Broj rada: R5-07
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-07_189

TECHNO-ECONOMIC OPTIMIZATION OF A WIND FARM CABLE NETWORK

TEHNO-EKONOMSKA OPTIMIZACIJA KABLOVSKE MREŽE VETROPARKA

Darko ŠOŠIĆ, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Srbija*
Tomislav RAJIĆ, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Integracija vetroelektrana u distributivne elektroenergetske mreže predstavlja jedan od ključnih izazova savremenog energetskog sektora, posebno u kontekstu rastućeg udela obnovljivih izvora energije i potrebe za ekonomično održivim razvojem infrastrukture. Adekvatno grupisanje vetrogeneratora po izvodima i njihovo efikasno rutiranje ima značajan uticaj kako na investicione troškove, tako i na dugoročne pogonske karakteristike sistema. U ovom radu razmatra se problem optimalnog povezivanja vetrogeneratora u okviru vetroparka sa unapred definisanim geografskim položajima proizvodnih jedinica. Analiza se zasniva na poznatim mogućim trasama polaganja kablova, uz pretpostavljene jedinične troškove kopanja rova i polaganja kablova, pri čemu je dozvoljeno da se u jednom rovu nalazi više energetskih kablova. Mreža vetroparka je koncipirana kao radijalna struktura, bez rezervnih pravaca za dopremanje električne energije, što je česta praksa kod ovakvih postrojenja zbog smanjenja investicionih troškova. Osnovni cilj rada je minimizacija ukupnih investicionih troškova u pogledu energetske mreže, uz optimalan raspored vetrogeneratora po izvodima i izbor trase kablovskih vodova. U tu svrhu razvijen je namenski softverski alat koji omogućava automatizovanu evaluaciju različitih topologija mreže i identifikaciju rešenja sa minimalnim ukupnim troškovima izgradnje. Optimizacija obuhvata kombinovani uticaj dužine trasa, zajedničkog korišćenja rovova i broja kablova po izvodu. Određivanje poprečnog preseka pojedinačnih kablova zasniva se na realnoj promeni proizvodnje vetroelektrana tokom godine, čime se omogućava određivanje vremenski zavisnih tokova snaga u mreži. Na osnovu dobijenih tokova snaga vrši se proračun godišnjih gubitaka energije za različite varijante preseka provodnika. Izbor konačnog preseka provodnika sprovodi se primenom ekonomskog kriterijuma minimalnih ukupnih troškova, koji obuhvata investicione troškove kablova, kao i troškove gubitaka energije tokom celokupnog eksploatacionog veka sistema. Na ovaj način obezbeđuje se usklađenost između zahteva za smanjenjem investicionih troškova i dugoročnih pogonskih karakteristika kablovske mreže.

Ključne reči: optimizacija, obnovljivi izvori energije, rutiranje kablova

ABSTRACT

The integration of wind power plants into distribution power systems represents one of the key challenges of the modern energy sector, particularly in the context of the increasing share of renewable energy sources and the need for economically sustainable infrastructure

* Darko Šošić sosic@etf.rs; Tomislav Rajić rajic@etf.rs

development. Adequate grouping of wind turbines into feeders and their efficient routing has a significant impact on both investment costs and the long-term operational performance of the system. This paper addresses the problem of optimal interconnection of wind turbines within a wind farm with predefined geographical locations of generation units. The analysis is based on known feasible cable routing options, with assumed unit costs for trench excavation and cable installation. The possibility of installing multiple power cables within a single trench is considered. The wind farm network is designed as a radial structure, without alternative power supply paths, which is a common practice for such installations due to reduced investment costs. The main objective of the study is the minimization of total investment costs of the electrical network, achieved through the optimal assignment of wind turbines to feeders and the selection of cable routes. For this purpose, a dedicated software tool has been developed, enabling automated evaluation of different network topologies and identification of solutions with minimum total construction costs. The optimization accounts for the combined effects of route lengths, shared trench usage, and the number of cables per feeder. The selection of cable conductor cross sections is based on realistic annual variations in wind power generation, allowing the determination of time dependent power flows within the network. Based on the calculated power flows, annual energy losses are evaluated for different conductor cross section options. The final conductor cross section is selected using an economic criterion of minimum total cost, which includes both cable investment costs and the cost of energy losses over the entire operational lifetime of the system. In this way, a balance is achieved between the reduction of investment costs and the long term operational performance of the cable network.

Keywords: optimization, renewable energy sources, cable routing

UVOD

Razvoj obnovljivih izvora energije predstavlja jedan od ključnih pravaca savremenog razvoja elektroenergetskih sistema. U tom kontekstu vetroelektrane imaju značajnu ulogu zbog velikog energetskog potencijala i sve šire primene u proizvodnji električne energije. Sa porastom instaliranih kapaciteta vetroparkova raste i značaj optimalnog projektovanja njihove interne elektroenergetske infrastrukture. Jedan od najvažnijih elemenata ove infrastrukture predstavlja kablovska mreža koja povezuje pojedinačne vetroturbine sa transformatorskom stanicom vetroparka. Projektovanje ove mreže predstavlja složen tehničko-ekonomski problem jer je potrebno istovremeno uzeti u obzir investicione troškove kablova, tehnička ograničenja sistema, kao i energetsku efikasnost tokom eksploatacije.

U literaturi je predloženo više pristupa za optimizaciju kablovske mreže vetroparkova. Jedan deo istraživanja zasniva se na metodama teorije grafova i heurističkim algoritmima koji imaju za cilj minimizaciju ukupne dužine kablova i troškova njihove instalacije. U [1] predložena je metodologija za optimizaciju rutiranja kablova u *offshore* vetroparkovima koja kombinuje algoritam kolonije mrava sa *Steiner* metodom radi dodatnog skraćivanja kablovskih ruta. Predloženi pristup omogućava minimizaciju dužine kablova i troškova povezivanja vetroturbina sa transformatorskom stanicom uz zadržavanje radijalne ili razgranate topologije mreže.

