

GENERALNI MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN EKONOMSKOG PRESEKA KABLOVA ZA PRIKLJUČENJE VETROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKI SISTEM

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

UVOD

Priključenje vetroelektrana na elektroenergetski sistem se po pravilu vrši preko srednjenaponskih kablovskih vodova. Priključno mesto vetroelektrana na distributivnu ili prenosnu mrežu je obično udaljeno po 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. U radu je razvijen generalni matematički model za izbor optimalnog preseka kablovskih vodova koji će obezbediti minimalne operativne troškove i na taj način maksimalan profit vlasniku vetroelektrane.

Zbog nelinearne veze između gubitaka i opterećenja kabla potrebno je poznavati vremenski dijagram proizvodnje vetroelektrane. Vetroelektrana je intermitentan izvor energije, pa je opterećenje kablova intermitentno 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 (neprodane) energije korišćen je ekonomski model kabla. Primena razvijenih modela demonstrirana je na primeru priključenja vetroelektrane različitih instalisanih snaga u regionu Banata.

MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN PROIZVODNJE VETROELEKTRANE

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 [1]:

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

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 ∞ jednaka 1. Postoji više numeričkih metoda za određivanje parametara Weibullove raspodele verovatnoće na osnovu seta raspoloživih mernih podataka o brzini vetra [2]. Jedna od metoda, koja spada u najtačnije, je metoda maksimuma verovatnoće (*maximum likelihood method*). Faktor oblika se određuje numeričkom interaktivnom metodom. Relacije kojima se određuju parametri k i c prema ovoj metodi imaju sledeći oblik:

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^n V_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(V_i)}{n} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^k \right]^{1/k} \quad (3)$$

Gde je:

n - broj intervala,

V_i - srednja vrednost brzine vetra u i -tom intervalu.

Za započinjanje iterativnog procesa potrebno je usvojiti početno pogađanje za faktor oblika k . Za početno pogađanje usvojena je približna procena faktora oblika k dobijena pomoću metode energije uzoraka (*energy pattern factor method*):

$$E_{pf} = \frac{(V^3)_{sr}}{(V_{sr})^3} \quad (4)$$

Faktor oblika se može proceniti na osnovu sledeće relacije:

$$k = 1 + \frac{3.69}{E_{pf}} \quad (5)$$

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:

$$P_i(V_i) = f(V_i) \cdot P_{powercurve}(V_i) \quad (6)$$

Gde je:

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

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

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:

$$W_{god} = \sum E_i = \sum_{V_i} T_i \cdot P_{powercurve}(V_i) \approx T \cdot \sum_{V_i} P_i(V_i) \cdot \Delta V \quad (7)$$

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

TERMODINAMIČKI MODEL KABLA

Stohastična priroda vetra uzrokuje stohastičnost u proizvodnji i promenljive gubitke energije, koji utiču na promenljivu temperaturu provodnika kabla, što uzrokuje promenu njegove otpornosti. Da bi se što tačnije procenili godišnji gubici energije na kablju potrebno je uvažiti promenu otpornosti kabla sa promenom opterećenja. Nadtemperatura provodnika kabla ($\Delta\theta = \theta_p - \theta_a$), tj. razlika između temperature provodnika θ_p i temperature ambijenta θ_a , određena je relacijom [3]:

$$\Delta\theta = RI^2 \left[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4) \right] + W_d \left[0.5T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4) \right] \quad (8)$$

Gde su:

$$I = \frac{P_g}{U_n \sqrt{3}} \text{ - struja opterećenja kabla [A] (pretpostavljeno je da vetroelektrana radi sa jediničnim faktorom snage),}$$

P_g - snaga generisanja vetroelektrane [kW], U_n - nazivni napon mreže [kV],

W_d - dielektrični gubici po jedinici dužine kabla [W/m],

T_1, T_2, T_3 - toplotni otpori izolacije, sloja između metalnog ekrana i armature kabla i spoljašnje zaštite (plašta) kabla, respektivno [Km/W],

T_4 - spoljašnji toplotni otpor tj. toplotni otpor okolnog medijuma [Km/W],

R - električna otpornost provodnika kabla po jedinici dužine, pri temperaturi provodnika θ_p [Ω/m],

n - broj žila kabla,

λ_1 - odnos gubitaka u električnoj zaštiti i plaštu kabla prema gubicima u provodniku,

λ_2 - odnos gubitaka u armaturi kabla prema gubicima u provodniku.

