

# OPTIMALNA STRUKTURA INTERNE KABLOVSKE MREŽE VETROELEKTRANE

A. ĐORĐEVIĆ, D. MILOŠEVIĆ, Global Substation Solutions, Srbija  
Ž. ĐURIŠIĆ, Elektrotehnički fakultet Beograd, Srbija

## KRATAK SADRŽAJ

Priključenje vetroelektrana na elektroenergetski sistem se obično vrši preko srednjenaponskih kablovskih vodova. Priključno mesto vetroelektrana na distributivnu ili prenosnu mrežu je obično udaljeno nekoliko kilometara, pa su gubici u kablovskoj mreži značajni. S obzirom da su specifični troškovi ovih gubitaka određeni subvencionisanim cenama proizvodnje iz vetroelektrana, to je korišćenje većih preseka kablova u odnosu na tehničke zahteve često opravdano za vlasnika vetroelektrane. Aktualizacijom investicionih troškova kablova i troškova disipirane (neisporučene) energije, određen je ekonomski presek kabla pri kojem su troškovi proizvodnje minimalni. Analiziran je uticaj broja agregata po fideru na izbor optimalnog preseka kabla. Na konkretnom primeru vetroelektrane u Banatu pokazano je da se optimalnim izborom preseka kabla i optimizacijom broja vetroagregata po jednom fideru mogu značajno smanjiti operativni troškovi i vreme povratka investicionih ulaganja, odnosno povećati profit.

**Ključne reči:** vetroelektrana, interna kablovska mreža, optimalni presek

## SUMMARY

Connection of the wind farm to an electric power system is usually done through medium voltage cables. The wind farm connection point to the distribution or transmission network is usually a few kilometers away, so the losses in the cable network are significant. Specific costs of these losses are determined by subsidized prices of energy from wind farms, so use of the larger cable cross sections compared to technical requirements is often justified for the owner of the wind farm. By actualizing the investment costs of cables and the costs of discipated (undelivered) energy, an economic cross-section of the cable is determined, for which production costs are minimal. The influence of the number of turbines on the feeder on the selection of the optimal cross-section of the cable was analyzed. On the concrete example of the wind farm in Banat, it is shown that by optimizing of the cable cross-sections and number of turbines on the single feeder, it is possible to reduce significantly operating costs and the return time of investments, i.e. increase profit.

**Key words:** wind farm, internal cable network, optimal cross-section

Ana Đorđević, Milana Tankosica 1, Beograd, [ana.djordjevic@gss.eu.com](mailto:ana.djordjevic@gss.eu.com)

## UVOD

Zbog nelinearne veze između gubitaka i opterećenja kabla potrebno je poznavati vremenski dijagram proizvodnje vetroelektrane. Vetroelektrana je intermitentan izvor energije, pa je opterećenje kablova intemitentno i diktirano vetrom. Dakle, za proračun gubitaka potrebno je poznavati statistiku vetra i krivu snage vetroagregata. Osim toga, promenljivi gubici snage uzrokuju promenljivu temperaturu provodnika kabla, što uzrokuje promenu njegove otpornosti. Za procenu godišnjih gubitaka energije korišćen je matematički model koji je obuhvatio proračun snage proizvodnje vetroelektrane, kao i dinamički model za proračun temperature provodnika, odnosno njegove otpornosti. Za procenu investicionih troškova kabla i troškova disipirane (neprodate) energije korišćen je ekonomski model kabla. Primena razvijenih modela demonstrirana je na konkretnom primeru vetroelektrane u Banatu.

## METODOLOGIJA ZA PRORAČUN OPTIMALNOG PRESEKA KABLA

Da bi se izvršio proračun optimalnog preseka kabla potrebno je poznavati vremenski dijagram proizvodnje vetroagregata koji su priključeni na analiziranu kablovsku mrežu. Na osnovu proračunatog histograma snage vetroagregata koji su priključeni na određenu deonicu kabla, mogu se proračunati odgovarajuće podužne srednje satne snage gubitaka  $P_{loss\ i}$  na analiziranoj trasi kablovskog voda za svaku vrednost brzine vetra  $V_i$  u opsegu od  $V_{cut\ in}$  do  $V_{cut\ out}$  prema sledećoj relaciji:

$$P_{loss\ i} = R \left( \frac{S_{WT\ i}}{U_n} \right)^2 \quad (1)$$

gde je  $R$  podužna omska otpornost faznog provodnika za određeni poprečni presek kabla,  $U_n$  je nominalni međufazni napon, a  $S_{WT\ i}$  prividna snaga opterećenja analiziranog segmenta kabla. Za potrebe ovih analiza može se pretpostaviti da je faktor snage vetroelektrane jednak 1, odnosno  $S_{WT\ i} = P_{WT\ i}$ , takođe se mogu zanemariti i generisanja reaktivne snage kablova.

Da bi se što tačnije procenili godišnji gubici energije na kablju potrebno je uvažiti promenu otpornosti provodnika kabla sa promenom opterećenja. Otpornost provodnika po jedinici dužine, pri naizmeničnoj struji i temperaturi  $\Theta$ , se određuje prema sledećoj formuli [1]:

$$R(\Theta) = R' (1 + y_s + y_p) = R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} (\Theta - \Theta_0)) \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (2)$$

Gde je  $R'$  d.c. otpornost provodnika pri maksimalnoj temperaturi izolacije ( $\Omega/m$ );  $R_0$  jed.c. otpornost provodnika pri temperaturi 20 °C ( $\Omega/m$ ), što je standardni podatak od proizvođača kabla;  $\alpha_{20}$  je temperaturni koeficijent na 20 °C ( $\alpha_{20} = 0,00403^\circ C^{-1}$  za aluminijum);  $y_s$  je faktor skin efekta;  $y_p$  je faktor blizine.