Pored heurističkih pristupa, u literaturi su prisutni i hibridni optimizacioni modeli. U [2] predstavljen je pristup optimizaciji rutiranja kablova u velikim *offshore* vetroparkovima koji kombinuje MILP model sa heurističkim algoritmima, pri čemu se u procesu optimizacije

uzimaju u obzir ograničenja kapaciteta kablova, zabrane ukrštanja, kao i prostorna ograničenja na lokaciji vetroparka.

U novijim istraživanjima sve češće se primenjuju metaheurističke optimizacione metode koje omogućavaju rešavanje složenih nelinearnih optimizacionih problema sa velikim brojem promenljivih. Tako je u [3] prikazan pristup u kojem se optimizuju raspored vetroturbina i kablovska mreža velike *offshore* vetroelektrane uz primenu algoritma kolonije mrava u kombinaciji sa formulacijom problema višestrukog trgovačkog putnika. Sličan pristup zajedničke optimizacije rasporeda turbina i kablovske infrastrukture prikazan je i u [4], gde je primenjen unapređeni algoritam optimizacije rojem čestica sa ciljem minimizacije nivelisanih troškova električne energije.

Pored optimizacije trase kablova, u literaturi se razmatraju i problemi topološke optimizacije električne mreže vetroparkova. U [5] prikazan je sekvencijalni pristup projektovanju kablovskog sistema *offshore* vetroparka koji uključuje određivanje optimalnih lokacija transformatorskih stanica, raspodelu vetroturbina po izvodima i formiranje interne kablovske mreže uz poštovanje tehničkih ograničenja sistema. Takođe, u pojedinim istraživanjima u proces projektovanja uključuju se i detaljni prostorni podaci. U [6] optimizacija rasporeda vetroturbina i planiranje elektroenergetske infrastrukture vrši se korišćenjem GIS alata, pri čemu se u obzir uzimaju realna prostorna i tehnička ograničenja lokacije.

Iako postoje brojni pristupi optimizaciji kablovske mreže vetroparkova, u praksi je često potrebno razviti modele koji omogućavaju istovremeno razmatranje energetskih i ekonomskih aspekata sistema. U ovom radu razmatra se problem tehno-ekonomske optimizacije kablovske mreže vetroparka uz istovremeno uvažavanje investicionih troškova kablova i gubitaka električne energije tokom eksploatacije. Za rešavanje optimizacionog problema primenjena je metoda diferencijalne evolucije, koja zbog svoje robusnosti i efikasnosti predstavlja pogodan alat za rešavanje optimizacionih problema sa većim brojem promenljivih.

Struktura rada organizovana je na sledeći način. U narednom poglavlju dat je matematički opis modela pojedinačnih komponenti sistema koji obuhvataju proizvodnju vetroelektrane, proračun gubitaka u kablovima i ekonomski model troškova. Nakon toga opisan je kompletan optimizacioni proces. U trećem delu rada prikazani su rezultati i njihova analiza.

1 METODA

U cilju sprovođenja sveobuhvatne tehno-ekonomske optimizacije kablovske mreže, neophodno je najpre definisati matematičke modele svih relevantnih segmenata sistema. Ukupni troškovi i tehnička ograničenja zavise od proizvodnje vetroelektrane, gubitaka u kablovima, izbora poprečnih preseka provodnika i ekonomskih parametara projekta. Zbog međusobne uslovljenosti ovih elemenata, svaki segment je modelovan zasebno, dok se njihova integracija ostvaruje kroz jedinstvenu kriterijumsku funkciju. U nastavku su detaljno opisani pojedinačni modeli koji čine osnovu optimizacionog postupka.

1.1 Proizvodnja vetroelektrane

Da bi se sprovela korektna analiza potrebno je poznavati brzine vetra na poziciji vetroparka sa što sitnijim vremenskim intervalom uzorkovanja. Zbog nedostataka merenja sa konkretne lokacije u svim analizama korišćeni su satni meteorološki podaci preuzeti sa platforme *Meteostat* [7]. U ovom radu razmatran je Južnobanatski okrug u okolini Vršca, pri čemu su

korišćeni podaci za kompletnu 2025. godinu. Pošto podaci potiču sa meteorološke stanice, opravdano je pretpostaviti da su merenja vršena na visini od 10 m.

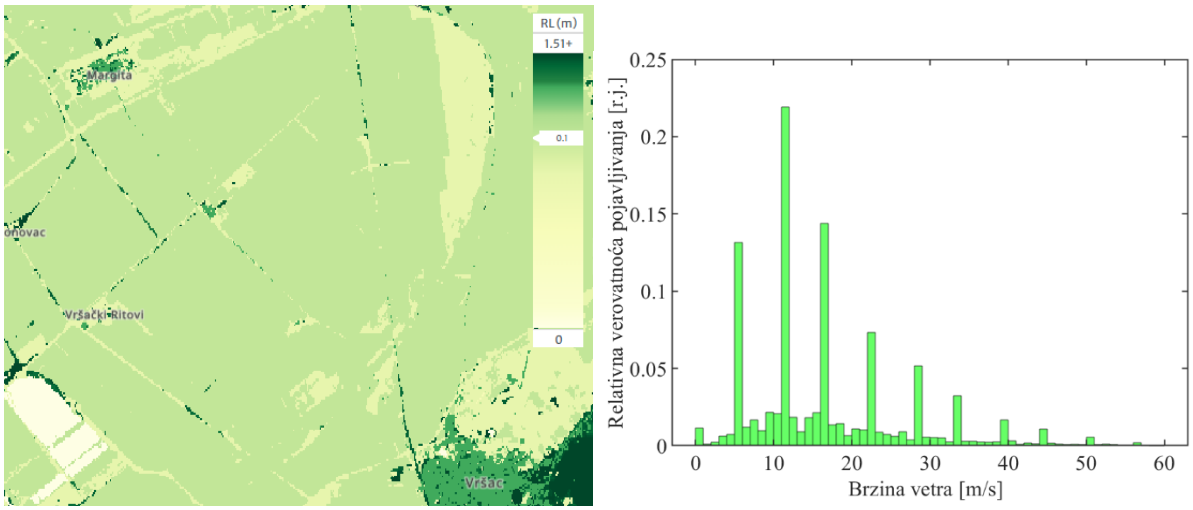
Da bi se izvršio proračun snage vetrogeneratora potrebno je proceniti brzinu vetra na visini osovine. U svim sprovedenim analizama usvojena je pretpostavka da se osovina nalazi na 130 m od zemlje. Za procenu promene brzine vetra sa visinom u praksi se najčešće koriste logaritamski i stepeni model. Logaritamski model, koji je izabran u ovom radu, dat je sledećim izrazom:

