

Metode odabira kablova u okviru vetroparka uz pomoć softvera

Mina Stefanović, Iva Batić, Tomislav Rajić

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Rezime - S obzirom da vetroelektrane pripadaju obnovljivim izvorima energije i da se u svetu sve više obraća pažnja na emitovanje štetnih materija od strane termoelektrana, svedoci smo da obnovljivi izvor energije, pa samim tim i vetroparkovi, doživljavaju sve veći razvoj poslednjih godina. Imajući tendenciju brzog razvoja u budućnosti, kao i mogućnost da nadmaše konvencionalne izvore energije, predmet ispitivanja ovog rada će biti vetroparkovi, odnosno način njihovog kablovskog povezivanja.

Kablovi su neizostavni deo elektroenergetskog sistema i služe za prenos električne energije do krajnjih potrošača. Biće prikazan proračun tokova snaga u softveru u različitim situacijama, na osnovu koga će se vršiti odabir kabla.

Ključne reči - vetroparkovi, kablovi, strujno opterećenje

I UVOD

Energija vetra je, uz ogrevno drvo, prvi oblik primarne energije koju je čovek koristio. Veruje se da je energija vetra korišćena za navodnjavanje još pre 3000 godina. Prvu vetroturbinu koja je korišćena za generisanje električne energije napravio je Danac Poul la Cour 1891. godine. Zanimljivost je da je Poul la Cour koristio ovako proizvedenu električnu energiju za elektrolizu vode i na taj način je proizvodio vodonik za gasne lampe koje su korišćene u lokalnoj školi. Danas se može reći da je on bio 100 godina ispred svoga vremena, jer su savremene vizije razvoja vetroenergetike povezane upravo sa korišćenjem vetrogeneratora za proizvodnju vodonika u udaljenim vetrovitim lokacijama u Severnom moru.

Nakon završetka Drugog svetskog rata, ekonomija u elektroenergetici biva okrenuta velikim termoelektranama na fosilna goriva i velikim hidroelektranama, tako da vetrogeneratori, kao i ostali mali izvor energije, postaju nekonkurentni i polako prelaze u zaborav. Energetska kriza iz 1973. godine, a kasnije i sve veći ekološki problemi u vezi sa sagorevanjem fosilnih goriva, ponovo popularizuju obnovljive izvore energije i početkom devedesetih godina vetrogeneratori doživljavaju renesansu. Velika finansijska ulaganja i jasna opredeljenost najrazvijenijih država da stimulišu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora su rezultirale izuzetno brzim razvojem vetroenergetike [1-3].

Kablovi su neizostavni deo elektroenergetskog sistema i služe za prenos električne energije do krajnjih potrošača. Pod kablom se podrazumevaju provodnici koji su električno izolovani i smešteni u zajednički omotač za zaštitu od spoljašnjeg uticaja (mehanička oštećenja, vlaga, korozija itd.) [4, 5]. Kablovski vod je deo elektroenergetskog sistema koji se sastoji od kabla ili međusobno povezanih kablova spojnicama, čiji se krajevi preko kablovskih

završnica uključuju na druge sisteme (generator, transformator, potrošač i dr.). Energetski kablovi koriste se najčešće u gradskim sredinama i na kraćim rastojanjima. Pri prenosu električne energije na velike udaljenosti kablovi najviših napona ne mogu parirati nadzemnim vodovima, prvenstveno zbog konstrukcijskih karakteristika i ekonomičnosti. Prednost kablova u odnosu na nadzemne vodove ogleda se u smanjenju utroška prostora i pre svega u sigurnosti prenosa električne energije [6-8].

Kako bismo pravilno izvršili odabir kablova u okviru nekog vetroparka, u ovom radu je korišćen softver DIGilentGmbH. DIGILENT je nezavisna softverska i konsultantska kompanija koja pruža visoko specijalizovane usluge u oblasti elektroenergetskih sistema za prenos, distribuciju, proizvodnju, industrijska postrojenja i obnovljive izvore energije. DIGILENT-ov inovativni portfolio proizvoda obuhvata PowerFactory, StationWare i sisteme za nadzor. PowerFactory je vodeći softver za analizu elektroenergetskog sistema koji pokriva čitav niz funkcionalnosti, od standardnih funkcija do visoko sofisticiranih i naprednih aplikacija. Za upravljanje zaštitom, DIGILENT nudi StationWare, centralnu bazu podataka postavki zaštite i sistem upravljanja imovinom i poslovnim procesima. Sa nadzornim sistemima, DIGILENT pruža multifunkcionalne merne sisteme. Monitoring elektroenergetskog sistema PFM300 sadrži nadzor mreže i postrojenja, snimanje kvarova, kvalitet električne energije i analizu karakteristika mreže. DIGILENT je sertifikovan prema standardu ISO 9001:2015 [1].

II METODOLOGIJA

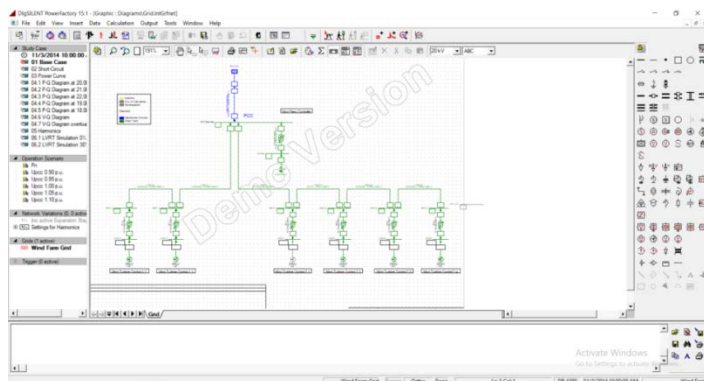
Na slici 1. su prikazani primeri koje softver DIGilent nudi kao gotove mreže. Odabrana je „Vetro farma” snage 15 MW, koja sadrži 6 vetroturbina i koja je priključena je na 20 kV distributivnu mrežu.



Slika 1. Primeri gotovih mreža [1]

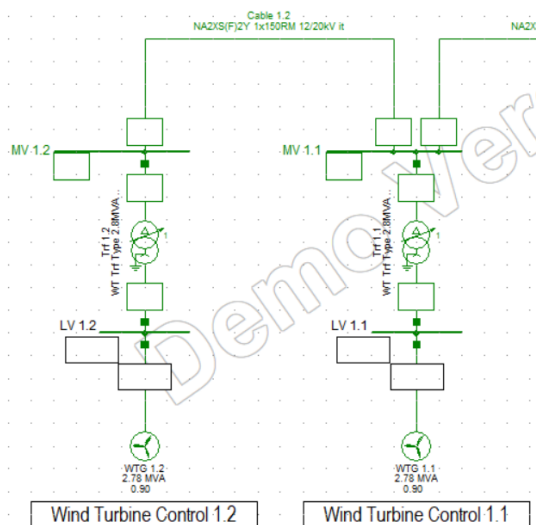
Šema odabrane mreže „Vetro farma” je prikazana na slici 2., kao

i različite vrste komandi (desni i gornji deo ekrana), radni list (centralni deo ekrana), pregled različitih projekata ili različitih radnih listova u okviru jednog projekta (levi deo ekrana).



Slika 2. Radno okruženje [1]

Na slici 3. prikazane su uvećane dve vetroturbine iz šeme koja se razmatra, a koje su međusobno povezane kablom poprečnog preseka 150 mm².



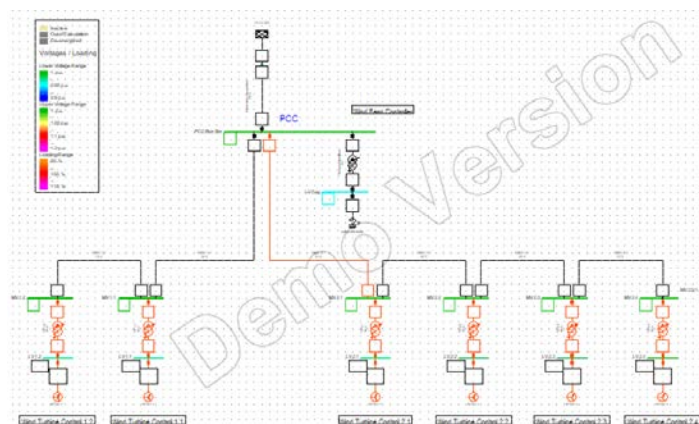
Slika 3. Uvećani prikaz vetroturbina [1]

II-1 Analiza šeme vetroparka u programu DigSilent

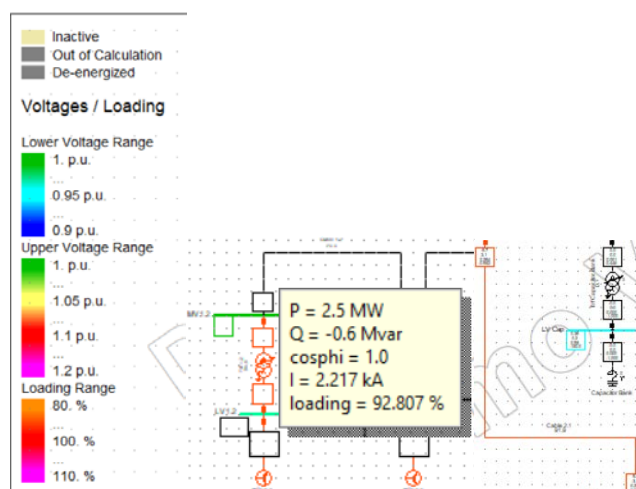
Posmatra se šema vetroparka sa šest vetroturbina. Na početku razmatranja svaka vetroturbina ima aktivnu snagu od $P=2,5$ MW, nominalnu prividnu snagu od $S=2,778$ MVA i faktor snage $\cos\phi=1$. Kablovi koji povezuju vetroturbine su poprečnog preseka 150 mm², dok je kabl koji ide ka mreži preseka 400 mm².

Proračun tokova snaga na početku razmatranja prikazan je na slici 4.

Nivo opterećenja se na šemi prikazuje različitim bojama, kao što je prikazano na slici 5. Kako je šema pretežno narandžaste boje, zaključuje se da se ima opterećenje od 92,807% na svakoj jedinici, prikazano na slici 5. Veliko opterećenje je takođe prisutno na kابلu oznake 2,1 od 91,9%.



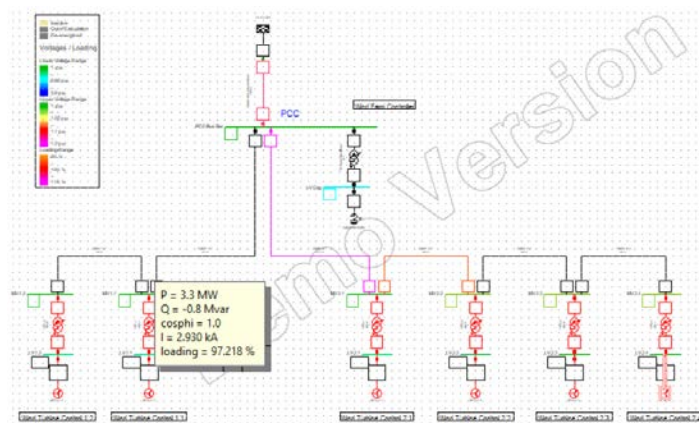
Slika 4. Proračun tokova snaga na početku razmatranja



Slika 5. Nivo opterećenja za slučaj $P=2,5$ MW

Sada se posmatra režim kada je snaga svih vetroturbina $P=3,3$ MW, dok je prividna snaga $S=3,5$ MVA. Kablovi su istog poprečnog preseka, kao u prethodnom slučaju. Sledeći izraz predstavlja vezu između snage vetroagregata i brzine vetra.

$$P = \frac{1}{2} \alpha \rho \pi r^2 v^3 \quad (1)$$



Slika 6. Proračun tokova snaga za režim 3,3 MW

Snaga P koja je prenet na rotor vetrogeneratora je proporcionalna površini koju pokriva rotor, gustini vazduha ρ , trećem stepenu brzine vazduha v , kao i faktoru iskorišćenja α .

Proračun tokova snaga je prikazan na slici 6. Zaključuje se da se sa povećanjem aktivne snage na svim turbinama, povećava i opterećenje, koje sada iznosi 97,218%.

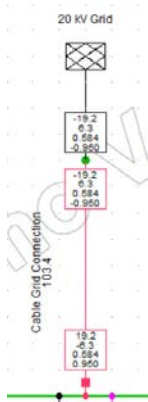
Kada su u pitanju kablovi, proračun prikazuje da je kabl oznake 2.1 obojen ljubičastom bojom, što znači da je opterećeniji nego u prethodno posmatranom slučaju, kada je bio narandžaste boje. Njegovo preopterećenje u ovom slučaju je 121,4%.

Za razliku od prethodnog slučaja, kada kabl oznake 2.2 nije bio opterećen, sada je prilično opterećen i to 90,8%. Preopterećenje je prikazano na slici 7.



Slika 7. Preopterećenje kablova za slučaj kada sve vetroturbine imaju $P=3,3$ MW

Preopterećenje se može primetiti i na kابلu koji povezuje vetropark sa 20 kV mrežom, čak 103,4%, prikazano na slici 8.



Slika 8. Nivo opterećenja za slučaj $P=3.3$ MW

Cilj ovog rada je pronaći optimalni presek kablova, tako da nigde u mreži nemamo preopterećenje kada agregati rade sa maksimalnom snagom.

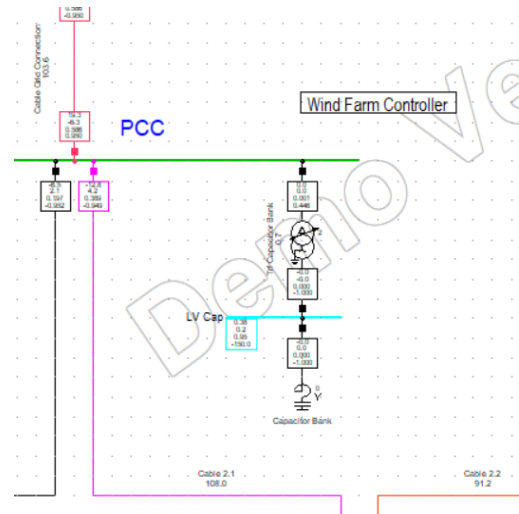
II-2 Odabir optimalnog preseka kablova

Kako bi se otklonilo preopterećenje u vetroparku, proizvoljno će biti izabran prvi veći presek kablova oznake 2.1, a to je 185 mm². Svi ostali parametri na šemi ostaju nepromenjeni. Proračun tokova snaga prikazan je na slici 9.

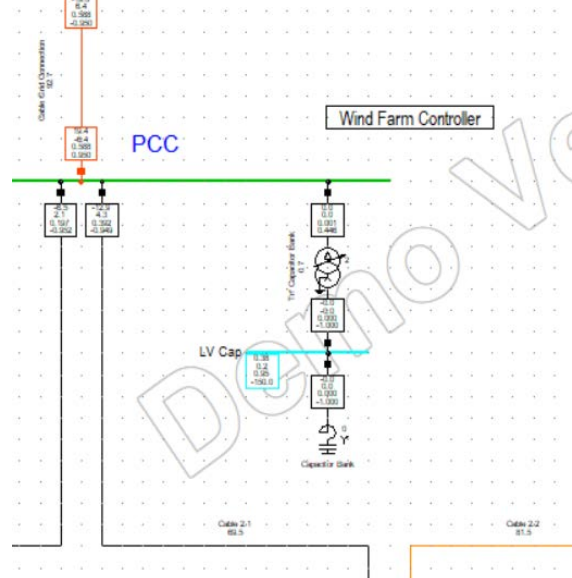
Proračun tokova snaga pokazuje da je kabl oznake 2.1 i dalje preopterećen, i to 108%, dok je kabl oznake 2.2 opterećen, ali u granicama dozvoljenog, 91,2%. Kabl koji povezuje vetropark sa mrežom ima preopterećenje od 103,6%.

S obzirom da kabl oznake 2.1 i dovodni kabl ne zadovoljavaju zadate uslove, biće izabrani veći poprečni preseki. Takođe će biti izabran veći poprečni presek kablova oznake 2.2, kako bi se opterećenje smanjilo. Za kabl oznake 2.1 to je 400 mm², za kabl

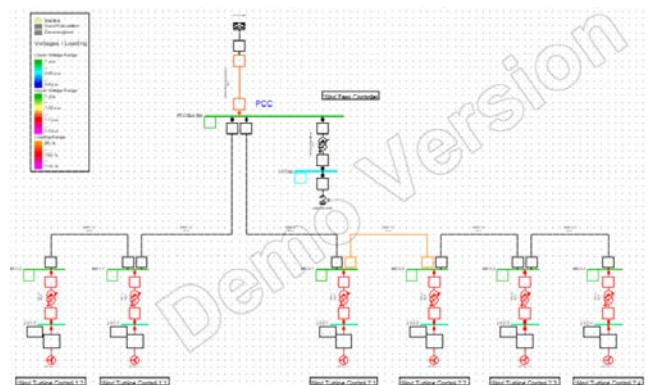
2.2 je 185 mm², a za dovodni kabl, koji je do sada bio preseka 400 mm², sada će biti 500 mm². Proračun tokova snaga prikazan je na slici 10.



Slika 9. Proračun tokova snaga



Slika 10. Proračun tokova snaga

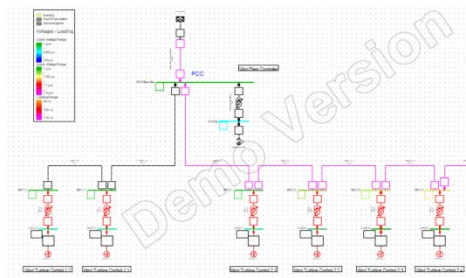


Slika 11. Šema celokupne mreže sa zadovoljavajućim parametrima

Uvođenjem većih poprečnih preseka, dobija se zadovoljavajuće rešenje. Kabl oznake 2.1 više nije preopterećen, njegovo opterećenje je sada 69,5%, kabl oznake 2.2 ima opterećenje od 81,5%, dok dovodni kabl takođe više nije preopterećen, već ima opterećenje od 92,7%.

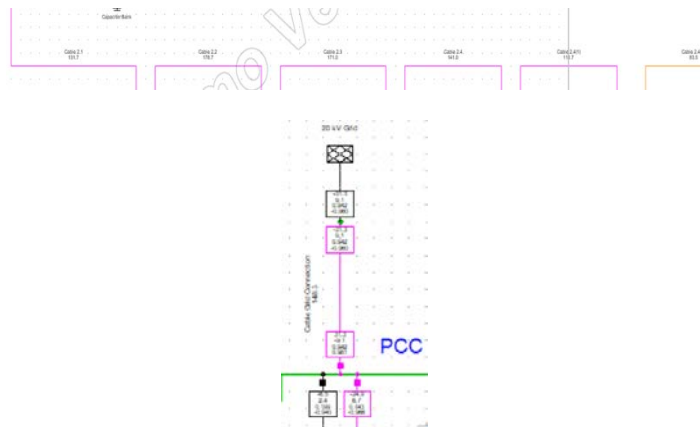
Šema celokupne mreže sa zadovoljavajućim parametrima data je na slici 11.

Sada se posmatra složenija šema sa još četiri vetroagregata istih karakteristika na slici 12.



Slika 12. Šema sa deset vetroagregata

Ovakva konfiguracija je dovela do toga da skoro svi kablovi budu preopterećeni, što se može videti na slici 13.



Slika 13. Nivo opterećenja za dodata četiri vetroagregata

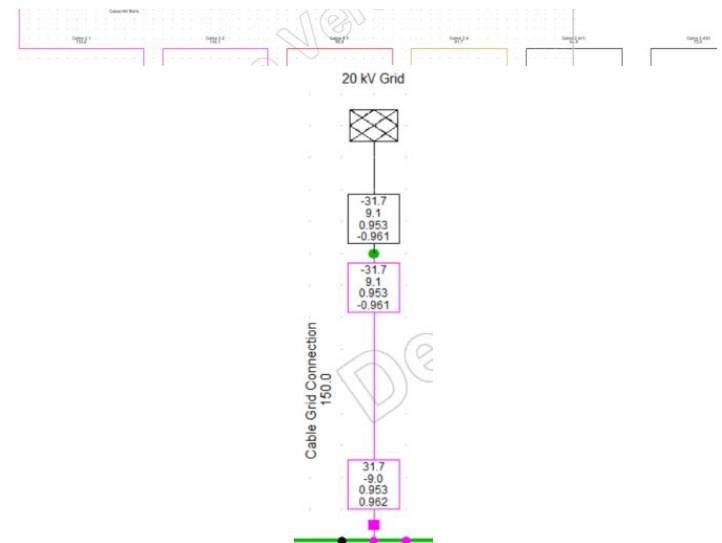
Na šemi sa slike 12 se vidi da su dodati vetroagregati narandžaste boje, što ukazuje na opterećenje manje nego kod agregata crvene boje koji rade sa maksimalnom snagom. Kao i do sada, cilj je pronalaženje optimalnog poprečnog preseka kablova, tako da mreža ne bude preopterećena.

U ovom slučaju opterećenja su iznosila: kabl 2.1 – 131,7%, kabl 2.2 – 178,7%, kabl 2.3 – 171%, kabl 2.4 – 141%, kabl 2.4(1) – 111,7%, kabl 2.4(2) – 83,5%, dovodni kabl – 148,3%.

II-3 Odabir optimalnog preseka kada su dodata četiri vetroagregata

Izabrani su sledeći poprečni preseki: kabl 2.1 – 400 mm², kabl 2.2 – 400 mm², kabl 2.3 – 400 mm², kabl 2.4 – 400 mm², kabl 2.4(1) – 400 mm², kabl 2.4(2) – 185 mm² (kako bi se smanjilo

opt), dovodni kabl – 500 mm².



Slika 14. Nivo opterećenja za dodata četiri vetroagregata sa optimalnim presekom kablova

Nakon proračuna tokova snaga, dobijene su sledeće vrednosti, slika 14.

U ovom slučaju opterećenja su iznosila: kabl 2.1 – 133,6%, kabl 2.2 – 116,1%, kabl 2.3 – 98,8%, kabl 2.4 – 81,7%, kabl 2.4(1) – 64,8%, kabl 2.4(2) – 75,9%, dovodni kabl – 150%.

Na osnovu proračuna tokova snaga, može se zaključiti da kablovi oznaka 2.1, 2.2, kao i dovodni kabl, ne zadovoljavaju uslov u pogledu opterećenja. Kabl oznake 2.3 je opterećen blizu gornje granice, te će se uzeti u razmatranje, kako bi se smanjilo opterećenje.

Kako program ne nudi veće poprečne preseke od 500 mm², za dovodni kabl izabrana su dva paralelna kabla od 400 mm², a to je takođe primenjeno i na kablove oznaka 2.1 i 2.2. Za kabl oznake 2.3 izabran je poprečni presek od 500 mm².

Od samog početka proračuna proizvoljno je izabrano da kablovi budu položeni u kanalu direktno u zemlji, na dubini od 1m, raspoređeni horizontalno, u veoma vlažnoj sredini.

Nakon proračuna tokova snaga, dobijena su opterećenja prikazana na slici 15.

U ovom slučaju opterećenja su iznosila: kabl 2.1 – 67,2%, kabl 2.2 – 58,5%, kabl 2.3 – 89,3%, dovodni kabl – 84,6%.

Zaključuje se da su izabrani preseki zadovoljavajuće rešenje problema.

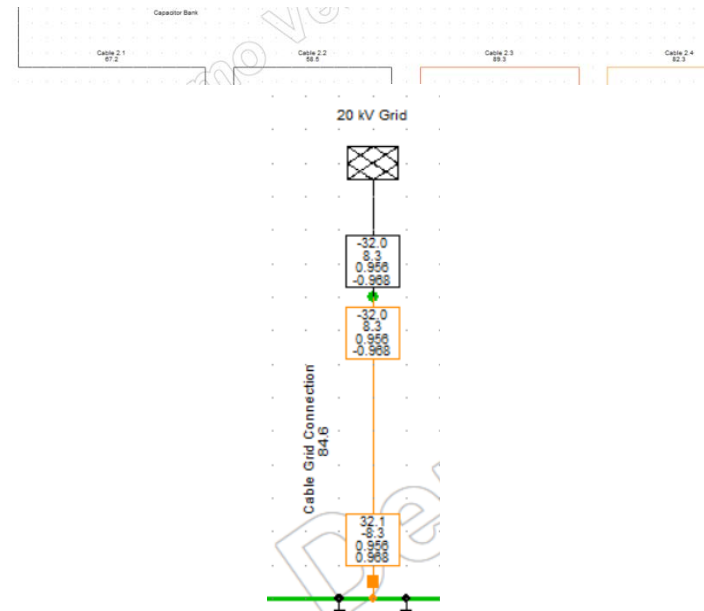
Međutim, pokazano je da je opterećenje dovodnog kablova zadovoljavajuće, ali ipak prilično veliko (84,6%).

Razmotriće se alternativno rešenje.

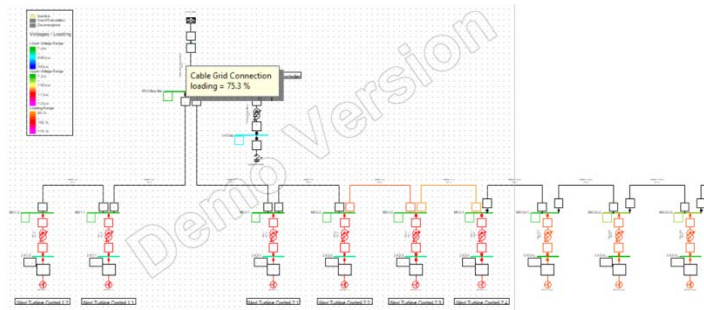
Alternativno rešenje je povećan poprečni presek koji podrazumeva dva paralelna kabla od 500 mm².

Proračun tokova snaga prikazan je na slici 16. Opterećenje

dovodnog kabla je 75.3%, što i jeste manje nego u prethodno posmatranom slučaju na slici 15.



Slika 15. Nivo opterećenja nakon proračuna tokova snaga



Slika 16. Proračun tokova snaga za slučaj sa dva paralelna dovodna kabla od 500 mm²

Rezultati su prikazani u tabelama. Tabela 1 prikazuje vrednosti posmatrane do momenta priključenja četiri dodatna agregata, dok tabela 2 uvažava prisutnost dodatnih agregata.

Tabela 1. Dobijene vrednosti do momenta priključenja 4 agregata

Opterećenje [%] / Opis konfiguracije	Dovodni kabl	Kabl 2.1	Kabl 2.2
P=2.5MW S=2.778MVA Svi kablovi 150 mm ²	Vrednost zadovoljavajuća, nije od značaja	91,9	Vrednost zadovoljavajuća, nije od značaja
P=3.3MW S=3.5MVA Svi kablovi 150 mm ²	103,4	121,4	90,8
Kabl 2.1 185 mm ²	103,6	108	91,2

Dovodni 500 mm ² 2.1 - 400mm ² 2.2 - 185mm ²	92,7	69,5	81,5
---	------	------	------

Tabela 2. Dobijene vrednosti od momenta priključenja 4 agregata

Opterećenje [%] / Opis konfiguracije	Dovodni kabl	Kabl 2.1	Kabl 2.2	Kabl 2.3	Kabl 2.4	Kabl 2.4(1)	Kabl 2.4(2)
Još 4 agregata Dovodni 500 mm ² 2.1 - 400mm ² 2.2 - 185mm ²	148,3	131,7	178,7	171	141	111,7	83,5
Dovodni 500 mm ² od 2.1 do 2.4(1)- 400mm ² 2.4(2) - 185mm ²	150	133,6	116,1	98,8	81,7	64,8	75,9
Dovodni 2x400 mm ² u zemlji 2.1-2x400 mm ² 2.2-2x400 mm ² 2.3-500 mm ²	84,6	67,2	58,5	89,3	82,4	64,8	75,9
Dovodni 2x500 mm ² u zemlji	75,3	67,2	58,5	89,3	82,4	64,8	75,9

III ZAKLJUČAK

Stalni napredak čovečanstva u sferama nauke sve više osavremenjuje elektroenergetske sisteme, omogućavajući da se isprati trend rasta potrošnje, poveća pouzdanost mreža i konačno obrati pažnja na sve popularniju i zastupljeniju zaštitu životne sredine. Takođe, stalni tehnološki razvoj nudi sve veći broj softverskih alata pomoću kojih je moguće analizirati probleme u vezi sa energetske kablovima. Jedan od njih je i DigSilent, koji je korišćen za proračune u ovom radu.

Što se softverskog alata tiče, njegovo korišćenje je prilično jednostavno, pregledan je korisnički interfejs i brzo se dobijaju potrebni rezultati. Treba napomenuti da je prilikom analize u ovom radu samo deo podataka preuzet iz programa, da on pored njih daje uvid u mnogo detaljniju analizu svih procesa vezanih za energetske kablove i sisteme. Stoga se treba nadati da će u skladu sa stalnim napretkom tehnologije ovakvi softveri postati dostupniji, precizniji i još jednostavniji, jer mogu značajno olakšati inženjerski rad.

Na osnovu dobijenih rezultata proračunom tokova snaga zaključak je da se za veća opterećenja moraju birati veći poprečni preseki kablova. Na opterećenje, pored poprečnog preseka, utiče i broj paralelno vođenih kablova, kao i mesto polaganja kabla. Na opterećenje čitave mreže utiče broj priključenih vetroagregata, kao i njihova snaga.

U ovom radu posmatran je slučaj kada svi vetroagregati rade istom maksimalnom snagom i smatra se da, ukoliko svi kablovi mogu da podnesu takvo opterećenje, moći će bez problema da podnesu i manje opterećenje, kada su neki agregati isključeni ili

ne daju maksimalnu snagu, u slučajevima sa nešto slabijim vetrom.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Power System Software & Engineering. <https://www.digsilent.de/en/> [pristupljeno 14.02.2024]
- [2] Đurišić, Ž. *Vjetroelektrane*, Beograd, Elektrotehnički fakultet, 2015.
- [3] Kuzman, M., Grujić, D. Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetske tranziciji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 1, pp. 40-50, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.64R>
- [4] Strezoski, L. Sistemi za upravljanje distribuiranim energetske resursima: stanje u oblasti, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 24-29, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.24S>
- [5] Đukić, P., Đukanović, S. Konfuzija u energetske tranziciji – svet i Srbija danas, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 17-23, 2023.
- [6] Nikolajević, S.V. *Kablovska tehnika*, Beograd, JP Službeni list SRJ, 2007.
- [7] Tasić, D.S. *Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike*, Niš, Elektronski fakultet, 2001.
- [8] Nikolajević, S., *Kablovska Tehnika*, JP Službeni list SRJ, Beograd 2007.

AUTORI/AUTHORS

Mina Stefanović, dipl. inž. el. i rač, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, stefanovicmina.97@gmail.com, ORCID [0009-0006-1674-1921](https://orcid.org/0009-0006-1674-1921)
dr Iva Batić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, iva@etf.rs, ORCID [0000-0003-0150-3235](https://orcid.org/0000-0003-0150-3235)
dr Tomislav Rajić, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, rajic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4796-4117](https://orcid.org/0000-0003-4796-4117)

The Cable Selection Methods in Wind Farms Using Software

Abstract – Given that wind power plants belong to renewable energy sources and that the world is paying more and more attention to the emission of harmful substances by thermal power plants, we are witnessing that renewable energy sources, and therefore also wind farms, are experiencing increasing development in recent years. Having the tendency of rapid development in the future, as well as the possibility of surpassing conventional energy sources, the subject of examination of this paper will be wind farms, that is, the method of their cable connection.

Cables are an indispensable part of the power system and serve to transmit electricity to end consumers. The calculation of the power flows in the software will be shown in different situations, based on which the cable selection will be made.

Index Terms – Wind power plants, Cables, Current ampacity