Kada je prečnik provodnika relativno veliki u odnosu na rastojanje između susednih provodnika, efekat blizine može biti zanemaren [2]. Skin efekat postaje značajan na višim frekvencijama (>60 Hz) i većim preseccima provodnika. Stoga se ova dva faktora mogu zanemariti za potrebe daljih analiza.

Kod vetroelektrane, promena opterećenja je vrlo izražena i diktirana vetrom, tako da se sa promenom vetra menja i temperatura provodnika, odnosno njegova otpornost shodno relaciji (2). Procena temperature provodnika  $\Theta$  pri nekom opterećenju se može vršiti na osnovu aproksimativne relacije (3), koja proističe iz jednačina termodinamičke ravnoteže provodnika u homogenoj sredini:

$$\Theta = \Theta_0 + \left( \frac{I}{I_{td}} \right)^2 (\Theta_{max} - \Theta_0) \quad (3)$$

Gde je  $\Theta_0$  referentna temperatura zemlje, a  $\Theta_{max}$  je maksimalna dozvoljena temperatura kabla, koja za XHE49-A tip kabla iznosi 90°C.

Na osnovu proračunatog histograma trajanja snage proizvodnje vetroturbin i relacija (1-3), može se proračunati odgovarajući histogram snage gubitaka na jediničnoj dužini odabranog tipa kabla.

Ukupna energija gubitaka po jedinici dužine kabla u toku godine se može izračunati prema sledećoj relaciji:

$$W_g = \int_0^{T_{year}} P_{loss}(t) \cdot dt \approx \frac{1}{U_n^2} \sum_i P_{WT\ i}^2 \cdot R \cdot T(V_i) \quad (4)$$

U prethodnoj analizi pretpostavljeno je da je napon u tački priključenja stalan i nominalan.

Sušтина proračuna ekonomskog preseka kabla je da se odredi presek kabla koji će obezbediti minimalan udeo troškova kabla u ukupnim troškovima proizvodnje električne energije u vetroelektrani. S obzirom da se investicioni troškovi izdvajaju na početku, odnosno u fazi izgradnje vetroelektrane, a troškovi gubitaka se generišu tokom eksploatacije u svakoj godini, potrebno je izvršiti aktuelizaciju troškova odnosno koristiti dinamički ekonomski model.

Aktuelizacijom se svi troškovi svode na kraj perioda eksploatacije vetroelektrane prema usvojenoj kamatnoj stopi ( $p_n$ ). Pri proračunu se pretpostavlja da su troškovi eksploatacije kabla iz godine u godinu jednaki. Ovi troškovi zapravo predstavljaju ekvivalentnu novčanu vrednost godišnjih gubitaka energije na kablovskomvodu i mogu se izraziti u novčanim jedinicama po jedinici dužine analiziranog segmenta kabla (Euro/km).

Investicioni i eksploatacioni troškovi imaju svoj fiksni i varijabilni deo. Fiksni deo investicionih troškova ( $K_0$ ) se odnosi na građevinske radove (iskopavanje i postavljanje kablova), dok se varijabilni deo ( $K$ ) odnosi na cenu koštanja kabla, koja direktno zavisi od veličine poprečnog preseka provodnika. Operativni troškovi imaju fiksni deo ( $E_0$ ) i varijabilni deo ( $E$ ). Fiksni deo se odnosi na troškove gubitaka u dielektriku kabla (koji praktično ne zavisi od porećenog preseka kabla), dok varijabilni deo zavisi od veličine poprečnog preseka kabla, odnosno gubitka. Ukupni specifični svedeni troškovi,  $T_{ukupno}$  (Euro/m), se mogu predstaviti formalno matematički kao zbir fiksnih svedenih troškova ( $T_0$ ) i varijabilnih svedenih troškova ( $T$ ), prema sledećoj relaciji:

$$T_{ukupno} = (K + K_0)(1 + p_n)^n + (E_0 + E) \frac{(1 + p_n)^n - 1}{p_n} = T_0 + T \quad (5)$$

Gde su  $T$  (Euro/m) specifični varijabilni troškovi svedeni na kraj perioda eksploatacije vetroelektrane od  $n$  godina:

$$T = K(1 + p_n)^n + E \frac{(1 + p_n)^n - 1}{p_n} = A + B, \quad (6)$$

a  $T_0$  specifični fiksni troškovi svedeni na kraj perioda eksploatacije vetroelektrane od  $n$  godina:

$$T_0 = K_0(1 + p_n)^n + E_0 \frac{(1 + p_n)^n - 1}{p_n}. \quad (7)$$

Kao ciljna funkcija za optimizaciju preseka kabla u ovoj analizi korišćen je varijabilni udeo troškova, definisanih relacijom (6). Sa povećanjem preseka provodnika kabla povećava se komponenta investicionih troškova ( $A$ ), ali se smanjuje komponenta eksploatacionih troškova ( $B$ ), pošto se smanjuju gubici energije u kابلu. Optimalna vrednost preseka kabla je ona pri kojoj je varijabilna komponenta ukupnih svedenih troškova (6) minimalna.