$$v_2 = v_1 \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}, \tag{1}$$

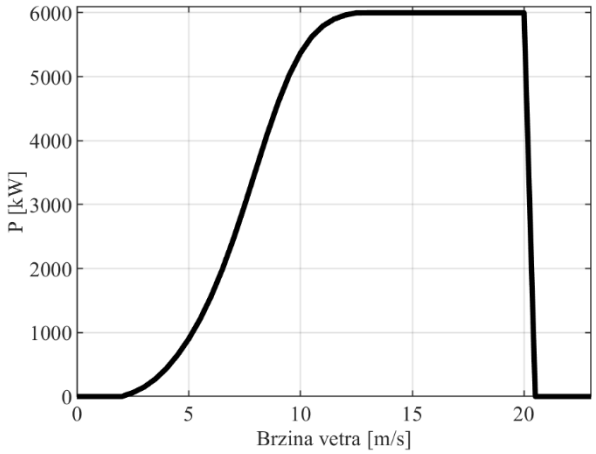
gde su v_1 i v_2 izmerena i procenjena brzina vetra, z_1 i z_2 visina na kojoj je vršeno merenje i visina osovine, dok je sa z_0 označena dužinu hrapavosti. Na Slici 1a prikazana je promena dužine hrapavosti na razmatranoj lokaciji. Može se uočiti da je ona približno konstantna i iznosi 0,1. Na Slici 1b prikazana je relativna verovatnoća pojavljivanja brzine vetra na razmatranoj lokaciji.

Na posmatranoj lokaciji je planirana izgradnja 25 vetrogeneratora. Poznato je da je željena snaga celog vetroparka oko 150 MW, tako da je za ovu analizu odabran Enercon E175/6000. Na Slici 2 prikazana je zavisnost izlazne snage odabranog agregata od brzine vetra, koja je preuzeta sa web sajta [8].

Na osnovu satnih podataka proizvodnje, ukupna proizvedena energija se dobija sabiranjem svih podataka. Usvojena je pretpostavka da su vetrogeneratori dovoljno udaljeni i da se efekat zavetrine može zanemariti. Zbog toga je dovoljno izračunati proizvodnju jednog generatora i zatim je skalirati brojem razmatranih generatora. Treba napomenuti da ova pretpostavka ne predstavlja ograničenje modela, jer je u slučaju potreba moguće na jednostavan način uvažiti različitu proizvodnju pojedinačnih generatora.



Slika 1 – a) Prikaz dužine hrapavosti u razmatranom regionu, b) Verovatnoća pojavljivanja određene brzine vetra



Slika 2 – Zavisnost izlazne snage od brzine vetra

1.2 Proračun gubitaka u kablu

Prilikom određivanja gubitaka električne energije često se koristi procena zbog nedostatka kompletnog dijagrama opterećenja. U ovom radu posmatra se samo deo mreže od generatora do transformatorske stanice, a pošto u tom delu nema dodatne potrošnje moguće je izračunati tačnu vrednost gubitaka. Kako je moguće izračunati proizvodnju u svakom vremenskom intervalu, moguće je odrediti i tok snage kroz svaki segment mreže.

Otpornost provodnika zavisi od temperature materijala i može se izračunati pomoću sledećeg izraza:

$$\theta_i = \theta_0 + \left(I_i / I_{td}\right)^2 \left(\theta_{\max} - \theta_0\right), \tag{2}$$

gde je θ_0 temperatura referentne zemlje za koju je usvojena vrednost od 20 ºC, $\theta_{\max}$ predstavlja maksimalnu dozvoljenu temperaturu provodnika i za izabrani tip iznosi 90 ºC, dok je sa I_{td} je označena trajno dozvoljena struja kabla. Vrednosti trajno dozvoljenih struja za različite poprečne preseke su date u Tabeli I. Sada se promena otpora svakog segmenta može uvažiti primenom sledećeg izraza:

$$R_i = R_{20}\left(1 + \alpha\left(\theta_i - 20\right)\right), \tag{3}$$

gde je R_{20} aktivna otpornost provodnika na 20 ºC, a α predstavlja temperaturni koeficijent promene otpora. Vrednost ovog koeficijenta za provodnike napravljene od aluminijuma iznosi 0,00403. Na osnovu izračunatih vrednosti otpora segmenata mogu se odrediti gubici aktivne snage primenom sledećeg izraza:

$$P_{\gamma i,j} = R_{i,j}\left(P_{i,j} / U_n\right)^2, \tag{4}$$

gde $P_{\gamma i,j}$ predstavlja gubitke aktivne snage na segmentu i u trenutku j, dok $P_{i,j}$ predstavlja tok aktivne snage kroz segmentu i u trenutku j. Kako je pretpostavljeno da svi generatori proizvode istu količinu snage, tok snage kroz segment se može izračunati pomoću izraza

$$P_{i,j} = n \cdot P_{gj}, \tag{5}$$

gde *n* predstavlja broj generatora koji se nalaze nizvodno od posmatranog segmenta. Ukupni gubici energije u kablovima dobijaju se sabiranjem gubitaka po svim segmentima i vremenskim intervalima. U analizama je usvojena pretpostavka da je napon konstantan i iznosi 35 kV.

Tabela I – Karakteristike kablova

s [mm^2]	r_{20} [Ω/km]	l [mH/km]	I_{td} [A]	Cena [EUR/m]
50	0.6410	0.474	184	25
70	0.4430	0.451	224	28
95	0.3200	0.427	267	30
120	0.2530	0.413	301	33
150	0.2060	0.399	334	36
185	0.1640	0.387	375	40
240	0.1250	0.372	429	46
300	0.1000	0.357	475	53
400	0.0778	0.344	528	64
500	0.0605	0.332	587	75

1.3 Izbor poprečnog preseka kabla

Radi bezbednog korišćenja kablova moraju se ispoštovati kriterijumi definisani odgovarajućim pravilnicima [9]. Na osnovu ovog pravilnika trajno dozvoljena struja određuje se primenom sledećeg izraza:

$$I_{td} = k_\theta \cdot k_{bk} \cdot k_{dk} \cdot k_\rho \cdot I_n, \tag{6}$$

gde je k_θ koeficijent promene dozvoljenog strujnog opterećenja koji zavisi od temperature tla na dubini polaganja kabla (u ovom radu usvojeno je $k_\theta = 1$), dok k_{bk} predstavlja koeficijent dozvoljenog opterećenja u zavisnosti od broja kablova u rovu i određuje se na osnovu Tabele II. U Tabeli II sa *a* je označena udaljenost centara susednih kablova u rovu. Za koeficijent dozvoljenog opterećenja u zavisnosti od dubine polaganja (k_{dk}) i koeficijent promene opterećenja u zavisnosti od specifične otpornosti tla (k_ρ) usvojene su jedinične vrednosti. Nominalna struja provodnika određuje se na sličan način kao tok snage po segmentu primenom izraza (5). U postupku odabira poprečnog preseka polazi se od pretpostavke da se kablovi nalaze na najmanjoj dozvoljenoj međusobnoj udaljenosti. Ako se zbog nekog od korekcionih faktora pokaže da je određeni presek neodgovarajući, prelazi se na prvi veći presek. Ovaj postupak se nastavlja sve dok se ne pronađe odgovarajući poprečni presek ili dok se ne dostigne najveći razmatrani presek. U slučaju da je struja kroz razmatranu deonicu i dalje veća od dozvoljene, postupak izbora preseka ponavlja se uz koeficijente koji odgovaraju većem rastojanju između kablova.

Tabela II – Korekcioni faktor zbog većeg broja provodnika u rovu

Broj kablova u rovu	2	3	4	5	6	7	8	9
a = 0,2 m	0,81	0,71	0,65	0,61	0,59	0,56	0,53	0,52
a = 0,4 m	0,85	0,77	0,72	0,69	0,66	0,64	0,63	0,62
a = 0,6 m	0,88	0,81	0,77	0,74	0,72	0,71	0,70	0,69
a = 0,8 m	0,90	0,84	0,81	0,79	0,77	0,76	0,75	0,75

Pored opisanog postupka izbora rastojanja i poprečnog preseka provodnika potrebno je izvršiti i proveru na struju kratkog spoja. Kada se koriste vakuumski ili SF_6 prekidači dozvoljeno

trajanje struje kratkog spoja je t_k = 0,15 s [9]. Za aluminijumske provodnike najmanji presek se određuje pomoću sledećeg izraza:

$$s_{\min} = 6,9 \frac{\text{mm}^2}{\text{kA}\sqrt{s}} \cdot 1,56 \cdot 12,5 \text{ kA} \cdot \sqrt{0,15 \text{ s}} = 52,11 \text{ mm}^2 . \quad (7)$$

Iz ovog uslova proizilazi da najmanji poprečni presek na segmentima kablovske mreže mora iznositi najmanje 70 mm^2.

Na osnovu opisanog postupka moguće je za svaki segment kablovske mreže odrediti minimalni dozvoljeni poprečni presek koji zadovoljava sva tehnička ograničenja.

1.4 Ekonomski model

U postupku optimizacije neophodno je istovremeno uzeti u obzir tehnička ograničenja i ekonomske kriterijume. Dok tehnička ograničenja definišu minimalne dozvoljene vrednosti poprečnog preseka provodnika i način polaganja kablova, ekonomski model omogućava poređenje različitih konfiguracija kablovske mreže sa stanovišta ukupnih troškova tokom životnog veka postrojenja. Na taj način se obezbeđuje da odabrano rešenje ne bude samo tehnički izvodljivo, već i ekonomski opravdano.

Ukupni troškovi sistema sastoje se od investicionih troškova izgradnje kablovske mreže, troškova eksploatacije i održavanja, kao i troškova gubitaka električne energije koji nastaju tokom rada vetroparka. S obzirom na to da se pojedini troškovi javljaju u različitim vremenskim trenucima, neophodno je izvršiti njihovu aktualizaciju kako bi se mogli direktno upoređivati.

Odabir poprečnog preseka provodnika nema preveliki uticaj na fiksne troškove kao što su iskopavanje rovova i polaganje kablova. Sa druge strane, promenljivi troškovi direktno zavise od izbora poprečnog preseka. Jedna od najvažnijih stavki koja se razmatra je smanjivanje gubitaka aktivne snage/energije u posmatranom delu mreže. Kada bi se posmatrali samo ovi troškovi onda bi bilo opravdano na svim segmentima odabrati najveći mogući poprečni presek pošto su tada gubici najmanji. Međutim, potrebno je ispitati ekonomsku opravdanost takve odluke.

Da bi se uporedila različita rešenja potrebno je pristupiti aktualizaciji troškova. U ovom radu je usvojeno da se svi troškovi svode na prvu godinu. Sada se za ukupne troškove može pisati:

$$C_{\Sigma} = C_{inv} + \left(C_{O\&M} + C_{gub}\right) \frac{(1-p_n)^n - 1}{(1-p_n)^n \, p_n} . \quad (8)$$

gde su C_{inv} investicioni troškovi, $C_{O\&M}$ suma radnih troškova i troškova održavanja, C_{gub} je cena gubitaka električne energije, p_n je stopa aktualizacije, a n je životni vek elektrane. U investicione troškove ulaze troškovi kopanja i zatrpavanja rova, polaganja i cena odabranih kablova. Za cenu kopanja usvojena je vrednost od 90 EUR/m^3, cena polaganja zavisi od terena i kreće se u opsegu od 5 do 10 EUR/m (u ovom radu odabrana je vrednost od 7 EUR/m). Cena kablova se dobija množenjem ukupne dužine deonica sa odgovarajućim cenama koje su date u Tabeli I. Prema [9] ukupnu dužinu treba povećati za 2% pošto je potrebno da se kabl polaže krivudavo. Što se tiče zapremine rova, za odabrani napon od 35 kV neophodno je da dubina bude 1,1 m. U slučaju da se u rovu nalazi samo jedan kabl usvojena je pretpostavka da se sa svake strane provodnika ostavlja 10 cm, a ako ima više kablova potrebno je uvažiti i dodatno

rastojanje *a*, čiji je izbor ranije opisan. Za životni vek je usvojena vrednost od 25 godina. Za stopu aktuelizacije u našoj zemlji je opravdano uzeti vrednost iz opsega od 6 do 10%, dok je za cenu električne energije može uzeti neka vrednost iz opsega od 40 do 100 EUR/MWh.

1.5 Diferencijalna evolucija

Ovo je populaciona metaheuristička metoda za globalnu optimizaciju, zasnovana na jednostavnim operatorima mutacije, ukrštanja i selekcije. Posebno je efikasna za nelinearne, nediferencijabilne i multimodalne probleme, gde klasične gradijentne metode nisu primenljive. Originalno je razvijena za optimizaciju sa kontinualnim promenljivim, ali se uz odgovarajuće prilagođavanje (npr. zaokruživanje, diskretizacija ili specijalne kodne šeme) može uspešno primeniti i na probleme sa celobrojnim promenljivim.

Mutacija se zasniva na generisanju novog vektora dodavanjem ponderisane razlike dva slučajno izabrane jedinke na treću jedinku iz populacije. Na taj način se adaptivno koristi informacija o rastojanju između postojećih rešenja, čime se omogućava efikasno pretraživanje prostora rešenja i očuvanje diverziteta populacije. Faktor skaliranja kontroliše intenzitet pretrage.

Ukrštanje kombinuje komponente mutiranog vektora i trenutne jedinke, pri čemu se sa određenom verovatnoćom preuzimaju elementi iz mutiranog vektora. Ovaj korak omogućava balans između istraživanja i eksploatacije, jer se deo postojećeg rešenja zadržava, dok se deo zamenjuje novim informacijama.

Selekcija je deterministička i zasniva se na principu turnira. Između roditeljske i probne jedinke zadržava se ona sa boljom vrednošću funkcije cilja. Ovakav elitistički pristup obezbeđuje poboljšavanje populacije kroz iteracije i stabilnu konvergenciju ka optimalnom ili suboptimalnom rešenju.

1.6 Algoritam

U ovom radu je pretpostavljeno da će se 25 vetrogeneratora raspoređivati na pet izvoda, pri čemu će svaki izvod sadržati pet generatora. Da bi optimizacioni algoritam pravilno započeo rad, potrebno je formirati izvodljivu početnu populaciju. Pod tim se podrazumeva da jedan vektor upravljačkih promenljivih sadrži ukupno 25 različitih brojeva, pri čemu prvih pet predstavlja generatore na prvom izvodu, narednih pet na drugom izvodu itd. Radi smanjenja računarskog vremena proračuna potrebno je presložiti svaku petorku tako da dužina kabla koji povezuje sve generatore bude minimalna. U tu svrhu kreirana je posebna rutina koja najpre određuje generator sa najmanjim rastojanjem do transformatorske stanice i postavlja ga na prvu poziciju u petorki. Na narednu poziciju postavlja se generator koji je najbliži prethodno odabranom iz posmatrane petorke, i tako redom dok se ne presloži cela petorka.

Proces određivanja rute nezavisan je od procesa određivanja optimalnog poprečnog preseka, čime se celokupan postupak optimizacije donekle pojednostavljuje. Kada su poznate rute svih izvoda, potrebno je utvrditi koliko će se kablova nalaziti u svakom rovu. Na osnovu ovog podatka moguće je odrediti najmanji dozvoljeni poprečni presek kabla korišćenjem Tabele II. Nakon toga je za svaki izvod potrebno generisati tabelu koja ima onoliko kolona koliko ima deonica (u razmatranom slučaju pet) i onoliko redova koliko ima razmatranih poprečnih preseka. Svaka ćelija popunjava se primenom izraza (8). Nakon toga se u svakoj koloni bira minimalna vrednost, koja ujedno definiše poprečni presek kabla razmatranog segmenta. Na ovaj način za svaku deonicu izvoda bira se ekonomski najpovoljniji poprečni presek koji zadovoljava sva tehnička ograničenja. U narednom koraku računa se kriterijumska funkcija

razmatranog vektora, koja predstavlja sumu troškova kopanja i zatrpavanja rova, polaganja i nabavne cene kablova.

