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





dr.sc. Deni Ćetković, univ.mag.ing.el. HEP–ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka deni.cetkovic@hep.hr; deni.cetkovic@gmail.com

prof.dr.sc. Vitomir Komen, dipl.ing.el. HEP–ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka vitomir.komen@gmail.com

# ALGORITAM ZA MODELIRANJE I ISTOVREMENU OPTIMIZACIJU DISTRIBUCIJSKE MREŽE NA VIŠE NAPONSKIH RAZINA

## SAŽETAK

Ovaj rad predstavlja algoritam za modeliranje i optimizaciju distribucijskih mreža na više naponskih razina, uključujući transformatore između razina, što je iskorak u odnosu na dosadašnje metode koje su se fokusirale na samo jednu naponsku razinu. Rad nudi rješenja za optimizaciju mreže s distribuiranim izvorima, kondenzatorskim baterijama, prigušnicama i drugim ključnim elementima distribucijskog sustava. Polazišna ideja temelji se na pretpostavci da razmatranje utjecaja ovih elemenata na tehničke značajke više naponskih razina može značajno poboljšati performanse mreže u odnosu na pristupe ograničene na jednu naponsku razinu. Predložena metoda omogućuje optimizaciju različitih funkcija cilja, a demonstrirana je na dva primjera: optimizacija pozicija i snaga distribuiranih izvora i kondenzatorskih baterija te optimizacija faktora snage, pozicija i snaga prigušnica za poboljšanje naponskog profila u mrežama 20 kV i 35 kV koje imaju problema s porastima napona. Osim specifičnih problema, rad je polazišna točka za druge primjene, kao što su optimizacija presjeka distribucijskih vodova, odabira transformatora i analize utjecaja integracije infrastrukture za punjenje električnih vozila na distribucijsku mrežu.

Ključne riječi: optimizacija, naponski profil, transformers, reactors, distributed generations

# ALGORITHM FOR MODELING AND SIMULTANEOUS OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION NETWORKS ACROSS MULTIPLE VOLTAGE LEVELS

## SUMMARY

This paper presents an algorithm for modeling and optimizing distribution networks across multiple voltage levels, including transformers between levels, which represents an advancement over previous methods that focused on a single voltage level. The paper offers solutions for optimizing networks with distributed generations, capacitor banks, reactors, and other components of the distribution system. The underlying idea is based on the assumption that considering the impact of these elements on the technical characteristics of multiple voltage levels can improve network performance compared to approaches limited to a single voltage level. The proposed method enables optimization of various objective functions and is demonstrated on two examples: optimization of positions and installed power of distributed generations and capacitor banks, and optimization of power factors, positions, and installed power of reactors to mitigate voltage improve voltage rise issues in 20 kV and 35 kV networks. The paper serves as a starting point for other applications, such as optimizing the cross-section of distribution lines, transformer selection, and analyzing the impact of integrating electric vehicle charging infrastructure into the distribution network.

Key words: optimization, voltage profile, regulator, optimal cross-section, cabling

## 1. UVOD

Ovaj rad istražuje razvoj algoritma za modeliranje i optimizaciju distribucijskih mreža na više naponskih razina, s posebnim naglaskom na integraciju transformatora između tih razina. Tradicionalni pristupi optimizaciji mreža uglavnom se fokusiraju na analizu samo jedne naponske razine, dok ovaj rad nudi rješenje koje omogućuje razmatranje cijelog distribucijskog sustava pri optimizaciji. Predloženi pristup optimizira raspored ključnih elemenata poput distribuiranih izvora, kondenzatorskih baterija, prigušnica i drugih, s ciljem smanjenja gubitaka radne snage i poboljšanja naponskog profila mreže.

Rad nudi dva primjera optimizacije, od kojih je prvi više znanstveni i teorijski. U prvom primjeru, fokus je na optimizaciji razmještaja distribuiranih izvora i kondenzatorskih baterija, s ciljem postizanja optimalnih pozicija i snaga tih elemenata u mreži. Ovaj pristup omogućuje detaljnu analizu tehničkih aspekata rasporeda distribuiranih izvora i baterija, čime se postižu značajna poboljšanja u smanjenju gubitaka radne snage i poboljšanju naponskog profila, uz uzimanje u obzir utjecaja različitih naponskih razina.

Drugi primjer ima praktičnu primjenu, fokusirajući se na optimizaciju pozicija i snaga prigušnica za poboljšanje naponskog profila u distribucijskim mrežama 20 kV i 35 kV, koje se suočavaju s problemima porasta napona. Ovaj primjer demonstrira kako predloženi algoritam može pomoći u rješavanju stvarnih izazova u distribucijskim mrežama, kao što su oscilacije napona, čime se poboljšavaju performanse mreže i smanjuju operativni problemi.

Predložena metoda omogućuje optimizaciju različitih funkcija cilja i pruža osnovu za daljnje primjene u optimizaciji na više naponskih razina distribucijske, primjerice kod odabira transformatora između naponkih razina, odabira presjeka distribucijskih vodova, kod analize utjecaja punjenje električnih vozila na mrežu.

#### 2. NOVI ALGORITAM ZA MODELIRANJE I ISTOVREMENU OPTIMIZACIJU DISTRIBUCIJSKE MREŽE NA VIŠE NAPONSKIH RAZINA

Temeljna ideja novog algoritma i metodologije je omogućiti integrirano optimizacijsko rješenje koje uzima u obzir međusobni utjecaj različitih naponskih razina distribucijske mreže. Za razliku od dosadašnjih pristupa, koji se uglavnom fokusiraju na pojedinačne naponske razine, nova metodologija pruža sveobuhvatni pregled tehničkih pokazatelja, uključujući gubitke energije, naponske devijacije i stabilnost mreže, kroz više razina sustava. Ovim pristupom postiže se povećana efikasnost, optimizacija raspoloživih resursa i bolje tehničko-ekonomsko balansiranje cijele distribucijske mreže. [1-2]

#### 2.1. Modeliranje elemenata distribucijskog sustava sa više naponskih razina

Za potrebe analize tokova snaga distribucijskog sustava s više naponskih razina korišten je proračun tokova snaga temeljen na backward-forward sweep metodi [3-5] uz pretpostavku simetričnog opterećenja, a proračuni i optimizacija rađeni su u Matlabu [6]. Ova metoda omogućuje iterativno rješavanje problema raspodjele snaga kroz mrežu, osiguravajući precizne rezultate i stabilnu konvergenciju. Proces započinje "korakom natrag", gdje se računa tok snaga kroz svaku dionicu mreže na temelju poznatih opterećenja u čvorovima. Nakon toga slijedi "korak naprijed", u kojem se izračunava napon u svakom čvoru mreže, uzimajući u obzir rezultate prethodnog koraka. Ovaj iteracijski pristup pruža mogućnost točnog modeliranja distribucijskog sustava, uključujući učinke distribuiranih izvora i kondenzatorskih baterija na tehničke pokazatelje sustava.



Slika 1. Nadomjesni model dionice voda

Nadomjesni model dionice voda prikazan je na Slici 1. U predmetnom nadomjesnom modelu  $P_{Pi}$ ,  $Q_{Pi}$  predstavljaju radnu i jalovu snagu uslijed potrošnje u čvoru *i*.  $P_{Dii}$ ,  $Q_{Dii}$  predstavljaju radnu i jalovu snagu proizvedenu u čvoru *i*.  $Q_{Ci}$  predstavlja kapacitivnu snagu poprečne grane voda *i*.  $R_{Vi}$ ,  $X_{Vi}$  predstavljaju serijski otpor i reaktanciju uzdužne grane voda.



Slika 2. Nadomjesni model dionice transformatora

Nadomjesni model dionice transformatora prikazan je na Slici 2. U predmetnom nadomjesnom modelu *Q<sub>KBi</sub>* predstavlja nazivnu jalovu snagu potencijalno priključene kondenzatorske baterije u čvoru *i. U*<sub>naz</sub> predstavlja nazivni napon distribucijske mreže. *P<sub>TRm,i</sub>*, *Q<sub>PRm,i</sub>* predstavljaju radnu i jalovu snagu koja se troši uslijed gubitaka u poprečnoj grani transformatora. R<sub>TRi</sub>, X<sub>TRi</sub> predstavljaju serijski otpor i reaktanciju uzdužne grane transformatora.

#### 2.2. Proračun distribucijskog sustava sa više naponskih razina

Za potrebe preciznog proračuna tokova snaga i modeliranja elemenata distribucijskog sustava, sve impedancije mrežnih elemenata nižih naponskih razina reduciraju se na višu (najvišu) naponsku razinu. Ovaj postupak osigurava konzistentnost proračuna i precizno modeliranje učinaka elemenata mreže na različitim naponskim razinama.

Serijski otpor i reaktancija transformatora preračunavaju se na višu naponsku razinu korištenjem sljedećih relacija:

$$R_{TRi} = P_{Cu} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} \tag{1}$$

$$Z_{TRi} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}$$
(2)

$$X_{TRi} = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}$$
(3)

U gorenavedenim relacijama  $S_n$  predstavlja nazivnu snagu transformatora,  $P_{Cu}$  tvornički podatak kojim se izražavaju gubici u bakru transformatora, a  $u_k$  predstavlja napon kratkog spoja transformatora.

Kod preračunavanja serijskog otpora i reaktancije niskonaponskog voda na srednjenaponsku razinu koriste se relacije:

$$R_{vod\_SN} = R_{vod\_NN} \cdot \left(\frac{U_{n\_SN}}{U_{n\_NN}}\right)^2 \tag{4}$$

$$X_{vod\_SN} = X_{vod\_NN} \cdot \left(\frac{U_{n\_SN}}{U_{n\_NN}}\right)^2$$
(5)

Na slikama 3. i 4. prikazani su modeli mreže sa jednom i dvije naponske razine koji će poslužiti za usporedbu rezultata. Na slici 3. prikazan je osnovni model distribucijske mreže koji sadrži 33 srednjenaponska čvora odnosno 32 srednjenaponska voda. Na slici 4. prikazan je prošireni model mreže koji srednjenaponske mreže sadrži i 32 transformatora, 32 NN voda odnosno dodatna 64 NN čvora. NN vodovi predstavljaju dionice NN mreže s najvećom serijskom impedancijom i potrošnjom, što omogućuje praćenje naponskih prilika u najkritičnijim čvorovima NN mreže. U ovome radu kod optimalnog razmještaja distribuiranih izvora i kondenzatorskih baterija 85% potrošnje modelirano je sekundarnim stranama transformatora. Preostalih 15% potrošnje modelirano je na krajevima NN izvoda.



Slika 3. Primjer osnovnog modela mreže koji uključuje samo SN čvorove i vodove



Slika 4. Primjer proširenog modela mreže koji uključuje SN i NN čvorove, transformatore, SN i NN vodove

#### 3. PRIMJENA NOVOG ALGORITAM NA PRIMJERU OPTIMALNOG RAZMJEŠTAJA KONDENZATORSKIH BATERIJA I DISTRIBUIRANIH IZVORA U MREŽI S DVIJE NAPONSKE RAZINE

U prvom primjeru algoritam je demonstiran na primjeru optimalnog razmještaja kondenzatorskih baterija i distribuiranih izvora u mreži s dvije naponske razine u svrhu smanjenja gubitaka radne snage i popravljanja naponskog profila.

Optimizacija se provodi u dva scenarija. U Scenariju I optimizacija se provodi za model mreže s nuliranim impedancijama transformatora i niskonaponskih vodova. Cilj je dobiti razmještaj distribuiranih izvora koji odgovara uobičajenim metodama, gdje se razmještaj provodi samo na srednjenaponskoj (SN) razini. Rezultati ovog scenarija služe za usporedbu s novom metodologijom. U Scenariju II optimizacija se provodi na distribucijskom modelu s točnim impedancijama svih elemenata (SN vodovi, SN/NN transformatori, NN vodovi). Već u procesu razmještaja računa se stvarni pad napona u svim čvorištima, uključujući niskonaponske, te se uzimaju u obzir gubici radne snage.

Slika 5. prikazuje optimalni razmještaj kondenzatorskih baterija za smanjenje gubitaka radne snage u oba scenarija.



Slika 5. Optimalni razmještaj kondenzatorskih baterija u oba scenarija

	Scenarij I		Scenarij II					
Čvor i	P <sub>max i</sub> (kW)	Q <sub>max_i</sub> (kVar)	Čvor i	P <sub>max_i</sub> (kW)	Q <sub>max_i</sub> (kVar)			
33	100	60	33	100	60			
34	90	40	34	<u>90</u>	<u>40</u>			
35	120	80	35	<u>120</u>	<u>80</u>			
36	60	30	36	60	30			
37	60	20	37	60	20			
38	200	100	38	<u>200</u>	<u>100</u>			
39	200	100	39	<u>200</u>	<u>100</u>			
44	60	35	44	60	35			
48	60	20	48	<u>60</u>	<u>20</u>			
51	90	40	51	<u>90</u>	<u>40</u>			
52	90	40	52	90	40			
53	90	40	53	90	40			
61	200	600	61	<u>200</u>	<u>600</u>			
62	150	70	62	150	70			
63	210	100	63	<u>210</u>	<u>100</u>			
64	60	40	64	<u>60</u>	<u>40</u>			

Tablica I. Rezultati za optimalni razmještaj kondenzatorskih baterija

~

.. .

Algoritam je u Scenariju II gdje se mreža modelira u proširenom obliku predložio 40% veću instaliranu snagu KB nego u Scenariju I.Može se zaključiti kako je povećanjem instaliranih snaga KB algoritam ciljano predložio povećanje vrijednosti kompenzacije za smanjenje tokova jalovih snaga kroz same transformatore te na taj način smanjio vrijednosti struja kroz transformatore a time i gubitke radne snage. Razmještaj kondenzatorskih baterija je približno sličan. U Scenariju I razmještaj je fokusiran samo na smanjenje tokova snaga u SN mreži Smanjiti i tokove snaga kroz transformatore. U Scenariju I kondenzatorske baterije se postavljaju u čvorove sa manjom maksimalnom potrošnjom (Tablica I.) vodeći računa samo o gubicima u SN mreži .U Scenariju II kondenzatorske se postavljaju u čvorove sa većom maksimalnom potrošnjom (Tablica I.) vodeći računa i o gubicima u samim transformatorima.

Ukupni gubici radne snage prije ugradnje DI-ja i KB-a iznosili su 2315,77 kW. U Scenariju I gubici su smanjeni na 732,89 kW (68,4 %), dok su u Scenariju II dodatno smanjeni na 619,07 kW (15,5 %).

Rezultati za razmještaj DI-a i KB-a sa ciljem popravljanja naponskog profila pokazali su da je ovakvim razmještajem u većini dijelova dana dodatno popravljen naponski profil. Iz naponskog profila mreže u 8.00 sati može se zaključiti da Scenarij II pokazuje značajno bolji napon u odnosu na Scenarij I, pri čemu je u Scenariju I najniži napon u jednom čvoru čak 0,91 (p.u.), dok je u Scenariju II najniži napon iznad 0,94 (p.u.). U Scenariju I, 16 čvorova ima napon ispod 0,96 (p.u.), dok je u Scenariju II samo dva čvora ispod te vrijednosti.



Slika 6. Napon svih čvorova mreže u 8.00 sati

### 4. PRIMJENA MODIFICIRANOG ALGORITMA NA DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI S DVIJE NAPONSKE RAZINE ZA RAZMJEŠTAJ PRIGUŠNICA ZA SMANJENJE PORASTA NAPONA

Predmetni pristup sagledavanju problema korištenjem proširenog modela mreže, koji uključuje transformatore i više naponskih razina, može se uz manje modifikacije primijeniti za rješavanje drugih stvarnih problema u distribucijskim mrežama [7].

U nastavku je demonstrirano korištenje modificiranog algoritma za razmještaj prigušnica uz kontrolu faktora snage distribuiranih izvora, s ciljem smanjenja porasta napona u stvarnoj distribucijskoj mreži (Gorski Kotar).

Problem prekapacitiranosti postojeće mreže, uz malu potrošnju i velike duljine podzemnih kabelskih vodova, posebno je izražen u slučaju reverznog toka od 3 MVAR samo u TS Gerovo.

Model distribucijskog sustava prikazan je na Slici 7. Trafostanica TS 110/35 kV Delnice napaja dvije transformatorske stanice: TS 35/20 kV Kupjak (putem podzemnog kabela) i TS 35/20 kV Gerovo (putem nadzemnog 35 kV voda). U TS Delnice instaliran je transformator s automatskim regulatorom za promjenu napona, koji održava sekundarni napon na 36,75 kV (1,05 p.u.), čime je i napon u distribucijskim mrežama postavljen na 21 kV (1,05 p.u.) kako bi se izbjeglo prenisko naponsko stanje u drugim dijelovima mreže. Ciljna vrijednost napona za ublažavanje problema s porastom napona postavljena je na 1,05 p.u. Model također uključuje 69 distribucijskih vodova, većinom kabelskih.