Relacija (6) se koristi tako što se u njoj uvrste parametri za svaki standardni presek kabla  $S \geq S_{min}$ , gde je  $S_{min}$  minimalni presek kabla koji zadovoljava tehničke kriterijume (trajno dozvoljenu struju, toplotni impuls i dozvoljeni pad napona) i izvrši proračun godišnjih gubitaka energije po jedinici dužine, shodno relaciji (4). Optimalan presek kabla  $S_{opt}$  je onaj presek za koji relacija (6) daje minimalnu vrednost specifičnih ukupnih troškova.

## MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN GODIŠNJEG HISTOGRAMA PROIZVODNJE VETROTURBINE

Da bi se izvršio proračun godišnje snage proizvodnje nekog vetroagregata potrebno je poznavati statistiku brzine vetra na ciljnoj lokaciji i krivu snage odabrane vetroturbine. U vetroenergetici se najčešće učestanost javljanja brzina vetra opisuje dvoparametarskom Weibullovom funkcijom raspodele verovatnoće koja je definisana relacijom [3]:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \cdot e^{-\left( \frac{V}{c} \right)^k} \quad (8)$$

Gde je:

- $k$  - faktor oblika,
- $c$  - faktor skaliranja.

Funkcija gustine raspodele verovatnoće definiše verovatnoću javljanja vetra određene brzine. Površina između krive  $f(V)$  i apscisne ose je jednaka 1, jer je verovatnoća da će vetar duvati u opsegu od 0 do  $\infty$  jednaka 1. Postoji više numeričkih metoda za određivanje parametara Weibullove raspodele verovatnoće na osnovu seta raspoloživih mernih podataka o brzini vetra. Parametri Weibullove funkcije raspodele verovatnoće određeni su metodom maksimuma verovatnoće (*maximum likelihood method*) [4].

Na osnovu poznatih parametara Weibullove raspodele verovatnoće i krive snage analiziranog vetroagregata može se izvršiti procena snage proizvodnje vetroelektrane. Estimacija električne snage proizvodnje vetroagregata  $P_i$  pri brzini vetra  $V_i$  je vršena prema sledećoj relaciji:

$$P_i(V_i) = f(V_i) \cdot P_{powercurve}(V_i) \quad (9)$$

Gde je:

$f(V_i)$  - Verovatnoća pojavljivanja brzine vetra  $V_i$ , dobijena pomoću relacije (1).

$P_{powercurve}(V_i)$  - Standardna kriva snage vetroturbine za gustinu vazduha na visini osovine vetroturbine.

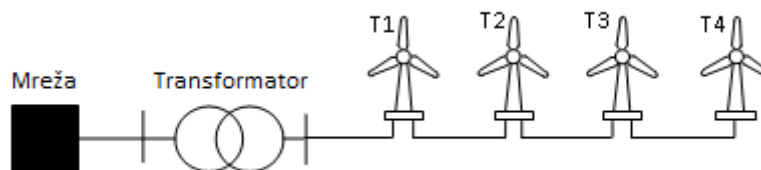
Ukupna energija proizvodnje u toku godine ( $T=8760$  h) se dobija množenjem izlazne snage turbine pri određenoj brzini vetra sa brojem sati u godini kada vetar duva određenom brzinom ( $T_i$ ) i sumiranjem dobijenih rezultata:

$$W_{god} = \sum E_i = \sum_{V_i} T_i \cdot P_{powercurve}(V_i) \approx T \cdot \sum_{V_i} P_i(V_i) \cdot \Delta V \quad (10)$$

Gde je  $\Delta V$  korak sa kojim se vrši integracija, obično se prihvatiljva tačnost estimacije godišnje proizvodnje može dobiti sa korakom  $\Delta V = 1\text{m/s}$ .

## PRIMER PRORAČUNA

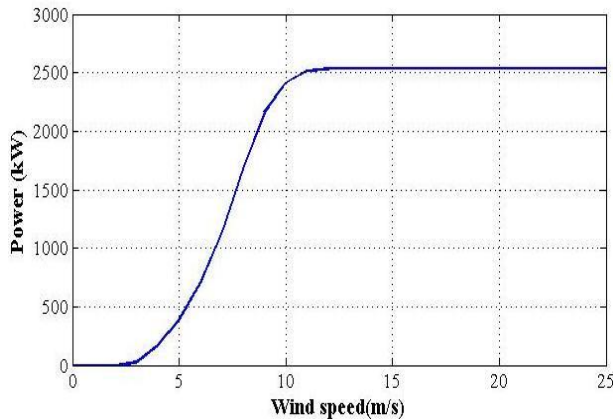
Danas se praktično isključivo koristi radijalna topologija sredjenaponske mreže, koja je ilustrovana na Sl.1.



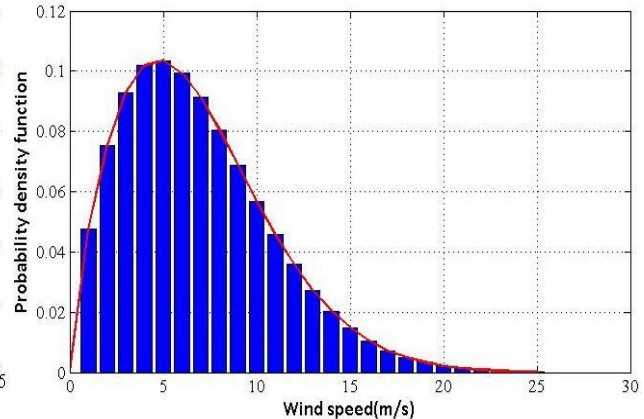
Sl. 1. Radijalna topologija sredjenaponske mreže

U cilju testiranja razvijenih modela, analiziran je slučaj priključenja vetroelektrane na lokaciji Bavanište u južnom Banatu. Radi se o veoma ravnom i homogenom terenu. Detaljan opis terena i potencijala vetra je dat u radu [5]. Analize su izvršene uz pretpostavku da je vetroelektrana realizovana sa četiri vetroagregata tipa GE 2.5 MW, prečnika turbine  $D=120$  m i visine stuba  $H=120$  m. Pretpostavljeno je da se vetroelektrana priključuje na mrežu kablovskim vodom 33 kV. Analiza se odnosi na slučaj da je faktor snage vetroagregata jednak 1 i da je napon u tački priključenja stalan i nominalan. Zadatak je da se odredi optimalan presek fidera, za različit broj vetroagregata koji opterećuju fider.

