitih timova i odjela unutar HEP ODS-a.

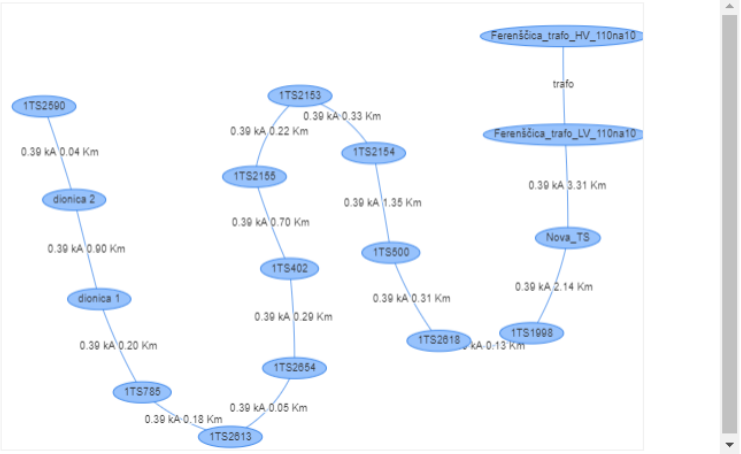
4. ANALIZA STVARNOG SLUČAJA I USPOREDBA S NEPLAN PRORAČUNOM

U sklopu projekta provedena je usporedba između NEPLAN-a i Pandapower proračuna za dio mreže s par novih elektrana. Cilj ove usporedbe bio je provjeriti točnost i pouzdanost kreiranog Pandapower programa u analizi elektroenergetskih mreža. Analiziran je stvarni slučaj, pri čemu su prikupljeni podaci o naponskim razinama, tipovima i dužinama kabela, teretima na promatranim točkama i drugim relevantnim parametrima. Proračuni su provedeni za isti dio mreže koristeći oba alata, a rezultati su uspoređeni kako bi se utvrdila njihova podudarnost. Analiza je pokazala da su rezultati dobiveni Pandapower alatom podudaran onima dobivenim NEPLAN-om, što potvrđuje da Pandapower može pružiti točne i pouzdane rezultate u analizi elektroenergetskih mreža. Ova usporedba je od velike važnosti jer potvrđuje da Pandapower može biti korišten kao alternativa komercijalnim alatima poput NEPLAN-a, pružajući inženjerima fleksibilnost i mogućnost korištenja tehnologija otvorenog koda. Detalji usporedbe i rezultati proračuna mogu se vidjeti na sljedećim slikama, koje prikazuju ključne parametre i njihove vrijednosti za analizirani dio mreže.



Slika 10.Primjer proračuna kroz NEPLAN

Podaci o distribucijskoj mreži



Točke u proračunu

name	vn_kv	type	zone	in_service
Ferenščica_trafo_HV_110na10	110.0	b	None	True
Ferenščica_trafo_LV_110na10	10.0	b	None	True
Nova_TS	10.0	b	None	True
1TS1998	10.0	b	None	True
1TS2618	10.0	b	None	True
1TS500	10.0	b	None	True
1TS2154	10.0	b	None	True
1TS2153	10.0	b	None	True
1TS2155	10.0	b	None	True
1TS402	10.0	b	None	True
1TS2654	10.0	b	None	True
1TS2613	10.0	b	None	True
1TS785	10.0	b	None	True
dionica 1	10.0	b	None	True
dionica 2	10.0	b	None	True
1TS2590	10.0	b	None	True

Zamjenska mreža - postavke

name	bus	vm_pu	va_degree	slack_weight	in_service
Kruta_mreža	0	1.05	0.0	1.0	True

Elektrane u mreži

name	bus	p_mw	vm_pu	sn_mva	min_q_mvar	max_q_mvar	scaling	slack	in_service	slack_weight	type	power_station_trafo
SOLARKA_1	9	0.5	1.01	NaN	NaN	NaN	1.0	False	True	0.0	None	NaN
SOLARKA_2	13	0.5	1.01	NaN	NaN	NaN	1.0	False	True	0.0	None	NaN
SOLARKA_3	15	0.1	1.01	NaN	NaN	NaN	1.0	False	True	0.0	None	NaN

Tereti u mreži

name	bus	p_mw	q_mvar	const_z_percent	const_i_percent	sn_mva	scaling	in_service	type
Teret1	1	28.850	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_Nova_TS	2	1.965	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS1998	3	0.258	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2618	4	0.133	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS500	5	0.587	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2154	6	0.320	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2153	7	0.320	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2155	8	0.294	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS402	9	0.100	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2654	10	0.100	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2613	11	0.204	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS785	12	0.133	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye
Teret_1TS2590	15	0.160	0.01	0.0	0.0	NaN	1.0	True	wye

