

Troškovi angažovanja vetroelektrana za pružanje reaktivne podrške elektroenergetskom sistemu

Željko Đurišić, Kristina Lazović, Đorđe Lazović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Srbija

djurisic@etf.rs, kristinadz@etf.rs, lazovic@etf.rs

Milica Aščerić

Go2Power, doo
Beograd
Srbija

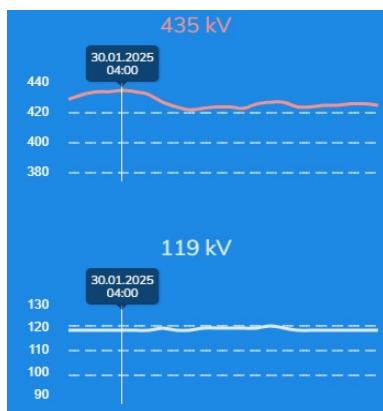
milica.asceric@go2power.eu

Sažetak—U ovom radu analizirani su troškovi angažovanja vetroelektrana u pružanju usluga generisanja i apsorbovanja reaktivne snage u priključnoj tački na prenosnoj mreži. Procena troškova je izvršena na osnovu sagledavanja uticaja reaktivne podrške na gubitke aktivne snage u internoj mreži vetroelektrane. Proračuni su urađeni korišćenjem podataka o snagama proizvodnje vetroagregata u vetroelektrani Čibuk 1 u Južnom Banatu.

Ključne reči - reaktivna snaga; naponska regulacija; vetroelektrana; gubici

I. UVOD

Kako je izvesno da će kapaciteti zasnovani na obnovljivim izvorima energije (OIE) višestruko porasti u narednom periodu, za očekivati je da će postojati potreba da i oni daju svoj doprinos u pogledu pružanja pomoćnih usluga regulacije napona i frekvencije u elektroenergetskom sistemu. Sa druge strane, prenosne mreže u mnogim elektroenergetskim sistemima se suočavaju sa previsokim naponima. Na slici 1 ilustrovani su naponski profili u čvorištu TS Vranje 400/110 kV za dan kada je ovaj rad finalizovan [1].



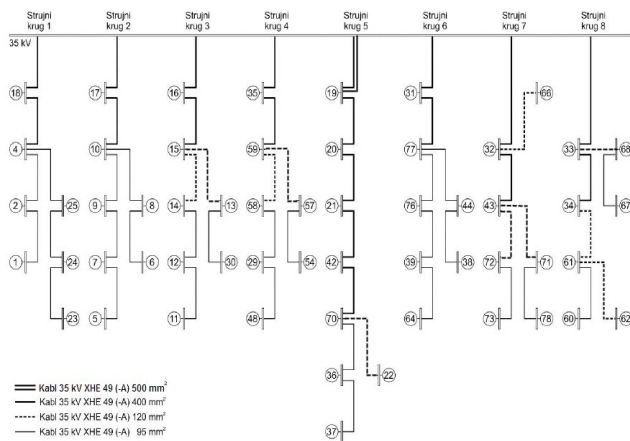
Sl. 1: Naponski profil u TS 400/110 kV Vranje na dan 30.1.2025. [1]

Regulacija napona u prenosnoj mreži zahteva regulaciju reaktivnih snaga injektiranja u čvorištima prenosne mreže. Zbog problema previsokih napona u sistemima se ugrađuju