Na slici 2. prikazana je standardna kriva snage odabranog test vetroagregata. Za procenu parametara Weibullove raspodele verovatnoće korišćeni su desetominutni merni podaci o brzini vetra mereni na ciljnoj lokaciji na visinama 40 m i 60 m u periodu od 1.8.2008.-1.8.2009.godine. Ekstrapolacija mernih podataka na visinu osovine vetroturbine  $H=120$  m vršena je prema logaritamskom zakonu [6]. Grafički prikaz proračunate Weibullove statističke funkcije dat je na slici 3. Proračunate vrednosti koeficijenata Weibull-ove raspodele koje su korišćene u proračunima  $suk=1.76$  i  $c=7.67$  m/s. Na osnovu modela opisanog u radu izvršen je proračun histograma snage proizvodnje vetroagregata i ukupne godišnje energije proizvodnje.

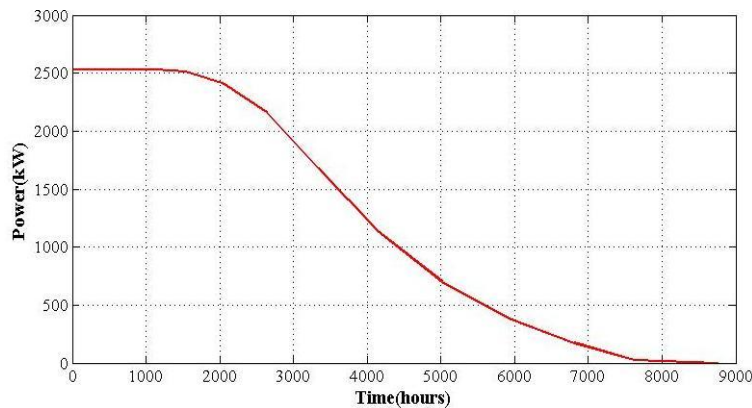


Sl.2. Kriva snage vetroturbine GE 2.5MW, D=120m



Sl.3. Weibullova funkcija gustine raspodele verovatnoće javljanja brzina vetra na lokaciji Bavanište, za  $H=120$ m

Na slici 4. prikazan je histogram trajanja proizvodnje prosečnog vetroagregata u VE Bavaniste. Vreme trajanja rada elektrane sa nominalnom snagom je oko 1100 sati godišnje. Vreme u kojem je elektrana isključena zbog slabog vetra je oko 1150 sati godišnje. Procenjena godišnja energija proizvodnje test vetroagregata na odabranoj mikrolokaciji je 9.6 GWh/god.

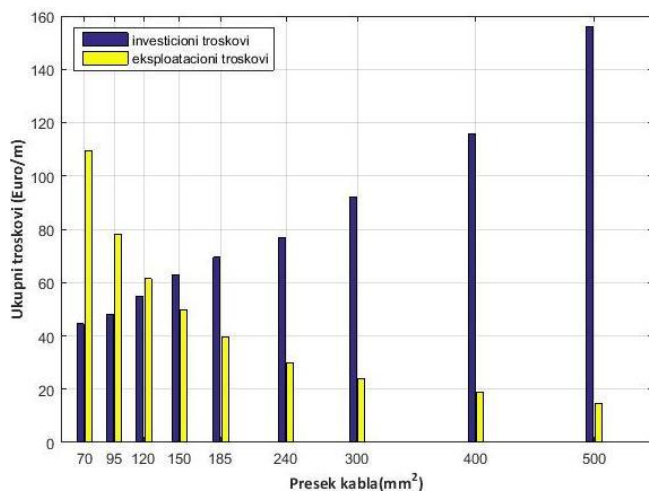


Sl.4. Uređeni histogram trajanja snage proizvodnje prosečnog vetroagregata u VE Bavanište

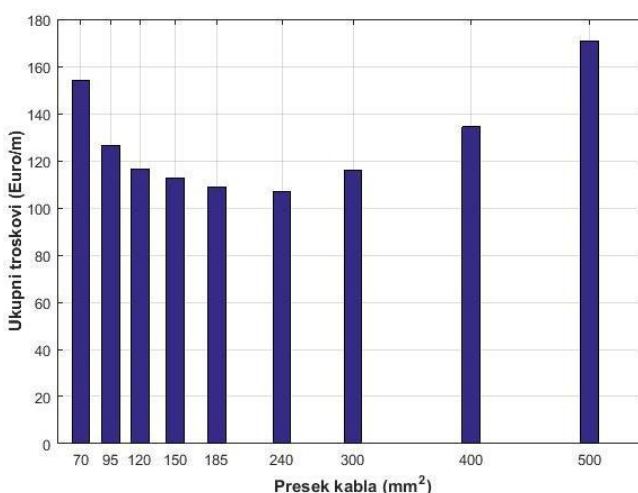
Za potrebe analize gubitaka, kablovski vod je modelovan prema modelu kabla opisanom u radu. Pri proračunu temperature provodnika usvojeno je da su specifična termička otpornost i difuznost zemljišta konstantne. Takođe, temperatura referentne zemlje je pretpostavljeno da je stalna i iznosi  $20^{\circ}\text{C}$ . Za različite preseke kabla računata je promena temperature i otpornosti provodnika sa promenom opterećenja kabla. Na osnovu relacija (9) i (10) izvršen je proračun snage gubitaka i ukupne godišnje energije gubitaka za svaki presek.