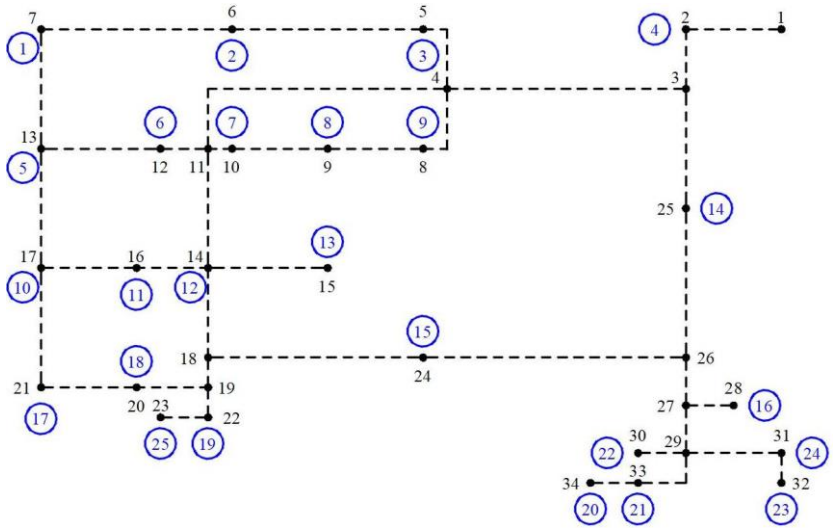
Sličan postupak sprovodi se i u svakoj generaciji optimizacionog algoritma uz neophodnu ispravku kreiranih vektora. Naime, operatori metaheurističkog algoritma mogu generisati rešenja koja u početku nisu izvodljiva. Mogu se pojaviti duplirani brojevi, dok će neki nedostajati. Upravo ti nedostajući brojevi i oni koji se ponavljaju predstavljaju kandidate koje je u procesu korekcije potrebno pravilno rasporediti. Korekciju je potrebno sprovesti tako da se dobiju što kraće dužine svih izvoda. Nakon ove korekcije postupak određivanja poprečnog preseka i troškova identičan je postupku koji se primenjuje pri kreiranju početne populacije.

U realnim problemima optimalno rešenje nije poznato pa je potrebno usvojiti kriterijum konvergencije. Zbog toga je u ovom radu usvojen kriterijum prema kome se procedura zaustavlja ukoliko u deset uzastopnih iteracija ne dođe do promene najboljeg rešenja. U nastavku je dat prikaz celog algoritma.

1. Generisati početnu populaciju vektora upravljačkih promenljivih.
2. Za svaki vektor formirati rute izvoda.
3. Odrediti broj kablova u rovu i minimalno dozvoljeni poprečni presek kabla.
4. Za svaku deonicu izračunati troškove za sve razmatrane poprečne preseke.
5. Izabrati minimalne troškove po deonicama i odrediti odgovarajuće poprečne preseke kablova.
6. Izračunati vrednost kriterijumske funkcije za svako rešenje u populaciji.
7. Primeniti operatore diferencijalne evolucije (mutacija, ukrštanje i selekcija) i izvršiti korekciju neizvodljivih rešenja.
8. Ponavljati postupak dok se ne ispuni kriterijum konvergencije.

2 REZULTATI

Za razliku od *offshore* vetroparkova, kod kojih postoje problemi oko ukrštanja kablova na morskom dnu i zbog čega je potrebno obezbediti udaljenost između njih, kod vetroparkova na kopnu dozvoljeno je polaganje više kablova jedan pored drugog. Sa druge strane, trase po kojima je moguće kopati kablovske rovove ograničene su blizinom seoskih puteva i granicama njiva, odnosno parcela. Na Slici 3 prikazane su moguće trase za unapred odabrane pozicije vetrogeneratora razmatranog vetroparka. Crnim brojevima su obeleženi čvorovi u mreži trasa, dok su uokvirenim plavim brojevima označene pozicije vetrogeneratora. Udaljenost između pojedinih čvorova je data u Tabeli III. U sprovedenim analizama usvojena je pretpostavka da se generatori povezuju radijalno, bez grananja. Drugim rečima, na svakom izvodu generatori su povezani sekvencijalno, tako da između transformatorske stanice i poslednjeg generatora postoji jedinstvena kablovska trasa bez račvanja.