Vrednosti toplotnih otpora elemenata kabla T_1, T_2, T_3 i toplotni otpor okoline T_4 zavise od konstrukcije kabla i načina polaganja. Gubici koji se javljaju u električnoj zaštiti kabla zavise od načina na koji je izvedena električna zaštita, načina uzemljenja električne zaštite i načina polaganja kablova. Analitički izrazi za određivanje termičkih otpora elemenata kabla, kao i gubitaka u električnoj zaštiti i armaturi kabla dati su u [3].

Električna otpornost provodnika pri temperaturi provodnika θ_p se određuje pomoću relacije:

$$R(\theta_p) = R' (1 + y_s + y_p) = R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} (\theta_p - 20)) \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (9)$$

gde su: R' - otpornost provodnika pri jednosmernoj struji i temperaturi provodnika θ_p , y_s -faktor skin efekta, y_p - faktor efekta blizine, R_0 - otpornost provodnika pri jednosmernoj struji i temperaturi provodnika od 20°C , α_{20} - temperaturni koeficijent provodnika na temperaturi od 20°C .

Proračun otpora provodnika se najpre izvodi sa temperaturom koja odgovara maksimalno dozvoljenoj temperaturi provodnika, pa se zatim vrši korekcija dobijenog rezultata u skladu sa aktuelnom temperaturom provodnika.

Proračun gubitaka snage u kablju P_γ , pri snazi generisanja vetroelektrane P_g , vrši se na osnovu proračunate otpornosti kabla R prema relaciji:

$$P_\gamma = P_c + P_s + P_a + P_d \quad (10)$$

Gde su:

$P_c = RI^2$ - Gubici u provodniku po jedinici dužine kabla [W/m],

$P_s = \lambda_1 R I^2$ - Gubici u električnoj zaštiti i plaštu kabla po jedinici dužine kabla [W/m],

$P_a = \lambda_2 R I^2$ - Gubici u armaturi kabla po jedinici dužine kabla [W/m],

$P_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$ - dielektrični gubici po jedinici dužine kabla [W/m], ω - ugaona učestanost [Hz], C - kapacitet kabla po jedinici dužine kabla [μ F/m], U_n - napon kabla [kV], $\tan \delta$ - faktor gubitaka dielektrika.

Ukupna energija gubitaka u kablu u toku godine ($T=8760$ h) se može odrediti prema sledećoj relaciji:

$$W_\gamma = \sum E_\gamma \approx T \cdot \sum_{V_i} P_{\gamma i}(V_i) \cdot \Delta V \quad (11)$$

EKONOMSKI MODEL ZA IZBOR OPTIMALNOG PRESEKA KABLA

Metoda aktualizacije predstavlja način za formiranje novčanog ekvivalenta za slučaj kada se za jedan projekat izdvajaju različite vrednosti novca u različitim periodima vremena. Ova metoda koristi složeni kamatni interesni račun. Ekonomske metode, koje inače imaju opšti značaj, kada se primenjuju u tehnici, posebno energetici, javljaju se u donekle specifičnom obliku. Tako, dok metoda aktualizacije definiše i koristi godišnju interesnu (kamatnu) stopu kao faktor sa kojim diskontira određenu vrednost na jedinični termin, u inženjerskoj ekonomiji se definiše i koristi stopa aktualizacije p_n . Stopa aktualizacije ima dublje značenje od kamatne stope. Njena funkcija nije učestvovanje u stvaranju viška vrednosti, već pravilno vrednovanje budućih efekata.

U cilju izračunavanja ekvivalentnih godišnjih troškova, vrednovanje i poređenje različitih varijanti nekog projekta se svodi na poređenje godišnjih troškova tih varijanti. U ovom slučaju, smatra se da su troškovi svedeni na kraj perioda eksploatacije i pretpostavlja se da su godišnji troškovi eksploatacije kabla E jednaki za period rada sa zagaranovanom cenom proizvodnje električne energije u vetroelektranama, kao i za period rada na slobodnom tržištu. Ovi troškovi zapravo predstavljaju ekvivalentnu novčanu vrednost godišnjih gubitaka energije na priključnom kablovskom vodu, određenu na osnovu cene proizvodnje električne energije u vetroelektranama za posmatranu godinu.

Neka je K nabavna vrednost kabla (uloženi kapital), odnosno ukupni investicioni troškovi skoncentrisani na početak perioda eksploatacije. Troškovi eksploatacije predstavljaju ukupnu godišnju cenu gubitaka energije na priključnom kablu. Uzima se da je životni vek vetroelektrane $n=25$ godina, pa se aktualizacija svodi na kraj ovog perioda. Stopa aktualizacije obično uzima vrednost između $p_n=0,07-0,09$ [4],[5]. Dakle, ukupni troškovi na kraju perioda eksploatacije računaju se na sledeći način:

$$T_n = K(1 + p_n)^n + E \frac{(1 + p_n)^n - 1}{p_n} \quad (12)$$

Kao parametar za optimizaciju preseka kabla u ovoj analizi korišćen je udeo troškova, definisanih relacijom (12), u proizvodnji prosečnog MWh na životnom veku vetroelektrane sveden na jedinicu dužine kabla:

$$c = \frac{T_n}{L \cdot W_n} = \frac{K}{L \cdot W_n} \cdot (1 + p_n)^n + \frac{E}{L \cdot W_n} \cdot \frac{(1 + p_n)^n - 1}{p_n} = A + B \quad (13)$$

Gde su:

T_n - ukupni investicioni i eksploatacioni troškovi kablovskog priključka definisani relacijom (12) [€],

L - dužina kablovskog priključka[km],

W_n - neto proizvedena energija na pragu vetroelektrane u toku njenog životnog veka od n godina [MWh],

A - specifični udeo investicionih troškova kabla u troškovima proizvodnje prosečnog MWh na životnom veku vetroelektrane [€/ (MWh km)],

B - specifični udeo eksploatacionih troškova kabla (gubitaka na kابلu) u troškovima proizvodnje prosečnog MWh na životnom veku vetroelektrane [$\text{€}/(\text{MWh km})$],

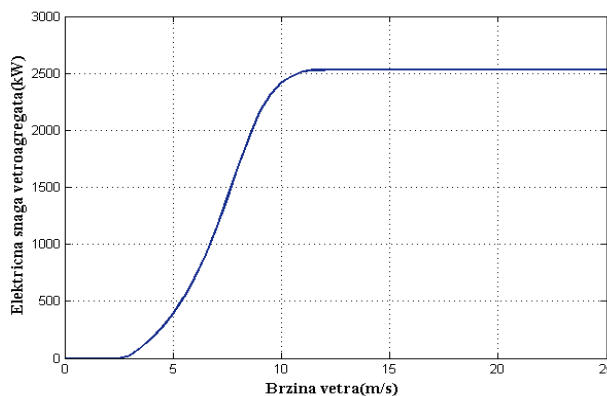
C - specifični udeo ukupnih troškova kabla u troškovima proizvodnje prosečnog MWh na životnom veku vetroelektrane [$\text{€}/(\text{MWh km})$].

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 specifični udeo ukupnih troškova kabla (c) u troškovima proizvodnje minimalan.

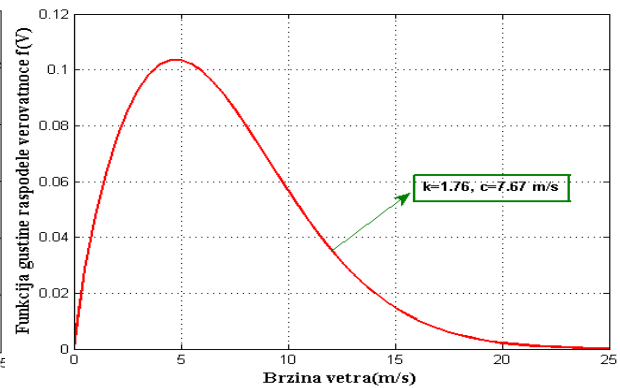
Matematički model, koji je predstavljen u ovom radu, predstavlja osnov za formiranje softvera za proračun ekonomskog preseka priključnog kabla određene vetroelektrane. Ulazne veličine su: parametri Weibull-ove statistike vetra na visini osovine vetroturbine, kriva snage vetroagregata, tip kabla (parametri termodinamičkog modela kabla i otpornosti provodnika, kao i specifičnih gubitaka u plaštu i dielektriku kabla), termički parametri zemljišta u koje se polažu kablovi i način njihovog polaganja, zavisnost cene kabla od poprečnog preseka provodnika, stopa aktuelizacije i jedinična cena električne energije na pragu vetroelektrane.

PRIMER PRORAČUNA

U cilju testiranja razvijenih modela, analiziran je slučaj priključenja vetroelektrane, različitih instalisanih snaga, na lokaciji Bavanište u južnom Banatu. Pretpostavka je da se vetroelektrana priključuje kablovskim vodom na srednjenaponsku distributivnu mrežu nazivnog napona 20 kV. Analiza se odnosi na slučaj da je faktor snage vetroelektrane jednak 1 i da je napon u tački priključenja stalan i nominalan. Dužina kablovskog priključka je 10 km. Analize su izvršene uz pretpostavku da je vetroelektrana realizovana sa vetroagregatima tipa GE 2.5 MW, $H=120$ m.



Sl.1. Kriva snage vetroagregata GE 2.5MW, $H=120$ m

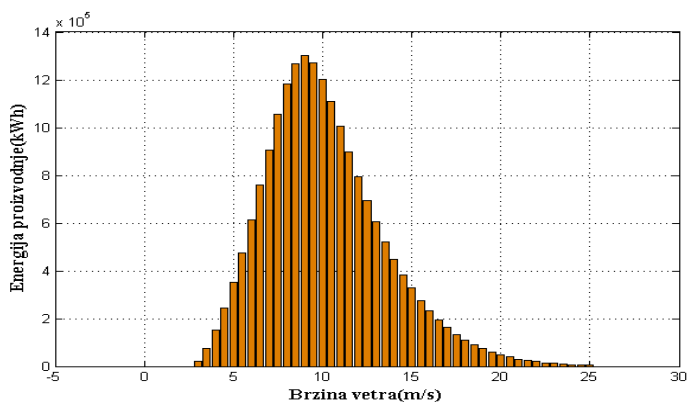


Sl.2. Weibullova funkcija gustine raspodele verovatnoće javljanja brzina vetra na lokaciji Bavanište, za $H=120$ m

Na Sl.1. 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 Sl.2. Parametri Weibullove raspodele za slučaj korišćenog seta podataka su $k = 1.76$ i $c = 7.67$. Na osnovu modela opisanog u radu izvršen je proračun snage proizvodnje vetroagregata i ukupne godišnje energije proizvodnje. Procenjena godišnja energija proizvodnje test vetroagregata na odabranoj mikrolokaciji je 9.6 GWh/god. Na Sl.3. prikazan je uređeni dijagram proizvodnje analiziranog vetroagregata na lokaciji Bavanište, u analiziranoj godini.

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 stalna i iznosi 10°C . Za različite preseke kabla računata je promena temperature i otpornosti provodnika sa promenom opterećenja kabla. Na osnovu relacija (10 i 11) izvršen je proračun snage gubitaka i ukupne godišnje energije gubitaka za svaki presek. Na Sl. 4 prikazana je promena otpora kabla sa

promenom opterećenja za kabl tipa XHE 49-A, 12/20kV, 3x(1x95/16) mm², dok je na Sl.5. prikazana snaga gubitaka u priključnom kablju pri različitim brzinama vetra merenim na visini osovine vetroturbine.

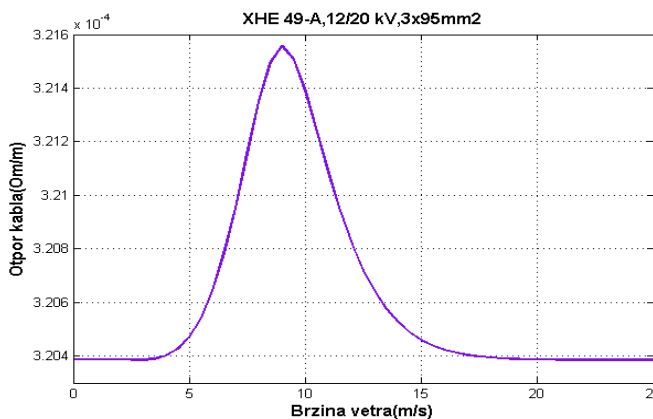


Sl.3. Energija proizvodnje vetroagregata GE 2.5 MW, H=120 m na lokaciji Bavanište, za period od 1.8.2008.- 1.8.2009.godine

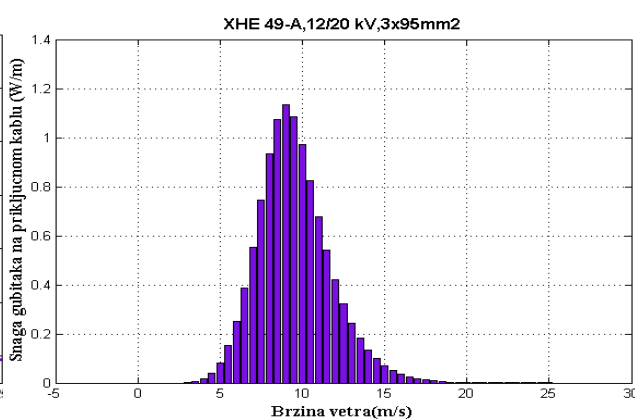
TABELA 1- SPECIFIČNE CENE KABLOVA

Poprečni presek provodnika tipa XHE49- A, 12/20kV (mm ²)	Cena kabla (€/m)
1x95/16	6.08
1x120/16	6.77
1x150/25	8.51
1x240/25	10.72
1x300/25	11.81
1x400/25	13.58

Proračun investicionih troškova je vršen prema jediničnim cenama kablova koje su dobijene od proizvođača za tip kabla XHE 49-A, Tabela 1. Proračun troškova usled gubitaka je vršen prema aktuelnoj zagantovanoj ceni proizvodnje električne energije u vetroelektranama, koja u Srbiji iznosi 92 €/MWh i zagantovana je na period od 12 godina, što je značajno kraće od životnog veka vetroelektrane, koji se obično projektuje na 25 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. U ovim analizama pretpostavljeno je da cena energije u uslovima slobodnog tržišta odgovara srednjoj dnevnoj ceni za analiziranu godinu od 39 €/MWh, određenoj na osnovu cena koje su preuzete sa Nemačke berze.



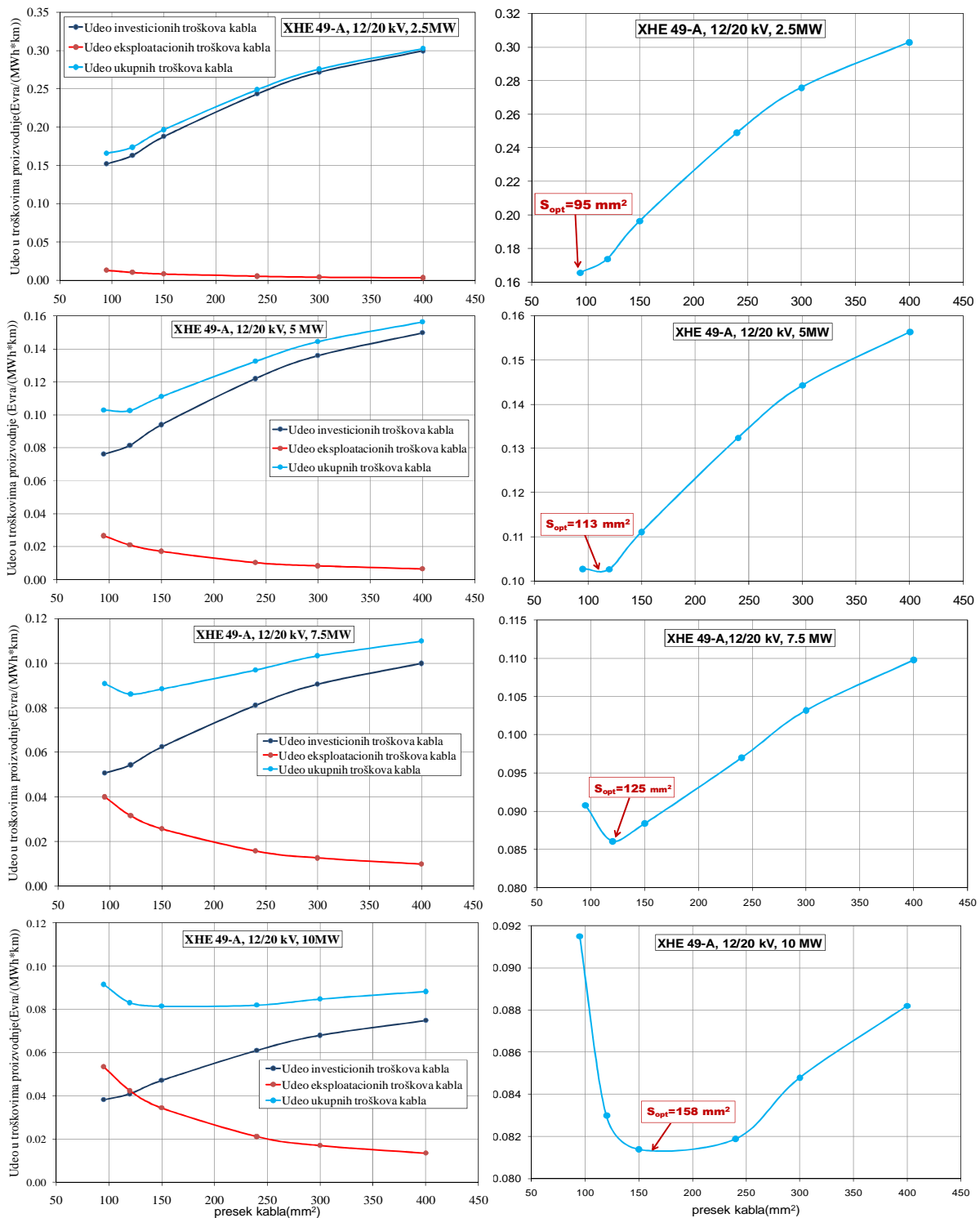
Sl.4. Promena otpora kabla za kabl tipa XHE 49-A, 12/20 kV, 3x(1x95/16) mm²



Sl.5. Snaga gubitaka u priključnom kablju XHE 49-A, 12/20 kV, 3x(1x95/16) mm²

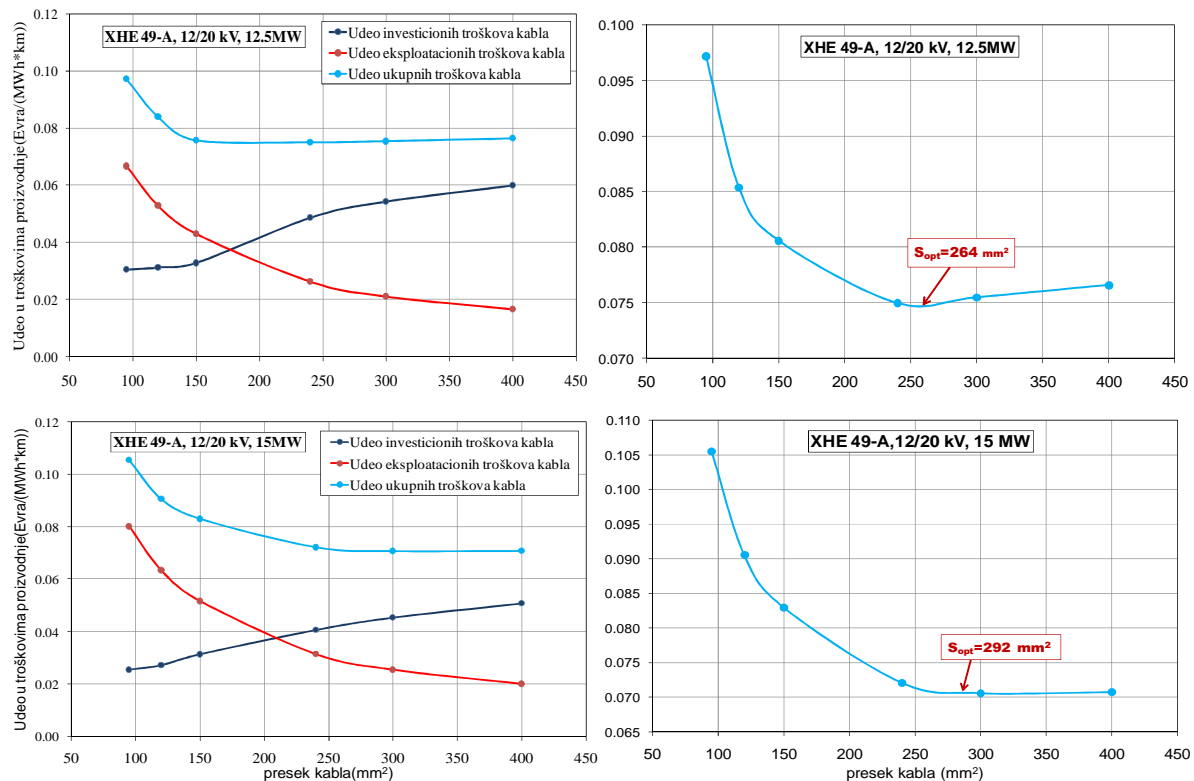
Na Sl.6(levo) prikazane su pojedinačna učešća komponenti troškova kabla (A i B) u troškovima proizvodnje, kao i ukupni troškovi kabla za svaki presek kabla. Sa povećanjem poprečnog preseka kabla rastu troškovi investicije za kabl, dok troškovi usled gubitaka opadaju, jer se smanjuje otpornost kabla. Na osnovu dijagrama na Sl.6(desno) može se zaključiti da troškovi proizvodnje za vetroelektranu snage 2.5 MW dostižu minimalnu vrednost pri optimalnom preseku kabla od 95 mm².

Na osnovu razvijenog modela izvršena je i ekonomska analiza na osnovu koje su birani optimalni preseki kabla za priključenje vetroelektrane realizovane sa različitim brojem vetroagregata. Na dijagramima na Sl. 6 i 7 prikazane su komponente aktuelizovanih specifičnih troškova i ukupni troškovi kablova u troškovima proizvodnje za vetroelektranu sa 2,3,4,5 i 6 vetroagregata tipa GE 2.5 MW, H=120 m. Optimalni presek priključnog kabla u analiziranim slučajevima iznosi redom: 113 mm², 125 mm², 158 mm², 264 mm² i 292 mm². S obzirom da su ovo računске vrednosti, stvarni optimalni presek se bira kao najbliži standardni presek.



Sl.6. Komponente aktualizovanih specifičnih troškova kabela XHE 49-A, 12/20 kV za različite instalirane snage vetroelektrana(levo) i optimalni presek kabela(desno)

Ovako proračunati ekonomski presek kabela je potrebno proveriti sa aspekta tehničkih ograničenja(trajno i kratkotrajno dozvoljeno opterećenje i dozvoljene promene napona). Ukoliko ekonomski presek ne zadovoljava neko od ograničenja, potrebno je odabrati prvi veći standardni presek koji zadovoljava kritično ograničenje.



Sl.7. Komponente aktuelizovanih specifičnih troškova kabla XHE 49-A, 12/20 kV za različite instalisane snage vetroelektrane(leva) i optimalni presek kabla(desno)

ZAKLJUČAK

U radu je prikazan i demonstriran model 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 (neprodane) 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.

Dalje unapređenje razvijenog modela bi moglo obuhvatiti optimizaciju broja priključenih vetroagregata na jedan fider, koje bi zahtevalo uvođenje topologije prostornog rasporeda vetroagregata. U uslovima kompleksnog terena potrebno je uvažiti i činjenicu da se proizvodnje vetroagregata mogu bitno razlikovati, pa je u opštem slučaju potrebno definisati parametre statističke analize vetra za svaki vetroagregat.

LITERATURA

- (1) Q. Volker, Understanding renewable energy systems, Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005.
- (2) Kasra Mohammadi, Omid Alavi, Ali Mostafaeipour, Navid Goudarzi, Mahdi Jalilvand, Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density, Energy Conversion and Management, 2015, Vol. 108, pp. 322-335 (doi: 10.1016/j.enconman.2015.11.015)
- (3) Calculation of the Continuous Current Rating of Cables, IEC Publication 287, 1982.
- (4) N. Rajaković „Analiza elektroenergetskih sistema 2“, Akademska misao, Beograd 2008.
- (5) I. A. Škopljev “Planiranje elektroenergetskih sistema”, Taurus Public, Beograd, 2000.
- (6) Joshua Earnest „Wind power technology“, New Delhi, 2015.