Tabela 1: Korišćeni podaci o kablovima tipa XHE 49-A

Tip i presek kablova	Un=33 kV		
	Cena (Euro/m)	Itd (A)	R (Ω/km)
XHE 49-A 3x1x70mm <sup>2</sup>	11.37	219	0.433
XHE 49-A 3x1x95mm <sup>2</sup>	12.48	262	0.320
XHE 49-A 3x1x120mm <sup>2</sup>	14.95	298	0.250
XHE 49-A 3x1x150mm <sup>2</sup>	17.09	333	0.202
XHE 49-A 3x1x185mm <sup>2</sup>	18.41	377	0.164
XHE 49-A 3x1x240mm <sup>2</sup>	20.85	436	0.126
XHE 49-A 3x1x300mm <sup>2</sup>	25.01	493	0.101
XHE 49-A 3x1x400mm <sup>2</sup>	31.42	559	0.076
XHE 49-A 3x1x500mm <sup>2</sup>	42.34	632	0.061



Sl. 5. Komponente aktuelizovanih specifičnih troškova po jedinici dužine kablova (Euro/m) za različite poprečne preseke kablova XHE 49-A na koji su priključena dva vetroagregata SWT 120 2.5



Sl. 6. Ukupni aktuelizovani troškovi po jedinici dužine kablova (Euro/m) za različite poprečne preseke kablova XHE 49-A na koji su priključena dva vetroagregata SWT 120 2.5 MW

Proračun investicionih troškova je vršen prema jediničnim cenama kablova koje su dobijene od proizvođača za tip kablova XHE 49-A, Tabela 1. Proračun troškova usled gubitaka je vršen prema aktuelnoj zagarantovanoj ceni proizvodnje električne energije u vetroelektranama, koja u Srbiji iznosi 92 €/MWh i zagarantovana je na period od 12 godina, što je značajno kraće od životnog veka vetroelektrane, koji se obično projektuje na 20 godina. Nakon isteka perioda garantovane cene, vetroelektrane će plasirati proizvedenu energiju na slobodnom tržištu, gde se cene električne energije formiraju obično na satnom nivou, prema principu ponude i tražnje. Radi jednostavnosti, u ovim analizama pretpostavljeno je da je cena energije 92 €/MWh tokom celog eksploatacionog perioda vetroelektrane.

Proračun histograma opterećenja izvršen je multipliciranjem dijagrama sa slike 4 sa brojem vetroagregata koji opterećuju deonicu fidera. Nakon toga, vršena je varijacija poprečnog preseka kablova i proračun komponenti troškova A i B, kao i ukupnih troškova kablova za svaku deonicu fidera. Na slici 5 prikazane su pojedinačna učešća komponenti troškova kablova (A i B) u troškovima proizvodnje za deonicu fidera koju opterećuju dva vetroagregata SWT 120, 2.5 MW. Sa povećanjem poprečnog preseka provodnika kablova rastu troškovi investicije za kabl, dok troškovi usled gubitaka opadaju, jer se smanjuje otpornost kablova. Na slici 6 prikazani su ukupni specifični aktuelizovani troškovi za deonicu kablova na koja su priključena dva vetroagregata (ukupna snaga 5 MW).

Primenom opisane metodologije izvršen je proračun aktuelizovanih ukupnih troškova kablova u troškovima proizvodnje za svaki poprečni presek kablova za slučaj kada je kabl opterećen sa različitim brojem test vetroagregata tipa GE 2.5 MW, H=120 m. Rezultati proračuna dati su u Tabeli 2. Dobijeni optimalni preseki kablova po deonicama su  $S_{T1-T1} = 300 \text{ mm}^2$ ,  $S_{T1-T2} = 240 \text{ mm}^2$ ,  $S_{T2-T3} = 240 \text{ mm}^2$  i  $S_{T3-T4} = 95 \text{ mm}^2$ .

**Tabela 2** Ukupni aktualizovani troškovi po jedinici dužine kabla XHE 49-A (Euro/m) za različite preseke kabla

Presek kabla (mm <sup>2</sup> )	Deonica kabla			
	TR-T1	T1-T2	T2-T3	T3-T4
XHE 49-A 3x1x70mm <sup>2</sup> , 33kV	71.03	153.97	302.86	533.66
XHE 49-A 3x1x 95mm <sup>2</sup> , 33kV	67.38	126.43	230.24	386.90
XHE 49-A 3x1x 120mm <sup>2</sup> , 33kV	70.01	116.34	196.82	316.41
XHE 49-A 3x1x 150mm <sup>2</sup> , 33kV	75.27	112.80	177.48	272.56
XHE 49-A 3x1x 185mm <sup>2</sup> , 33kV	79.24	108.97	159.86	233.91
XHE 49-A 3x1x 240mm <sup>2</sup> , 33kV	84.28	106.84	145.20	200.48
XHE 49-A 3x1x 300mm <sup>2</sup> , 33kV	98.15	116.15	146.63	190.30
XHE 49-A 3x1x 400mm <sup>2</sup> , 33kV	120.45	134.45	158.09	191.79
XHE 49-A 3x1x 500mm <sup>2</sup> , 33kV	159.71	170.65	189.06	215.20

Dozvoljeno trajno opterećenje kabla je standardni podatak koji se dobija od proizvođača kabla, Tabela 1. Kao što je i pretpostavljeno, ekonomski preseki kablova su generalno značajno veći od tehničkih preseka. Ovo daje dodatne povoljnosti u smislu dužeg životnog veka kablova i veće pouzdanosti.