Slika 3 – Moguće trase i pozicije vetrogeneratora

Tabela III – Dužine trasa

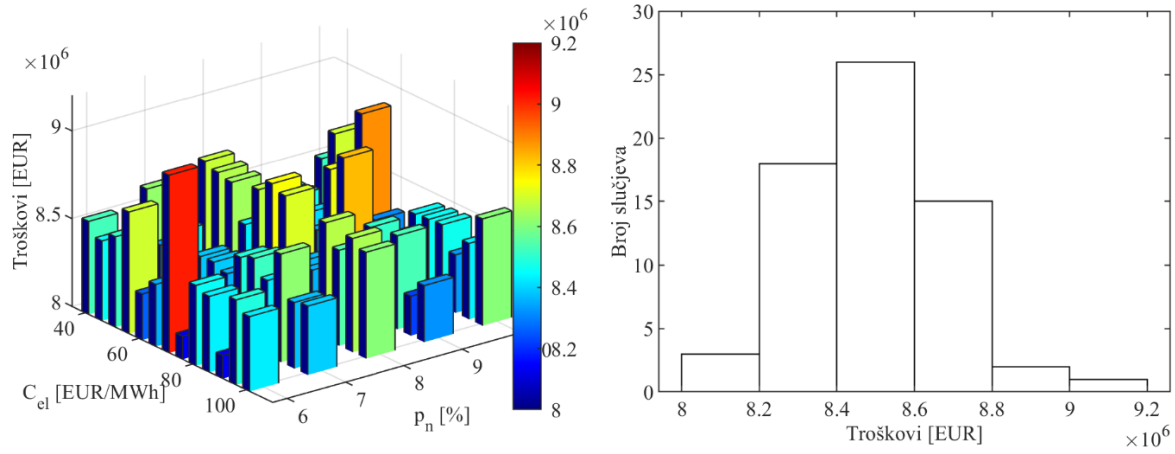
Čvor 1	Čvor 2	Dužina [km]	VG	Čvor 1	Čvor 2	Dužina [km]	VG
1	2	5,95		17	21	1,24	
2	3	0,67		14	18	0,84	
3	4	1,9	2	18	19	0,4	
4	5	0,8	3	19	20	0,73	18
5	6	1,46	2	20	21	0,89	17
6	7	1,44	1	19	22	0,45	19
4	8	0,8	9	22	23	1,86	25
8	9	0,65	8	18	24	1,64	15
9	10	0,78	7	3	25	1,55	14
10	11	0,22		25	26	2,19	
4	11	2,7		24	26	1,5	
11	12	0,51	6	26	27	0,34	
12	13	0,97	5	27	28	0,7	16
7	13	1,6		27	29	0,51	
11	14	1,5	12	29	30	0,63	22
14	15	0,6	13	29	31	1,12	24
14	16	0,813	11	31	32	1,25	23
16	17	0,707	10	29	33	0,93	21
13	17	1,5		33	34	0,77	20

U cilju ispitivanja uticaja ekonomskih parametara na optimalno rešenje sprovedena je analiza osetljivosti za različite kombinacije stope aktualizacije i cene električne energije. Ukupno je analizirano 65 scenarija koji odgovaraju različitim parovima vrednosti parametara p_n i C_{el}. Na slici 4 prikazana je analiza osetljivosti ukupnih investicionih troškova u odnosu na stopu aktualizacije i cenu električne energije. Svaki stub predstavlja troškove najboljeg rešenja za posmatrane uslove. Može se uočiti da se troškovi menjaju u opsegu od 8 do 9,2 10^6 EUR. Potrebno je napomenuti da je za svaki par (p_n, C_{el}) pokrenut samo jedan optimizacioni proračun. Upravo zbog toga dolazi do neočekivanih skokova u visini troškova na priloženom dijagramu.

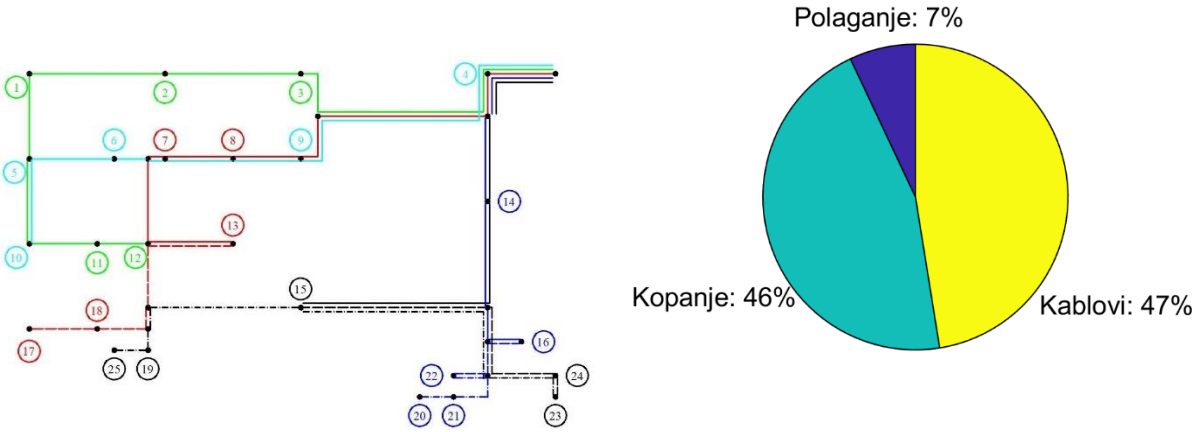
Iako broj skupljih rešenja predstavlja samo mali procenat svih razmatranih slučajeva, u ovakvim situacijama bi bilo opravdano ponoviti optimizacioni postupak sa zadatim parametrima. Na taj način bi se smanjila mogućnost zaglavljivanja algoritma u lokalnom optimumu.

Na Slici 5a prikazan je raspored polaganja za najskuplji scenario kod koga je stopa aktualizacije iznosila 6%, a cena električne energije je bila 70 EUR/MWh. U ovom rešenju postoji nekoliko rovova u kojima se polažu kablovi koji pripadaju istom izvodu. Zbog toga je punom linijom obeležen izvod od transformatorske stanice do prvog paralelnog vođenja kabla istog izvoda. Pomoću isprekidane linije obeležen je deo izvoda do ponovnog paralelnog vođenja kablova istog izvoda, dok je pomoću „crta tačka crta“ linije obeležen poslednji segment izvoda. U prikazanom slučaju postoje dva izvoda, tamno plavi i crni, kod kojih se javila potreba za ovakvim prikazom. Na Slici 5b prikazana je raspodela ukupnih troškova po komponentama. U ovom scenariju troškovi kopanja rovova i nabavke kablova gotovo su izjednačeni. Ovakva raspodela troškova ukazuje na to da se prilikom projektovanja kablovske mreže ne može optimizovati samo jedna komponenta troškova. Smanjenje dužine kablovskih trasa direktno utiče na troškove kopanja i polaganja, dok izbor poprečnog preseka dominantno utiče na cenu kablova i gubitke električne energije. Zbog toga je istovremeno razmatranje tehničkih i ekonomskih aspekata neophodno za dobijanje optimalnog rešenja.

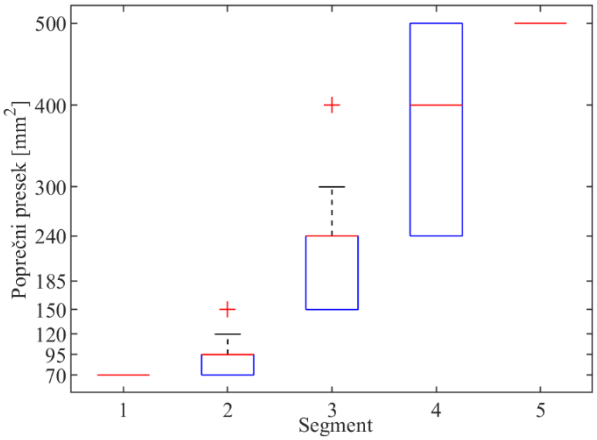
Višestruki prolaz kabla istog izvoda u jednom rovu je posledica usvojenog pravila odabira najkraćih ruta i radijalne strukture. Dodatno smanjivanje troškova bi se verovatno postiglo kada bi se koristila razgranata, antenska, koncepcija energetske mreže što će biti razmatrano u narednom periodu.



Slika 4 – a) Analiza osetljivosti, b) Histogram troškova



Slika 5 – a) Primer rutiranja izvoda, b) Raspodela troškova



Slika 6 – Poprečni preseci kabla po segmentima

Na Slici 6 prikazana je promena poprečnih preseka kablova po segmentima izvoda. Poređenje je izvršeno za svih 65 razmatranih slučajeva. Na dva segmenta očigledno postoji jedinstveno rešenje. Za prvi segment, onaj po kome protiče snaga samo jednog generatora, opravdano je odabrati poprečni presek od 70 mm^2, dok je za poslednji preko koga protiče snaga od svih pet generatora potrebno odabrati poprečni presek od 500 mm^2. Na drugom segmentu u većini slučajeva će biti dovoljno odabrati 95 mm^2, pri čemu su se medijan skupa i maksimalna vrednost poklopile. U manje od 10% slučajeva na ovom segmentu potrebno je odabrati poprečni presek od 120 mm^2, dok se ekstremna vrednost od 150 mm^2 slobodno može zanemariti Slični zaključci se mogu izvesti i za preostala dva segmenta. Na trećem segmentu opravdano je u većini slučajeva usvojiti 240 mm^2, dok je za četvrti segment potrebno izvršiti proveru između tri vrednosti od kojih se najviše pojavljuje 400 mm^2.

U nekim budućim analizama pored mogućnosti antenske koncepcije mreže razmatraće se i ekonomska opravdanost upotrebe bakarnih provodnika.

3 ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak tehno-ekonomske optimizacije kablovske mreže vetroparka primenom metode diferencijalne evolucije. Razvijen je matematički model koji integriše proračun proizvodnje vetroelektrane, proračun gubitaka u kablovima, izbor poprečnog preseka

provodnika u skladu sa tehničkim ograničenjima, kao i ekonomski model zasnovan na aktualizaciji troškova tokom životnog veka elektrane.

Posebna pažnja posvećena je formiranju izvodljivih rešenja i proceduri popravke generisanih jedinki kako bi se obezbedilo da svaki vektor upravljačkih promenljivih predstavlja validnu konfiguraciju kablovske mreže. Na taj način omogućena je efikasna primena metode diferencijalne evolucije na problem koji uključuje diskretne upravljačke promenljive i topološka ograničenja.

Sprovedene analize pokazale su da ukupni troškovi kablovske mreže zavise od ekonomskih parametara, prvenstveno od stope aktualizacije i cene električne energije. Takođe je pokazano da se za pojedine segmente mreže može unapred predvideti optimalni ili dominantni poprečni presek kabla, dok za druge segmente izbor zavisi od konkretne konfiguracije mreže i ekonomskih parametara.

LITERATURA

[1] Bogdan Constantin Neagu, Gheorghe Georgescu: „Wind Farm Cable Route Optimization Using a Simple Approach“, 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 16-18 October 2014
[2] Martina Fischetti; David Pisinger: „Inter-array cable routing optimization for big wind parks with obstacles“, 2016 European Control Conference (ECC), Aalborg, Denmark, 29 June 2016 - 01 July 2016
[3] Ramu Srikakulapu, Vinatha U: „Combined Approach Based on ACO with MTSP for Optimal Internal Electrical System Design of Large Offshore Wind Farm“, 2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), Kerala, India , 18-20 January 2018
[4] Dongqin Zhang, Zhenqing Liu, Yang Liang, Chao Li, Jize Zhang, Gang Hu: „ Bilevel optimization of non-uniform offshore wind farm layout and cable routing for the refined LCOE using an enhanced PSO“, Ocean Engineering, Vol. 299, 1 May 2024,
[5] Rizk M. Rizk-Allah, Václav Snášel, Xiaofei Deng, Dongran Song, Aboul Ella Hassanien: „ Topological optimization of offshore wind farm cable routing system based on an improved equilibrium optimization algorithm“, Ocean Engineering, Vol. 313, No 2, 1 December 2024
[6] Sunwoo Kim, Seongwhan Kang, Jay H. Lee: „Optimal design of offshore wind power farm in high resolution using geographical information system“, Computers & Chemical Engineering, Vol 174, June 2023, 108253
[7] https://meteostat.net/en/
[8] https://www.thewindpower.net/
[9] Tehnička preporuka br. 3 „Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskog pribora u elektrodistributivnim mrežama 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV“, V izdanje, novembar 2012.