Slika 7. Nadomjesni model korišten za analizu smanjenja porasta napona na 2 naponske razine

Funkcija cilja za smanjenje porasta napona temeljena je na izračunavanju napona u svim čvorovima predmetne mreže u svim vremenskim intervalima. Korištena funkcija cilja za smanjenje varijacija napona može se matematički izraziti sljedećom relacijom:

$$Min f = \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=N\check{c}_{-1}}^{N\check{c}_{-2}} (V_n - V_i^t)^2$$
(1)

U gorenavedenoj relaciji, Nt označava broj diskretnih vremenskih intervala (24), Nč\_1 predstavlja prvi čvor distribucijske mreže, a Nč\_z zadnji čvor. Vn je nazivni napon distribucijske mreže, dok Vit označava napon i-tog čvora u trenutku t. S obzirom na to da je napon u distribucijskoj mreži inicijalno postavljen na 1,05 p.u., ovaj napon predstavlja ciljani napon Vn kojem funkcija cilja treba težiti prilikom ublažavanja prekomjernih porasta napona.

Simulacije su provedene korištenjem funkcije cilja za poboljšanje naponskog profila (1), razmatrajući tri različite situacije. Prvo su izvršeni proračuni tokova snage za početno stanje mreže bez prigušnica, s postojećim distribuiranim izvorom na jediničnom faktoru snage. U Slučaju 1, algoritam je predlagao faktor snage postojećeg izvora, bez spajanja novih prigušnica. U Slučaju 2, algoritam je predlagao lokacije i snage osam novih prigušnica, bez kontrole faktora snage izvora. U Slučaju 3, algoritam je predlagao pozicije i snage novih prigušnica, kao i satni faktor snage postojećeg izvora.

rabilda n. Rozalda za optimalni omječkaj r makolmalna onaga na kraja izvoda										
	Prigušnica	1	2	3	4	5	6	7	8	Ukupno
Slučaj 1	Snaga (kVAr)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pozicija (čvor)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Slučaj 2	Snaga (kVAr)	1000	900	800	100	200	300	800	1100	5200
	Pozicija (čvor)	49	40	3	37	25	57	49	24	-
Slučaj 3	Snaga (kVAr)	700	600	600	800	700	700	1000	1100	6200
	Pozicija (čvor)	48	30	42	49	4	48	47	18	-

Tablica II. Rezultati za optimalni smještaj i maksimalnu snagu na kraju izvoda

Simulacije za Slučaj 1 analiziraju smanjenje napona putem kontrole faktora snage postojećeg distribuiranog izvora u mreži napajanoj iz TS 35/20 kV Gerovo, koja pokriva čvorove od 45 do 71. Algoritam je za cijeli dan predložio maksimalni kapacitivni faktor snage od 0,95, zbog čega distribuirani izvor djeluje kao potrošač prekomjerne reaktivne snage. Ovaj način regulacije napona suočava se s ograničenjem ukupne reaktivne snage koju izvor može kompenzirati. S obzirom na to da izvor proizvodi 2,5 MW radne snage, s kapacitivnim faktorom snage od 0,95 može kompenzirati samo oko 0,84 MVAr reaktivne snage. Na Slici 8. prikazan je tok reaktivne snage kroz transformator u TS 35/20 kV Gerovo, gdje i dalje ostaje visok povratni tok, iako je djelomično smanjen.



Slika 8. Reaktivna snaga kroz transformator TS Gerovo (dionica 44)

U Slučaju 2, predložene su nove prigušnice bez izmjene faktora snage postojećeg izvora. Ukupna snaga instaliranih prigušnica iznosi 5,2 MVAr, što je značajno više od 0,84 MVAr kompenzirane reaktivne snage u Slučaju 1. Ovaj pristup doveo je do značajnog poboljšanja naponskog profila, uključujući i napon u TS Gerovo. Smanjenje toka reaktivne snage kroz transformator u TS 35/20 kV Gerovo, prikazano na Slici 8., omogućilo je značajno poboljšanje naponskog profila, prikazano na Slici 9.

U Slučaju 3, algoritam je predložio pozicije i snage novih prigušnica te satnu promjenu faktora snage postojećeg distribuiranog izvora. Iz Tablice II vidljivo je da je ukupno predlozeno 6200 kVAr prigušnica, uz induktivni faktor snage za distribuirani izvor. Ovaj pristup rezultirao je poboljšanjem naponskog profila, što je prikazano na Slici 9. Napon u dijelu mreže s postojećim izvorom sada je vrlo blizu ciljanih 1,05 p.u., krećući se od 1,045 do 1,055 p.u., što je poboljšanje u odnosu na Slučaj 2, gdje je napon bio oko 1,07 p.u.



Naponski profil za čvorove 1-71 u 3.00 sata prikazan je na Slici 10.

Slika 9. Napon na sekundarnoj strani transformatora u TS Gerovo (čvor 44)



Slika 11. Naponski profil dijela mreže u 3.00 sati

Sa Slike 11. vidljivo je kako predmetni algoritam predlaže rješenja koja daju optimalno rješenje za obje razine distribucijske mreže. Između čvorova 1 i 43 nalazi se 35 kV distribucijski vod na kojem je prije razmještaja prigušnica porast napona 3%. Za različite scenarije taj se porast napona smanjuje pa tako za slučaj 3 porast napona gotovo ni ne postoji. Napon je vrlo blizu ciljanih 1,05 p.u.

Između čvorova 43 i 44 nalazi se 35/20 kV transformator. Porast napona na transformatoru je prije razmještaja iznosi 4% (od 1.08 p.u do 1.12 p.u.) dok se razmještajem porast napona za različite scenarije značajno smanjuje.

Istovremeno se smanjuje i porast po dubini 20 kV mreže. Između čvorova 44 i 49 prije razmještaja prigušnica porast napona iznosi 1%. Nakon razmjetaja i taj se porast napona smanjuje.

Algoritam je predložio rješenje koje sagledava sanaciju na više naponskih razina te istovremeno smanjuje porast napona u 35 kV mreži, 20 kV mreži i na transformatoru koji je poveznica između naponskih razina.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad nudi novi pristup optimizaciji distribucijskih mreža na više naponskih razina, omogućujući bolje razumijevanje i integraciju različitih naponskih razina kroz algoritam koji uključuje transformatore. Predloženi pristup omogućava optimizaciju rasporeda elemenata poput distribuiranih izvora, kondenzatorskih baterija i prigušnica, s ciljem poboljšanja naponskog profila i smanjenja gubitaka radne snage.

Dva prikazana primjera optimizacije ukazuju na praktičnost i znanstvenu relevantnost ovog pristupa. U prvom primjeru, optimizacija razmještaja distribuiranih izvora i kondenzatorskih baterija pokazuje kako se tehnički aspekti mreže mogu poboljšati u smislu smanjenja gubitaka i naponskog profila. Drugi primjer se fokusira na optimizaciju prigušnica u distribucijskim mrežama 20 kV i 35 kV, čime se adresiraju problemi porasta napona, što je važan izazov u distribucijskim sustavima.

Predloženi algoritam i metodologija pružaju osnovu za daljnja istraživanja i primjene te nude širok spektar primjena kao što je primjerice odabir transformatora između naponskih razina, optimizacija presjeka distribucijskih vodova, te analize vezane uz integraciju infrastrukture za punjenje električnih vozila. Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju optimizacije distribucijskih mreža na više naponskih razina, te može poslužiti kao smjernica za buduće istraživanje i razvoj u ovom području.

## 5. LITERATURA

- [1] D. Ćetković and V. Komen, "Optimal Distributed Generation and Capacitor Bank Allocation and Sizing at Two Voltage Levels," in IEEE Systems Journal, vol. 17, no. 4, pp. 5831-5841, Dec. 2023, doi: 10.1109/JSYST.2023.3280673.
- [2] D. Ćetković (2024). "Optimalan razmještaj i snaga distribuiranih izvora i kondenzatorskih baterija na više naponskih razina distribucijske mreže" Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet Rijeka
- [3] Haque, M. H. A General Load Flow Method for Distribution System. // Electric Power System Research. 54, 1(2000), pp. 47-54.
- [4] Hamouda, S. A.; Zehar, K. Efficient Load Flow Method for Radial Distribution Feeders. // Journal of Applied Sciences. 6, 13(2006), pp. 2471-2478.
- [5] Prenc, R., Škrlec, D., Komen, V., "A novel load flow algorithm for radial distribution networks with dispersed generation", Tehnički vjesnik – Technical Gazette, Vol. 20, No., 6, December 2013., pp. 969-977.
- [6] 'Matlab Mathworks', https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67435-the-geneticalgorithm-ga-selection-crossover-mutation-elitism, accessed 15 August 2018
- [7] Ćetković, D.; Žutolija, J.; Komen, V. Voltage Rise Mitigation in Medium-Voltage Networks with Long Underground Cables and Low Power Demand. Energies 2024, 17, 3174. https://doi.org/10.3390/en17133174