Ovako proračunati ekonomski presek kabla je potrebno proveriti sa aspekta tehničkih ograničenja. Pored trajnog opterećenja potrebno je proveriti kabl i sa aspekta struja kratkog spoja. Minimalan presek kabla sa aspekta struje kratkog spoja se može odrediti na osnovu relacije [7]:

$$S \geq \frac{I\sqrt{t}}{K \sqrt{\ln \left[ \frac{(\beta + \Theta_f)}{(\beta + \Theta_i)} \right]}} \quad (11)$$

Gde je  $S$  minimalan presek kabla (mm<sup>2</sup>),  $I$  je dozvoljena struja kratkog spoja (A),  $t$  je trajanje kratkog spoja (s),  $K$  je konstanta koja zavisi od materijala provodnika  $\left[ A \cdot s^{1/2} / mm^2 \right]$  ( $K=148$  za aluminijum),  $\beta$  – recipročni temperaturni koeficijent otpornosti provodnika na 20°C ( $\beta = 228$  za aluminijum),  $\Theta_f$  – finalna temperatura provodnika,  $\Theta_i$  – početna temperatura provodnika.

Početna temperatura provodnika  $\Theta_i$  se obično bira da bude jednaka maksimalno dozvoljenoj temperaturi provodnika (250°C za XLPE izolovane kablove). Finalna temperatura provodnika  $\Theta_f$  se tipično bira da bude jednaka maksimalnoj temperaturi izolacije (90°C za kabl XHE 49 A).

Pretpostavljena je struja kratkog spoja od 8 kA za 1 sec, stoga je minimalan presek provodnika sa aspekta struje kratkog spoja 95 mm<sup>2</sup>.

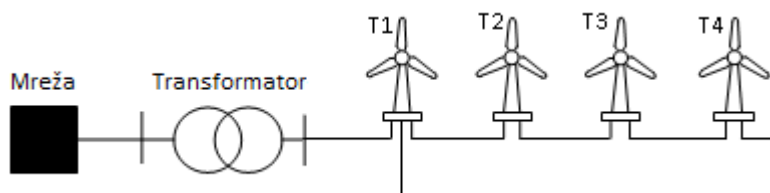
Na kraju proračuna, potrebno je proveriti promene napona koji se imaju duž fidera vetroelektrane. U tom pogledu kritični su krajnji vetroagregati koji će imati maksimalne napone. Maksimalno prihvatljiva promena napona duž jednog fidera je tipično 2%. Pad napona se računa prema sledećoj formuli:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{3} \cdot l_i \cdot I_i (R_i \cos \varphi_i + X_i \sin \varphi_i) \leq \Delta V_{\max} \quad (12)$$

Gde je  $\Delta V$  (V) pad napona na analiziranom fideru (V),  $\Delta V_i$  pad napona na deonici fidera (V),  $n$  je broj deonica,  $l_i$  je dužina deonice (km),  $I_i$  je struja kabla (A),  $R_i$  je otpornost kabla ( $\Omega/\text{km}$ ),  $X_i$  je reaktansa kabla ( $\Omega/\text{km}$ ),  $\varphi_i$  je faktor snage (p.u.).

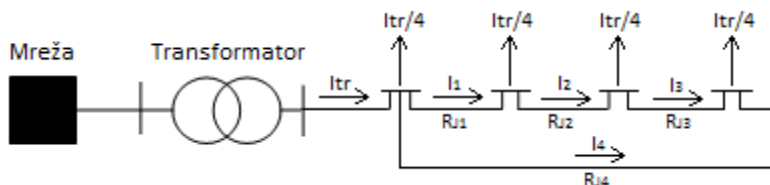
Pad napona retko predstavlja problem na srednjem naponu, čak i za duge deonice kablova manjih preseka, pa se pretpostavlja da je ovaj zahtev zadovoljen za sve kablove.

Zbog nemogućnosti rezervnog napajanja, kvar na bilo kojem mestu u mreži izaziva prekid napajanja kompletne SN mreže napajane preko tog voda. Na Sl. 7 obezbeđeno je rezervno napajanje preko kabla istog tipa i naponskog nivoa položenog u rov sa postojećim kablovima tako da pri ispadu nekog elementa mreže rezervni kabl može da preuzme prenos ispalne snage. Nova koncepcija mreže ne zahteva dodatne troškove za polaganje kabla, jer se rezervni kabl polaze u isti rov sa postojećim kablovima. Kablovi su dimenzionisani na ekonomske preseke. Rezervni smer napajanja omogućava napajanje elemenata u slučaju kvara. Povratni kabl je potrebno dimenzionisati tako da u potpunosti osigura napajanje čitave potrošnje.