Kabeli/vodovi

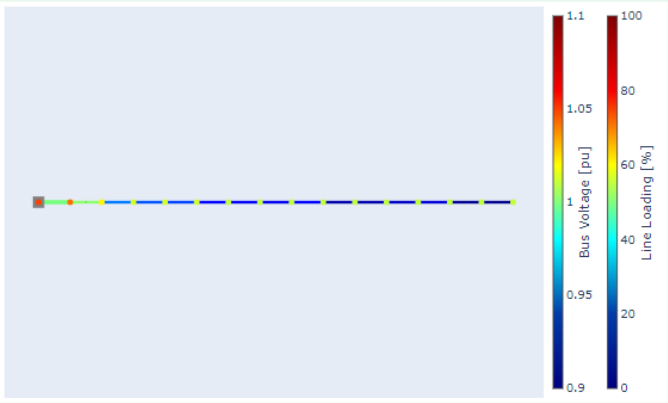
name	std_type	from_bus	to_bus	length_km	r_ohm_per_km	x_ohm_per_km	c_nf_per_km	g_us_per_km	max_i_ka	df	parallel	type	in_service
kabel 1 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	1	2	3.307	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 2 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	2	3	2.140	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 3 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	3	4	0.133	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 4 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	4	5	0.311	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 5 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	5	6	1.348	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 6 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	6	7	0.333	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 8 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	7	8	0.222	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 9 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	8	9	0.698	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 10 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	9	10	0.292	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 11 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	10	11	0.052	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 12 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	11	12	0.176	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 13 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	12	13	0.200	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True
kabel 14 - 20 kV, XHP 48-A 3X(1X 185)	None	13	14	0.900	0.164	0.110	280.255	0.0	0.390	1.0	1	None	True
kabel 15 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	None	14	15	0.040	0.164	0.129	188.000	0.0	0.385	1.0	1	None	True

Transformatori

name	hv_bus	lv_bus	sn_mva	vn_hv_kv	vn_lv_kv	vk_percent	vkr_percent	pfe_kw	i0_percent	shift_degree	tap_phase_shifter	parallel	df	in_service
prvi trafo	0	1	63.0	110.0	10.0	18.0	0.32	22.0	0.04	0.0	False	1	1.0	True

Slika 11. Ulazni podaci za Pandapower proračun

Proračun tokova snaga



Rezultat po točkama

	name	vm_pu	va_degree	p_mw	q_mvar
0	Ferenščica_trafo_HV_110na10	1.050000	0.000000	-32.476228	-3.504814
1	Ferenščica_trafo_LV_110na10	1.042647	-4.850130	28.850000	0.010000
2	Nova_TS	1.021238	-5.452883	1.965000	0.010000
3	1TS1998	1.014155	-5.552472	0.258000	0.010000
4	1TS2618	1.013773	-5.556278	0.133000	0.010000
5	1TS500	1.012945	-5.562457	0.587000	0.010000
6	1TS2154	1.010648	-5.532810	0.320000	0.010000
7	1TS2153	1.010256	-5.517903	0.320000	0.010000
8	1TS2155	1.010112	-5.502985	0.294000	0.010000
9	1TS402	1.009899	-5.441667	-0.400000	0.365603
10	1TS2654	1.009890	-5.434228	0.100000	0.010000
11	1TS2613	1.009890	-5.432569	0.204000	0.010000
12	1TS785	1.009920	-5.424504	0.133000	0.010000
13	dionica 1	1.010000	-5.413576	-0.500000	0.340719
14	dionica 2	1.010000	-5.424292	0.000000	0.000000
15	1TS2590	1.010000	-5.424779	0.060000	-0.084744

Tokovi snaga po vodovima

	name	p_from_mw	q_from_mvar	p_to_mw	q_to_mvar	pl_mw	ql_mvar	i_from_ka	i_to_ka	i_ka	vm_from_pu	va_from_degree	vm_to_pu	va_to_degree	loading_percent
0	kabel 1 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	3.553066	0.718817	-3.487431	-0.687991	0.065635	0.030826	0.200732	0.200960	0.200960	1.042647	-4.850130	1.021238	-5.452883	52.197318
1	kabel 2 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	1.522431	0.677991	-1.513054	-0.683706	0.009377	-0.005715	0.094219	0.094523	0.094523	1.021238	-5.452883	1.014156	-5.552472	24.551242
2	kabel 3 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	1.255054	0.673706	-1.254624	-0.674175	0.000430	-0.000469	0.081092	0.081114	0.081114	1.014156	-5.552472	1.013773	-5.556278	21.048394
3	kabel 4 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	1.121624	0.664175	-1.120780	-0.665398	0.000844	-0.001222	0.074236	0.074291	0.074291	1.013773	-5.556278	1.012945	-5.562457	19.296424
4	kabel 5 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	0.533780	0.655398	-0.532229	-0.662328	0.001551	-0.006931	0.048178	0.048539	0.048539	1.012945	-5.562457	1.010648	-5.532810	12.607542
5	kabel 6 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	0.212229	0.652328	-0.211976	-0.654138	0.000252	-0.001810	0.039188	0.039297	0.039297	1.010648	-5.532810	1.010256	-5.517903	10.207045
6	kabel 8 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	-0.108024	0.644138	0.108176	-0.645356	0.000152	-0.001218	0.037326	0.037401	0.037401	1.010256	-5.517903	1.010112	-5.502985	9.714815
7	kabel 9 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	-0.402176	0.635356	0.402813	-0.639061	0.000637	-0.003705	0.042979	0.043182	0.043182	1.010112	-5.502985	1.010000	-5.441667	11.216117
8	kabel 10 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	-0.002813	0.273458	0.002849	-0.275189	0.000035	-0.001731	0.015633	0.015733	0.015733	1.010000	-5.441667	1.009899	-5.434228	4.096539
9	kabel 11 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	-0.102849	0.265189	0.102856	-0.265497	0.000007	-0.000308	0.016261	0.016278	0.016278	1.009899	-5.434228	1.009890	-5.432569	4.227939
10	kabel 12 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	-0.306856	0.255497	0.306901	-0.256521	0.000045	-0.001025	0.022828	0.022867	0.022867	1.009890	-5.432569	1.009920	-5.424504	5.929301
11	kabel 13 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	-0.439901	0.246521	0.439983	-0.247662	0.000082	-0.001140	0.028828	0.028862	0.028862	1.009920	-5.424504	1.010000	-5.413576	7.496542
12	kabel 14 - 20 kV, XHP 48-A 3X(1X	0.060017	-0.093057	-0.060001	0.084985	0.000017	-0.008072	0.006330	0.005947	0.006330	1.010000	-5.413576	1.010000	-5.424292	1.823053
13	kabel 15 - 20 kV, XHE 49-A 3X(1X185)	0.060001	-0.084985	-0.060000	0.084744	0.000001	-0.000240	0.005947	0.005936	0.005947	1.010000	-5.424292	1.010000	-5.424779	1.544016

Tokovi snaga prema transformatorima

	name	p_hv_mw	q_hv_mvar	p_lv_mw	q_lv_mvar	pl_mw	ql_mvar	i_hv_ka	i_lv_ka	vm_hv_pu	va_hv_degree	vm_lv_pu	va_lv_degree	loading_percent
0	prvi trafo	32.476228	3.504814	-32.403066	-0.728817	0.073162	2.775996	0.163282	1.794725	1.050000	0.000000	1.042647	-4.850130	49.919595

Slika 12: Rezultati Pandapower proračuna

5. ZAKLJUČAK

Korištenje tehnologija otvorenog koda, poput PandaPower paketa, omogućuje simulaciju, analizu, optimizaciju i učinkovito upravljanje distribucijskim mrežama. Aplikacija je osmišljena da bude jednostavno dostupna svim inženjerima, kako za naobrazbu mladih inženjera, tako i za proračune koji postaju nužnost na dnevnoj razini. Razvoj ovakvih aplikacija ključan je za održavanje stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskih mreža, posebno u kontekstu integracije sve većeg broja elektrana koje postaju integralni dio distribucijskih mreža.

U budućnosti, digitalizacija i AI tehnologije će na temelju ovakvih aplikacija omogućiti nadogradnje i igrati sve veću ulogu u upravljanju i optimizaciji elektroenergetskih sustava, čime će se osigurati održivi razvoj i energetska neovisnost.

6. LITERATURA

[1] K .F. Ćavar, B. Gabrić, I. Periša, "MJERinfo – time series platform“, 4th International Conference on Smart Grid Metrology, Cavtat, Croatia, April 2023.

[2] https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/about.html