regulacione otočne prigušnice što iziskuje visoke troškove. Predmet razmatranja ovog rada je analiza troškova pružanja pomoćnih usluga naponske regulacije od strane vetroelektrana (VE) velikih snaga koje su priključene na prenosnu mrežu. U istraživanjima [2,3], pokazano je da perspektivne vetroelektrane u Srbiji mogu imati značajan kapacitet za regulaciju napona u prenosnoj mreži. Standardna oprema vetroagregata ima mogućnost generisanja i apsorbovanja reaktivne snage, tako da nisu potrebne dodatne investicije u opremu za obezbeđivanje reaktivne podrške od strane vetroelektrana. Osim toga, vetroelektrane su disperzovane u elektroenergetskom sistemu i njihova prostorna alokacija obezbeđuje mogućnost regulacije napona u svim prključnim čvorištima EES-a. Troškovi reaktivne podrške EES-u od strane VE su pre svega povezani sa povećanjem gubitaka u elementima elektrane zbog povećanja strujnog opterećenja tih elemenata pri apsorbovanju i generisanju reaktivne snage. Zbog nelinearne veze između gubitaka i strujnog opterećenja, specifični troškovi reaktivne podrške (troškovi po Mvar) nisu fiksni, jer gubici zavise od reaktivne i aktivne snage injektiranja u EES-u. S obzirom na to da se infrastruktura vetroelektrana razlikuje od elektrane do elektrane, razlikovaće se i specifični gubici koje generiše reaktivna podrška za svaku elektranu. Da bi se procenila cena koštanja reaktivne podrške vetroelektrana u ovom radu su analizirani dostupni podaci o infrastrukturi realne VE i realni merni podaci o njihovoj proizvodnji.

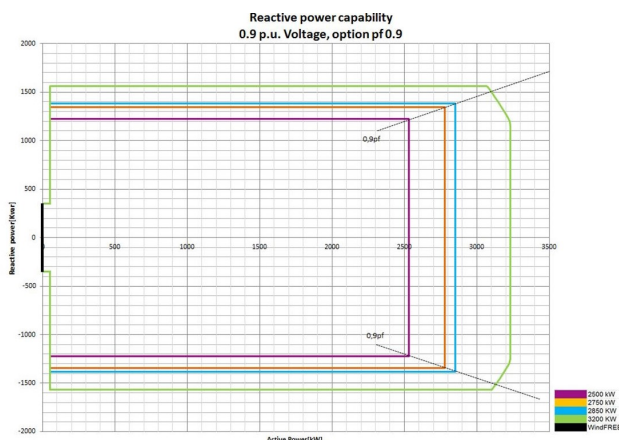
II. PROCENA GUBITAK U INFRASTRUKTURI VETROELEKTRANA

Procena troškova reaktivne podrške vetroelektrana je izvršena na osnovu analize gubitaka u internoj mreži VE Čibuk 1. Ova vetroelektrana se nalazi u Južnom Banatu, na teritoriji opštine Kovin, nalazi se u blizini sela Dolovo i Mramorak. Realizovana je sa 57 vetroagregata GE 120 - 2.78 MW, tako da je ukupna instalisana snaga elektrane 158,5 MW. Na slici 2 prikazana je topološka šema kolektorskih 35 kV kablovskih veza unutar VE Čibuk 1. Vetroelektrana je priključena na prenosnu 400 kV mrežu preko dva energetska transformatora 400/35/35 kV.



Sl. 2: Topološka šema veza kolektorske 35 kV kablovske mreže VE Čibuk 1

Vetroagregati u VE Čibuk 1 su opremljeni sa dvostrano napajanjem asinchronom mašinom sa pretvaračem u rotorskom kolu. Generisanje i apsorbovanje reaktivne snage mogu pružati u skladu sa pogonskom kartom, koja je prikazana na slici 3, [4]. Analizirani vetroagregat ima mogućnost reaktivne podrške od ± 1350 kvar u celokupnom opsegu rada vetroagregata. Pored raktivne podrške u operativnom radu vetroturbine, vetroagregat ima mogućnost podrške i u takozvanom *wind free* modu, kada je vetroturbina zaustavljena zbog slabog ili prejakog vetra. Analizirani vetroagregat može pružati podršku od ± 350 kvar u režimu kada je vetroturbina zaustavljena. Treba napomenuti da je pogonska karta prikazana na slici 3 data za nominalni napon na priključcima vetroagregata. Promene raspoloživog kapaciteta reaktivnog generisanja za različite napone na priključcima agregata se mogu naći u tehničkoj specifikaciji proizvođača, [4].



Sl. 3: Pogonske karte vetroagregata GE -3MW platforma, [4]

Za potrebe proračuna gubitaka u internoj infrastrukturi vetroelektrane, od operatora VE Čibuk 1 pribavljeni su podaci o srednjim desetominutnim snagama proizvodnje na pragu svakog od vetroagregata u VE Čibuk 1 za 2023. godinu i snage injektiranja u čvorištu priključne tačke na prenosnu

mrežu. Usrednjavanjem podataka dobijene su srednje satne vrednosti snaga proizvodnje na pragu vetroagregata i korespondentnih srednjih satnih snaga proizvodnje na pragu VE Čibuk 1. Na osnovu ovih podataka utvrđene su srednje satne vrednosti snage gubitaka u internoj mreži VE, shodno relaciji:

$$P_{\gamma_i} = P_{\Sigma_i} - \sum_{k=1}^{57} P_{k_i} \quad (1)$$

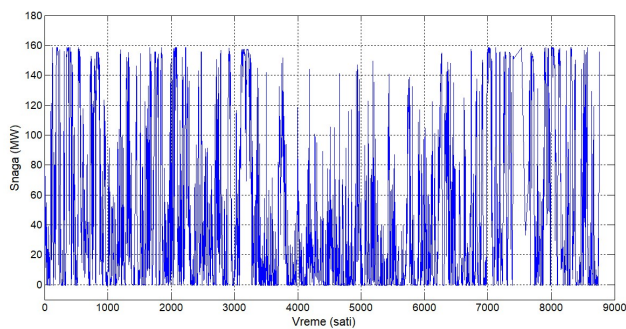
gde su:

P_{Σ_i} – aktivna snaga injektiranja u tački priključenja vetroelektrane na prenosnu mrežu u satu i ,

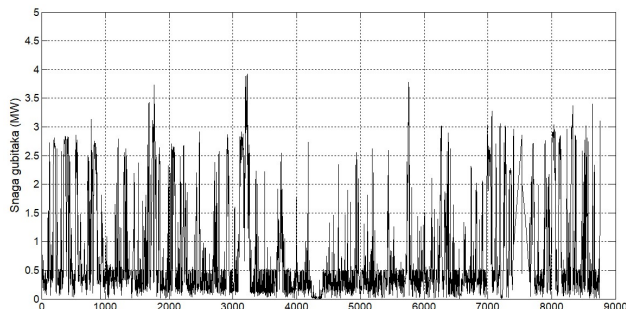
P_{k_i} – aktivna snaga proizvodnje na priključcima vetroagregata k u satu i ,

P_{γ_i} – aktivna snaga gubitaka u internoj infrastrukturi vetroelektrane u satu i .

Na slici 4 prikazane su srednje satne snage proizvodnje u tači priključenja na prenosnu mrežu, dok su na slici 5 prikazane srednje satne snage gubitaka u internoj mreži VE Čibuk 1. Na osnovu raspoloživih podataka utvrđeni su godišnji Džulovi gubici u analiziranoj vetroelektrani i oni iznosi 1,57% od ukupne neto energije.

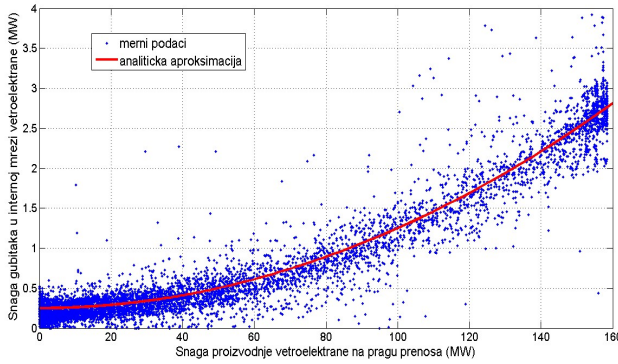


Sl. 4: Srednje satne snage proizvodnje VE Čibuk 1 na pragu prenosa



Sl. 5: Srednje satne snage gubitaka u internoj mreži VE Čibuk

Na osnovu izmerenih srednjih satnih snaga proizvodnje i proračunatih gubitaka, prema relaciji (1), na slici 6 je prikazana zavisnost gubitaka u internoj mreži VE Čibuk 1 od aktivne snage injektiranja u prenosnu mrežu.



Sl. 6: Zavisnost gubitaka u internoj mreži VE Čibuk 1 od aktivne snage injektiranja u prenosnu mrežu i odgovarajuća aproksimaciona funkcija

Fitovanjem podataka proračunatih gubitaka utvrđeno je da se funkcija gubitaka može opisati kvadratnom jednačinom oblika:

$$P_{\gamma} = 0,250 + 0,0001P_{\Sigma}^2 \quad [\text{MW}] \quad (2)$$

Gubici u internoj infrastrukturi se odnose na gubitke snage u priključnom transformatoru, kablovskoj mreži, blok transformatorima u vetroagregatima i pretvaraču. Slobodni član u relaciji (2) predstavlja gubitke u gvozdju transformatora, kao i sopstvenu potrošnju vetroagregata. Gubici u transformatorima i kablovskoj mreži se mogu modelovati sa odgovarajućom pogonskom rezistansom i oni imaju kvadratnu zavisnost od struje. Gubici u pretvaraču imaju, pored kvadratnog i linearni član, [5]. U relaciji (2) nije sadržan linearni član, razlog je to što se merenja snaga na pragu agregata sprovode posle pretvarača, tako da gubici proračunati relacijom (2) ne sadrže gubitke u pretvaraču.

S obzirom na to da reaktivna podrška kod vetroelektrana zahteva opterećenje pretvarača, neophodno je uračunati i ove gubitke. Kod savremenih multimegavatskih vetroagregata efikasnost konvertera je u opsegu 98 – 99 %, u zavisnosti od opterećenja, [6]. U ovoj analizi biće pretpostavljeno da pretvarač radi sa prosečnom efikasnošću od 98,5%. Uvažavajući ovu pretpostavku, ukupni gubici u vetroelektrani, koji su merodavni za analizu troškova reaktivne podrške, se mogu predstaviti sledećom funkcijom:

$$P_{\Sigma\gamma} = 0,250 + 0,015P_{\Sigma} + 0,0001P_{\Sigma}^2 \quad [\text{MW}], \quad (3)$$

gde je $P_{\Sigma\gamma}$ aktivna snaga ukupnih gubitaka u internoj infrastrukturi vetroelektrane sa uvažanim gubicima u pretvaraču.

III. PROCENA SPECIFIČNIH GUBITAKA USLED REAKTIVNE PODRŠKE VETROELEKTRANA

Kada je vetroelektrana u režimu reaktivne podrške, onda se gubici aktivne snage povećavaju i to predstavlja osnovni trošak generisanja/apsorbovanja reaktivne snage. Gubici pri reaktivnoj podršci se mogu predstaviti istom funkcijom kao i

pri $\cos\varphi=1$, relacija (3), ali su oni u tom slučaju zavisni od prividne snage:

$$P_{\Sigma\gamma} = 0,250 + 0,015S_{\Sigma} + 0,0001S_{\Sigma}^2 \quad [\text{MW}], \quad (4)$$

gde je S_{Σ} – ukupna prividna snaga na priključcima vetroagregata ($S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}$).

Treba napomenuti da relacija (4) se odnosi na pretpostavku da celokupna prividna snaga vetroagregata prolazi kroz pretvarač. Ta pretpostavka je tačna za vetroagregate sa pretvaračem pune snage, međutim, kod vetroagregata sa dvostrano napajanom indukcionom mašinom najveći deo aktivne i celokupna reaktivna snaga se predaje direktno sa statorskog namota mašine, dok manji deo snage prolazi kroz pretvarač, koji se nalazi u rotorskom kolu. Ova specifičnost nije posebno analizirana, s obzirom na to indukciona mašina ima sličnu efikasnost kao pretvarač, tako da zaključci ove analize mogu biti, u kvalitativnom smislu, prihvatljiviji i za vetroagregate sa dvostrano napajanom indukcionom mašinom.

Priraštaj gubitaka usled reaktivne podrške vetroelektrane ($\Delta P_{\Sigma\gamma}$) mogu se proceniti tako što se od relacije (4) oduzme relacija (3), tako da se dobija:

$$\Delta P_{\Sigma\gamma} = 0,015 \left(\sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2} - P_{\Sigma} \right) + 0,0001Q_{\Sigma}^2. \quad (5)$$

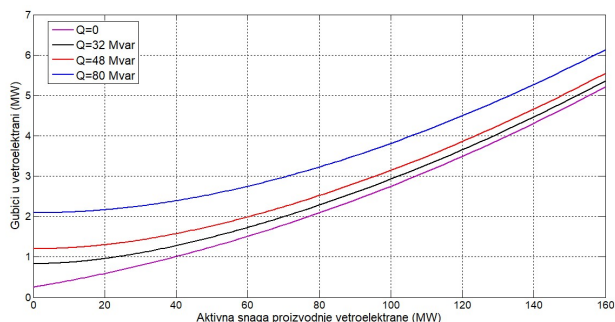
S obzirom na to da se aktivna snaga proizvodnje menja sa promenom brzine vetra, gubici usled generisanja reaktivne snage neće imati istu vrednost pri različitim brzinama vetra. Odnosno, priraštaj gubitaka po jedinici generisanja ili apsorbovanja reaktivne snage vetroagregata zavisi od aktivne snage generisanja u analiziranom satu, shodno relaciji:

$$\Delta p_{\Sigma\gamma} = \frac{\Delta P_{\Sigma\gamma}}{Q_{\Sigma}} = 0,015 \left(\sqrt{\frac{P_{\Sigma}^2}{Q_{\Sigma}^2} + 1} - \frac{P_{\Sigma}}{Q_{\Sigma}} \right) + 0,0001Q_{\Sigma} \quad (6)$$

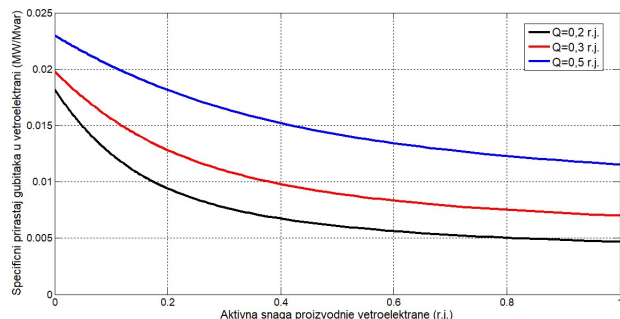
$\Delta p_{\Sigma\gamma}$ su specifični gubici usled reaktivne podrške i izražavaju se u MW/Mvar.

Za razliku od invertorskih jedinica kod fotonaponskih elektrana, kod vetroelektrana reaktivnu snagu je moguće injektirati/apsorbovati i pri nominalnoj aktivnoj snazi, kao što je prikazano na primeru pogonske karte prikazane na slici 3. Proizvođači vetroagregata opcionalno nude mogućnost rada sa faktorom snage $\cos\varphi=0,95$ ili $\cos\varphi=0,9$ pri nominalnoj aktivnoj snazi generisanja.

Uvažavajući relaciju (5) izvršena je procena snage gubitaka VE Čibuk 1 za različitu reaktivnu snagu generisanja/apsorbovanja. Na slici 7 prikazani su rezultati proračuna. Da bi se mogli dati generalni zaključci u pogledu uticaja reaktivne podrške na gubitke u internoj mreži vetroelektrane sproveden je proračun specifičnih gubitaka usled reaktivne podrške u funkciji aktivne snage generisanja vetroelektrane, shodno relaciji (6). Rezultati proračuna su prikazani na slici 8.



Sl.7: Zavisnost gubitaka u AC mreži VE Čibuk 1 od aktivne snage injeckiranja u prenosnu mrežu za različite snage reaktivne podrške sistemu



Sl. 8: Promena specifičnih gubitaka usled reaktivne podrške u funkciji relativne snage proizvodnje VE Čibuk 1

Na osnovu familije krivih prikazanih na slici 8, može se zaključiti da se specifični gubici usled reaktivne podrške referentne vetroelektrane kreću između 0,005 i 0,022 MW/Mvar u zavisnosti od vrednosti aktivne i reaktivne snage vetroelektrane. Najmanji specifični gubici su pri manjim reaktivnim snagama i većim aktivnim opterećenjima.

U prethodnim analizama u obzir je uzeta samo reaktivna snaga koju generišu/apsorbuju vetroagregati dok reaktivna snaga kablovskih vodova i transformatorskih jedinica nije uračunata. Ove komponente mogu poboljšati reaktivnu podršku pri većim snagama generisanja elektrana i smanjiti troškove u slučaju kada se zahteva apsorbovanje reaktivnih snaga, što je praktično i najpotrebnija pomoćna usluga, tako da prethodne analize idu na stranu sigurnosti u tom pogledu.

Komponenta reaktivne podrške od priključnih transformatora direktno zavisi od vrednosti reaktanse rasipanja, odnosno napona kratkog spoja transformatora. Na primer, ako je napon kratkog spoja transformatora 16%, onda će pri svim režimima rada elektrane sam transformator doprinosti u reaktivnoj podršci (apsorbovanju reaktivne snage) prenosnoj mreži sa dodatnih 16% od prividne snage elektrane.

IV. ZAKLJUČAK

Vetroelektrane poseduju značajan kapacitet za reaktivnu podršku elektroenergetskom sistemu koji se mogu ostvariti sa relativno niskim troškovima. U ovom radu procenjeno je da su ti troškovi u opsegu 0,005 do 0,022 MWh/Mvarh, u zavisnosti

od vrednosti aktivne i reaktivne snage vetroelektrane. Apsorbovanje reaktivne snage može biti pomognuto od strane reaktansi elemenata interne mreže vetroelektrane, pre svih glavnog transformatora, što je naročito izraženo pri većim aktivnim snagama generisanja. Sa druge strane, generisanje reaktivne snage može biti značajno skuplje za operatora elektrane jer je potrebno u ovom režimu da vetrogeneratorske jedinice pokriju potrošnju reaktivne snage priključnog transformatora i reaktansi interne mreže. Ovaj zahtev često mora biti obezbeđen ugradnjom kondenzatorskih baterija i može predstavljati značajan investicioni trošak pri izgradnji elektrane. Potreba za generisanjem reaktivne snage u uslovima maksimalnog generisanja aktivne snage u sistemu se praktično neće nikada javiti u normalnim pogonskim uslovima, pa je potrebno razmotriti opravdanost ovakvog zahteva u Pravilima o radu prenosnog sistema [7].

ZAHVALNICA

Istraživanje je finansijski pomogla kompanija Elektromreža Srbije AD i Ministarstvo nauke Republike Srbije. Zahvaljujemo se kompaniji Tesla Wind koja nam je ustupila merne podatke o proizvodnji VE Čibuk 1.

LITERATURA

- [1] <https://ems.energyflux.rs/voltage-profiles>, pristupljeno 31.1.2025.
- [2] T. Šiljegović, M. Žerajić, K. Džodić, Ž. Đurišić, Analiza potencijala vetroelektrana za regulaciju napona u delovima prenosne mreže Srbije sa kritičnim naponskim prilikama, 36. Savetovanje CIGRE Srbija, maj 2023. DOI: 10.46793/CIGRE36.1163S
- [3] T. Šiljegović, M. Žerajić, Ž. Đurišić, Analiza uticaja integracije vetroelektrana na kritične naponske režime u prenosnoj mreži, 36. Savetovanje CIGRE Srbija, maj 2023. DOI: 10.46793/CIGRE36.0470S
- [4] Technical Documentation Wind Turbine Generator Systems 3 MW Platform – Grid Interconnection, General Electric, 2015.
- [5] S. Vlahinić, D. Franković, V. Komen, A. Antonić, Reactive Power Compensation with PV Inverters for System Loss Reduction, Energies 2019, 12, 4062; doi:10.3390/en12214062
- [6] W. Kitagawa, T. Thiringer, Inverter Loss Analysis and Comparison for a 5 MW Wind Turbine System, EPE'17 ECCE Europe ISBN: 9789075815276
- [7] Elektromreža Srbije a.d., „Pravila o radu prenosnog sistema“, „Službeni glasnik RS“ broj: 88/16, Mart, 2020.

ABSTRACT

In this paper, the costs of engaging wind power plants in the provision of reactive power generation and absorption services at the connection point on the transmission network are analyzed. The cost assessment was carried out based on the consideration of the impact of reactive support on active power losses in the wind power plant's internal network. The calculations were made using the data on the production power of wind turbines in the Čibuk 1 wind farm in South Banat.

COSTS OF ENGAGING WIND FARMS TO PROVIDE REACTIVE SUPPORT TO THE POWER SYSTEM

Ž. Đurišić, K. Lazović, Đ. Lazović, M. Aščerić