Sl. 7. Radijalna topologija sredjenaponske mreže sa povratnim kablom

U slučaju kada postoji povratni kabl, vrši se minimizacija ukupnih gubitaka u mreži. Izvršen je proračun tokova snaga (struja) u mreži (Sl. 8) i dobijene su sledeće jednačine struja po deonicama:



Sl. 8. Tokovi snaga (struja) u mreži sa povratnim kablom

$$I_1 = \frac{\frac{3}{4}R_{J4} + \frac{1}{2}R_{J3} + \frac{1}{4}R_{J2}}{R_{J4} + R_{J3} + R_{J2} + R_{J1}} I_{tr}, I_2 = I_1 - \frac{1}{4}I_{tr}, I_3 = I_1 - \frac{1}{2}I_{tr}, I_4 = \frac{3}{4}I_{tr} - I_1 \quad (13)$$

Nakon toga, vršena je varijacija poprečnog preseka kablova i proračun komponenti troškova A, B i ukupnih troškova kabla. Dobijeni optimalni preseki kablova po deonicama u slučaju kada postoji povratni vod su  $S_{TR-T1} = 300 \text{ mm}^2$ ,  $S_{T1-T2} = 120 \text{ mm}^2$ ,  $S_{T2-T3} = 95 \text{ mm}^2$ ,  $S_{T3-T4} = 95 \text{ mm}^2$  i  $S_{T4-T1} = 120 \text{ mm}^2$ .

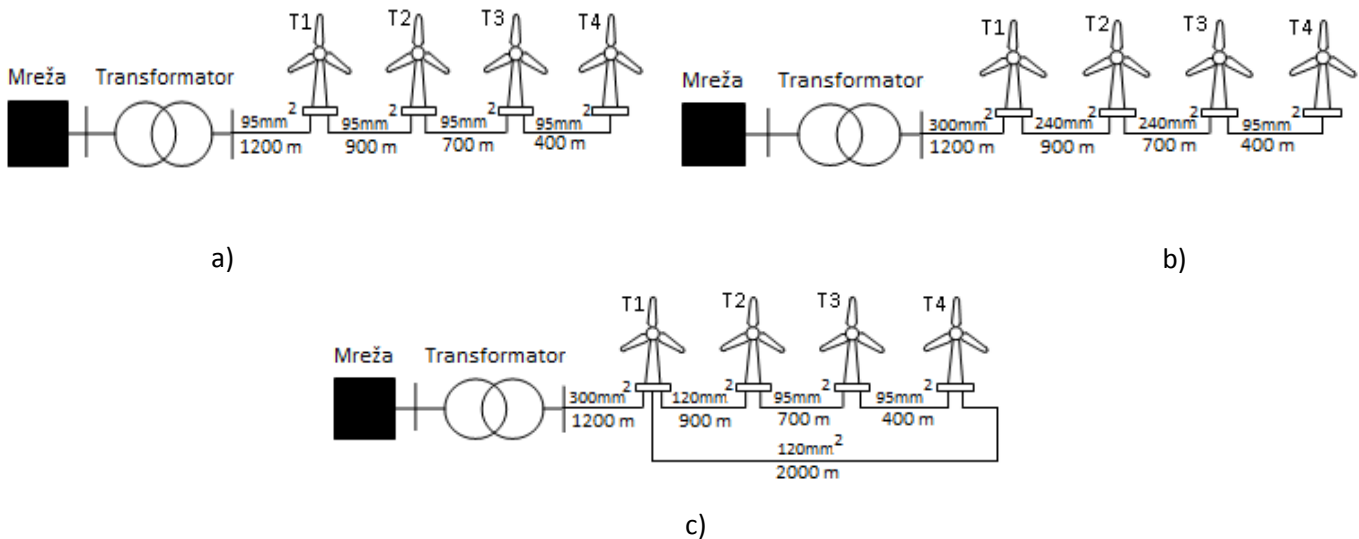
## KOMPARATIVNA ANALIZA TROŠKOVA

Da bi se odredio dodatni profit koji se postiže korišćenjem ekonomskih preseka kablova, izvršena je komparativna analiza troškova u odnosu na odabrane preseke kablova prema tehničkim ograničenjima, za rešenje bez i za rešenje sa povratnim kablom.

Minimalni tehnički preseki kablova u analiziranim slučajevima su za jedan, dva, tri i četiri vetrogeneratora  $95 \text{ mm}^2$ .



Slika 7 prikazuje test vetroelektranu sa označenim tehničkim i ekonomskim presecima kablova za svaku deonicu fidera, za sva tri varijantna rešenja.



Sl. 7. Test vetroelektrana sa označenim a) tehničkim presecima kablova, b) ekonomskim presecima kablova, c) ekonomskim presecima kablova za rešenje sa povratnim vodom

Tabela 3 pokazuje paralelno ključne ekonomske faktore u slučaju korišćenja tehničkih (varijantno rešenje 1), ekonomskih preseka kablova (varijantno rešenje 2) za mrežu na Sl. 1, kao i ekonomskih preseka kablova za mrežu sa povratnim vodom (varijantno rešenje 3) na Sl. 7.

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da varijantno rešenje 2, koja uključuje korišćenje ekonomskih preseka kablova, pruža bolju ekonomičnost projekta za vlasnika vetroelektrane. Varijantno rešenje 2 obezbeđuje povećanje profita od 16.309 evra godišnje. Troškovi investiranja u slučaju korišćenja ekonomskih preseka su veći za 30.724 evra, tako da će se razlika u drugoj godini eksploatacije isplatiti, dok će se u narednih 18 godina ostvariti dodatni profit od 293.562 evra. Ekonomsku prednost varijantnog rešenja 2 pokazuju i ukupni aktualizovani specifični troškovi svedeni na kraj životnog veka vetrogeneratora, koji su u slučaju varijantnog rešenja 2 smanjeni za oko 326,177 evra.

**Tabela3:** Komparativna analiza ključnih ekonomskih faktora za analizirana rešenja

Ekonomski faktor	Varijantno rešenje 1	Varijantno rešenje 2	Varijantno rešenje 3
Ukupni investicioni troškovi (Euro)	48,128	78,852	100,692
Prosečni godisnji gubici snage u kablovskoj mreži (kW)	21.34	7.01	7.38
Ukupni godisnji gubici snage u kablovskoj mreži (MWh)	186.92	61.43	64.65
Ukupni godisnji troškovi usled gubitaka (Euro)	17,196.64	5,651.56	5,947.80
Ukupni investicioni troškovi svedeni na kraj eksploatacionog perioda vetroelektrane (Euro)	154,353	252,889	323,221
Ukupni troškovi usled gubitaka svedeni na kraj eksploatacionog perioda vetroelektrane (Euro)	632,588	207,875	218,767
Ukupni aktualizovani specifični troškovi u kablovskoj mreži svedeni na kraj eksploatacionog perioda vetroelektrane (Euro)	786,941	460,764	541,988

Nedostatak varijantnog rešenja 2 je što kvar na bilo kojem mestu u mreži izaziva prekid napajanja kompletne SN mreže napajane preko tog voda. U slučaju varijantnog rešenja 3 povratni kabl preuzima prenos ispale snage pri kvaru. Nova koncepcija mreže ne zahteva dodatne troškove za polaganje kabla, jer se rezervni kabl polaze u rov sa postojećim kablovima, dok su troškovi investiranja u slučaju varijantnog rešenja 3 veći za 81,224 evra u odnosu na varijantno rešenje 2. Kako bi se odredila opravdanost investicije u povratni kabl određena je prosečna godišnja nerazpoloživost kablova po deonicama za koju su troškovi usled neisporučene električne energije jednaki različiti troškova za različita varijantna rešenja. Prosečna godišnja nerazpoloživost kabla u određenoj deonici računa se prema izrazu:

$$t = \frac{T_{ukupno}^{var.rešenje3} - T_{ukupno}^{var.rešenje2}}{C_{EN} \cdot C_F \cdot P_n} \quad (14)$$

Gde su  $T_{ukupno}$  (Euro) ukupni aktuelizovani specifični troškovi u kablovskoj mreži svedeni na kraj eksploatacionog perioda vetroelektrane,  $C_F$  faktor kapaciteta (pretpostavljena je vrednost 33%),  $P_n$  (MW) naznačena snaga,  $C_{EN}$  (Euro/MWh) cena električne energije (pretpostavljena je vrednost 92 €/MWh).

Na osnovu relacije (14) prosečna godišnja nerazpoloživost kabla u deonici T1-T2 za koju je investicija u povratni kabl opravdana iznosi 17.85h, odnosno u procentima na godišnjem nivou oko 0,2%. Na isti način dobijeno je da prosečna godišnja nerazpoloživost kabla u deonici T2-T3 i deonici T3-T4 iznose 26.35h i 52.7h, odnosno u procentima na godišnjem nivou 0,3% i 0,6%, respektivno.

## ZAKLJUČAK

U radu je prikazan i analiziran rad modela za proračun optimalnog preseka kabla za priključenje vetroelektrana na elektroenergetski sistem, uz uvažavanje promenljive otpornosti kabla usled temperaturnih varijacija. Aktualizacijom investicionih troškova kablova i troškova disipirane (neisporučene) energije, određen je ekonomski presek kabla pri kojem su troškovi proizvodnje minimalni. Na konkretnom primeru vetroelektrane u Banatu pokazano je da se optimalnim izborom preseka kabla mogu značajno smanjiti troškovi proizvodnje, odnosno povećati profit.

U radu je predloženo i rešenje mreže sa povratnim kablom koji obezbeđuje rezervno napajanje u slučaju kvara. Data je detaljna analiza proračuna optimalnih preseka kablova i nerazpoloživosti kablova u mreži za koje je predloženo rešenje isplativo.

Na osnovu poređenja pojedinih varijantnih rešenja može se zaključiti da je u slučaju veoma male nerazpoloživosti mreže (maksimalno za deonicu 0,6%) isplativa investicija u dodatni rezervni kabl.

## LITERATURA

- (1) IEC 60287-2-1:2015 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Calculation of the thermal resistance
- (2) V.MalóMachadoa,M.Eduarda Pedro,J.A.BrandãoFaria,D.Van Dommelen, Magnetic field analysis of three-conductor bundles in flat and triangular configurations with the inclusion of proximity and skin effects, Electric Power Systems Research 81 (2011), pp. 2005–2014 <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.06.010>.
- (3) Tian Pau Chang, Estimation of wind energy potential using different probability density functions, Applied Energy 88 (2011), pp. 1848-1855. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.010>
- (4) P. A. Costa, R. C. Sousa, C. F. Andrade, M. E. V. Silva, Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil, Applied Energy 89 (2012), pp. 395-400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.003>
- (5) Ž. Đurišić, J. Mikulović, Assessment of the Wind Energy Resource in the South Banat Region, Serbia, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 16 (2012), pp. 3014-3023.
- (6) Ž. Đurišić, J. Mikulović, A model for vertical wind speed data extrapolation for improving wind resource assessment using WAsP, Renewable Energy 41 (2012), pp. 407-411
- (7) IEC 60949 :1988 Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects