

DVOSTRANO NAPAJANA ASINHRONA MAŠINA PRIMENJENA U VETROGENERATORIMA

Željko Đurišić, Nemanja Krajišnik, Dragan Božović¹

Ključne reči: energija vetra, vetroturbina, dvostrano napajana asinhrona mašina

SAŽETAK:

U radu je analiziran poseban tip asinhronne mašine koji je postao veoma primenjivan u savremenim sistemima za generisanje energije iz stohastičkih izvora, kakav je pre svih vetar. Stohastičnost vetra i težnja ka maksimumu iskorišćenja njegove energije zahtevaju rad vetroturbine sa promenljivom brzinom. Takav rad otežava zadovoljenje tehničkih kriterijuma rada vetrogeneratora na krutu električnu mrežu. Dvostrano napajana asinhrona mašina se pokazala kao rešenje koje može zadovoljiti takve uslove elektromehaničke konverzije. Nakon objašnjenja osnovnih strategija regulacije, u radu je objašnjen princip dvostranog napajanja asinhronne mašine i njen rad na električnu mrežu. Na kraju je data pogonska karta vetrogeneratora za realne uslove eksploatacije.

1. UVOD

Vetar predstavlja neiscrpan ekološki izvor energije čiji globalni potencijal višestruko prevazilazi svetske potrebe za električnom energijom [1]. Međutim, pouzdana i ekonomski prihvatljiva konverzija mehaničke energije vetra u električnu energiju je prućena nizom poteškoća koje su posledica stohastičnosti vetra i njegove male gustine (fluksa) snage. U poslednjoj deceniji, razvojem energetske elektronike i upotrebom novih materijala, mnogi problemi su tehnički rešeni, pa je vetroenergetika postala oblast energetike sa najvećim trendom razvoja [2].

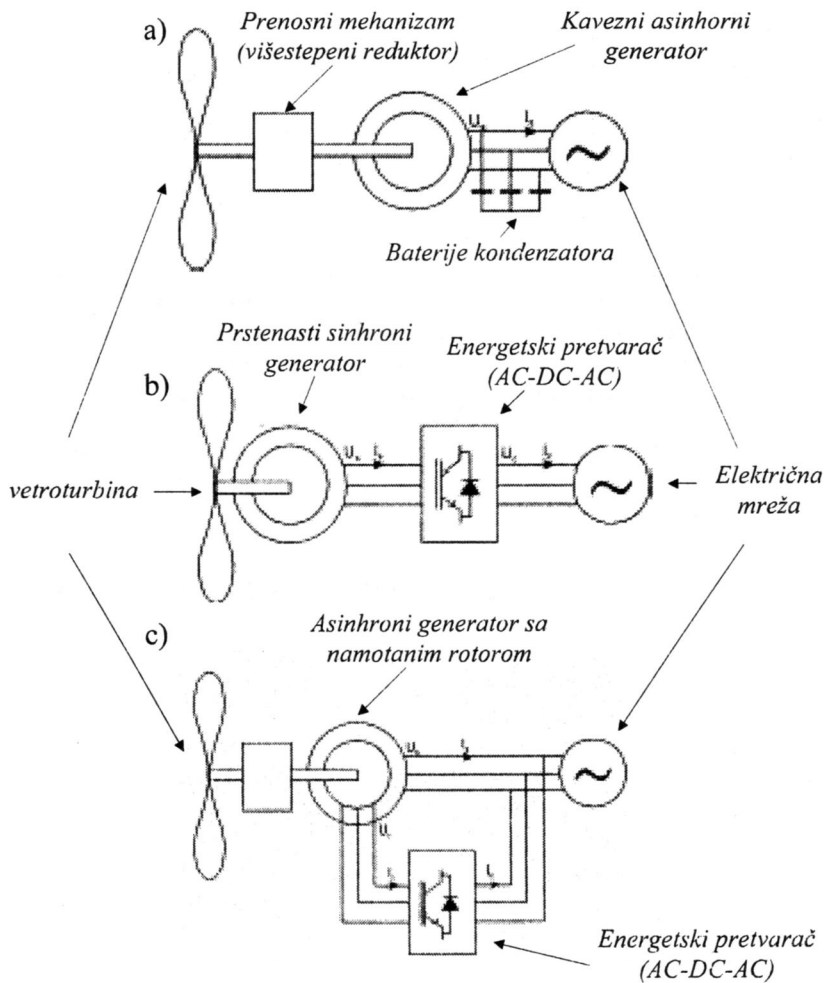
Osnovni problem koji se javlja pri konverziji kinetičke energije vetra u električnu je obezbeđenje pouzdanog i efikasnog rada generatora na električnu mrežu u uslovima promenljive snage vetra. Efikasan rad vetrogeneratora podrazumeva prilagođavanje vetroturbine brzini vetra tako da se elektromehanička konverzija odvija sa maksimalnim stepenom iskorišćenja. Sa druge strane, u uslovima velike varijacije brzine vetra, javlja se

¹ Željko Đurišić, dipl.inž.el., *Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 11000 Beograd*
Nemanja Krajišnik, dipl.inž.el., *Elektroprivredni koordinacioni centar, Vojvode Stepe 412, Beograd*
Dragan Božović, dipl.inž.el., *Elektrodistribucija Budva, 86000 Budva*

problem zadovoljenja svih tehničkih kriterijuma u pogledu generisanja električne energije u elektroenergetski sistem (varijacije napona, nivo harmonika i slično).

2. KONCEPTI KONVERZIJE ENERGIJE VETRA U ELEKTRIČNU

Da bi se obezbedio efikasan i pouzdan rad vetrogeneratora primenjuju se različita rešenja. Tipične konfiguracije konverzionih sistema vetrogeneratora prikazane su na slici 1.



Slika 1. Različiti koncepti vetrogeneratorskih postrojenja priključenih na električnu mrežu

Na slici 1-a prikazan je koncept vetroturbine sa kaveznim asinhronim generatorom direktno spregnutim na električnu mrežu. Ovaj koncept je zastupljen kod vetrogeneratora male snage i odlikuje se robusnošću. Nedostaci su potrošnja reaktivne energije i mala efikasnost zbog nemogućnosti prilagođavanja brzine obrtanja turbine uslovima vetra (kruta mehanička karakteristika u okolini nominalne radne tačke generatora uslovljava male varijacije brzine obrtanja i pri velikim promenama ulazne snage vetra), odnosno ovaj koncept podrazumeva praktično konstantnu brzinu vetroturbine[3].

Upotreba sinhronog generatora, slika 1-b, omogućava prilagođavanje brzine vetroturbine uslovima vetra jer je sinhroni generator frekventno raspregnut od mreže preko *back to back* energetske pretvarača. Osim toga, prednost ovog sistema je što omogućava direktno sprezanje vratila generatora sa vetroturbinom upotrebom višepolnog sinhronog generatora sa permanentnim magnetom. Nedostatak ovog koncepta je što celokupna energija prolazi kroz pretvarač pa je potrebno da snaga pretvarača bude jednaka snazi generatora, što je teško obezbediti kod vetrogeneratorskih jedinica veće snage. Osim toga, ima se povećan nivo harmonika zbog prisustva kaskadnog pretvarača [4], pa je neophodno korišćenje harmonijskih filtera.

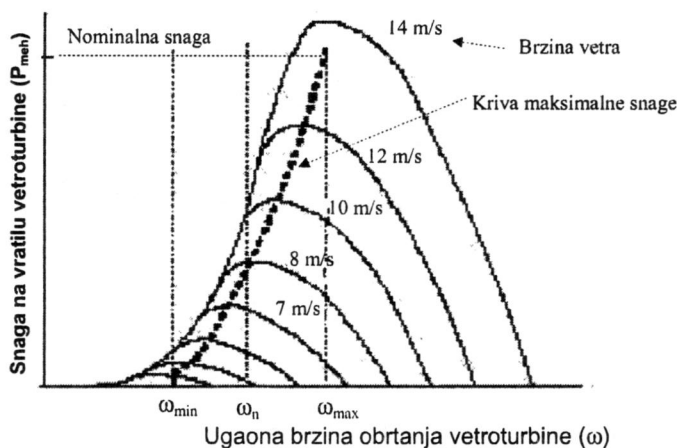
Kod savremenih vetrogeneratorskih jedinica veće snage dvostrano napajana asinhorna mašina (slika 1-c) postala je najzastupljeniji koncept [5], [6]. Stator je direktno priključen na mrežu, a rotor je preko kliznih prstenova, pretvaračke grupe i eventualno transformatora, takođe, priključen na mrežu. Ova tehnika potiče od podsinhronih kaskada (*Scherbius-ov* pogon) koje se primenjuju u elektromotornim pogonima velike snage, ali je kod tih pogona od interesa samo motorni režim rada [7]. U slučaju dvostrano napajane asinhronne mašine moguć je rad u četiri režima (podsinhroni motorni i generatorski, nadsinhroni motorni i generatorski), što u slučaju vetrogeneratora omogućava potpuno prilagođavanje brzine obrtanja vetrogeneratora uslovima vetra odnosno mehaničkoj karakteristici vetroturbine.

3. STRATEGIJA REGULACIJE KOD VETROGENERATORA

Kod eksploatacije energije vetra, s obzirom na to da nema mogućnosti njene akumulacije u primarnom obliku, osnovna strategija je obezbediti u svakom trenutku maksimalan mogući stepen iskorišćenja. Prema *Betz-ovom* zakonu vetar može predati turbini maksimalno 59% svoje kinetičke energije, ali je praktično maksimalan stepen iskorišćenja vetroturbine oko 42%. Mehanička snaga (P_{meh}) koju razvija vetroturbina, pri određenoj brzini vetra (v), data je relacijom:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

gde je ρ gustina vazduha, R poluprečnik rotora i C_p faktor snage vetroturbine koji je funkcija odnosa periferne brzine vrha lopatice vetroturbine (ωR) prema brzini vetra. Mehanička karakteristika vetroturbine za različite brzine vetra je prikazana na slici 2. Sa karakteristike se vidi da se optimalan stepen iskorišćavanja vetroturbine za različite brzine vetra postiže pri različitim ugaonim brzinama turbine



Slika 2. Mehanička karakteristika vetroturbine za različite brzine vetra

Na osnovu mehaničke karakteristike vetroturbine se zaključuje da je za optimalno iskorišćenje snage vetra potrebno prilagoditi brzinu obrtanja turbine brzini vetra (pratiti krivu maksimalne snage), odnosno vršiti elektromehaničku konverziju sa promenljivom brzinom obrtanja generatora. S obzirom da brzina vetra varira u širokom dijapazonu, zadovoljenje kriterijuma maksimalnog stepena iskorišćenja značilo bi i velike varijacije ugaone brzine turbine, odnosno generatora. Ekonomska analiza je pokazala da je neprihvatljivo projektovati generator za maksimalno iskorišćenje snage vetra pri svim brzinama, jer se velike brzine vetra (npr. veće od 14 m/s) relativno retko javljaju pa bi vetrogenerator bio za najčešće brzine vetra predimenzionisan. Iz takve tehnokonske analize proistekle su dve strategije regulacije rada vetrogeneratora: strategija maksimalne snage i strategija konstantne snage.

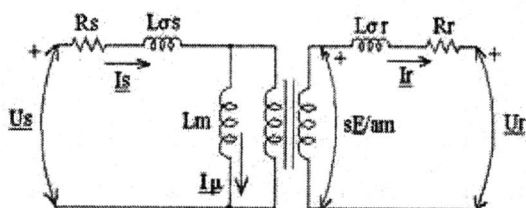
Kod strategije maksimalne snage, brzina obrtanja generatora, odnosno brzina obrtanja turbine se prilagođava brzini vetra tako da turbina odaje maksimalnu mehaničku snagu. Strategija konstantne snage primenjuje se pri veoma jakim vetrovima a određena je nominalnom snagom generatora. U ovom režimu generator radi sa nominalnom snagom, bez obzira na brzinu vetra (u datom opsegu brzina), što se postiže tzv. *pitch* regulacijom (zakretanjem lopatica turbine) ili kombinacijom *stall* i *pitch* efekta (aktivna *stall* regulacija). Pri veoma jakim vetrovima (iznad 25 m/s), elektromehanička konverzija se, u cilju očuvanja vetroturbine od mehaničkih oštećenja, u potpunosti zaustavlja tako što se turbina mehanički ukoči. Iz prethodne analize može se zaključiti da je za efikasan rad vetroturbine potreban generator promenljive brzine a dvostrano napajani asinhroni generator se pokazao kao najprihvatljivije rešenje.

4. PRINCIP RADA DVOSTRANO NAPAJANOG GENERATORA

Za razliku od asinhrona mašine (AM) sa kaveznim rotorom, koju možemo posmatrati i kao element sa jednim pristupom, nanotana asinhrona mašina je element sa

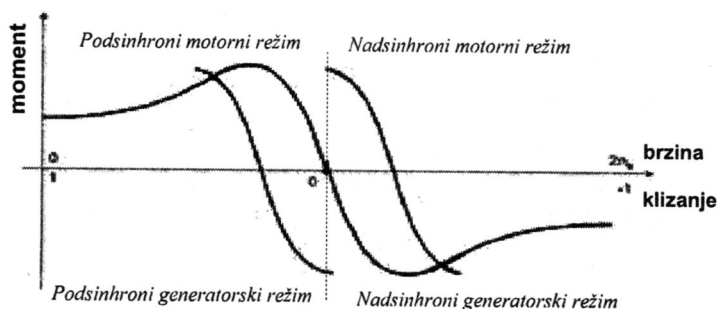
dva pristupa (sa strane statora i sa strane rotora). Na slici 3 prikazana je raspregnuta zamenska šema asinhronne mašine sa namotanim rotorom.

- R_s, R_r – aktivne otpornosti namotaja statora i rotora, respektivno;
- $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ – Induktivnosti rasipanja namotaja statora i rotora, respektivno;
- L_m – Induktivnost magnećenja mašine;
- a_m – odnos transformacije stator-rotor;
- $\underline{U}_{s,r}, \underline{I}_{s,r}$ – fazori napona i struja na priključcima statora i rotora, respektivno.



Slika 3 Zamenska šema asinhronne mašine sa dva pristupa

Struja rotora je rezultat balansa između indukovane elektromotorne sile rotora (sE/a_m) i dovedenog napona na klizne kontakte rotora (\underline{U}_r). Indukovana elektromotorna sila rotora zavisi od klizanja s i odnosa transformacije između namota statora i rotora a_m . Injektiranjem napona odgovarajuće učestanosti pri istom opterećenju mašine možemo uticati na klizanje, odnosno na brzinu obrtanja mašine pošto je stator vezan na mrežu konstantne učestanosti. Kod kavezne AM imamo samo jednu mehaničku karakteristiku pošto je namot rotora kratkospojen, odnosno $U_r=0$, dok kod namotane dvostrano napajane AM se mehanička karakteristika može kontinualno pomerati u oba smera u odnosu na prirodnu karakteristiku (kada je namot rotora kratkospojen, tj. $U_r=0$). Dakle, promenom napona i učestanosti u rotorskom kolu moguće je prilagođavati mehaničku karakteristiku generatora uslovima vetra, slika 4.

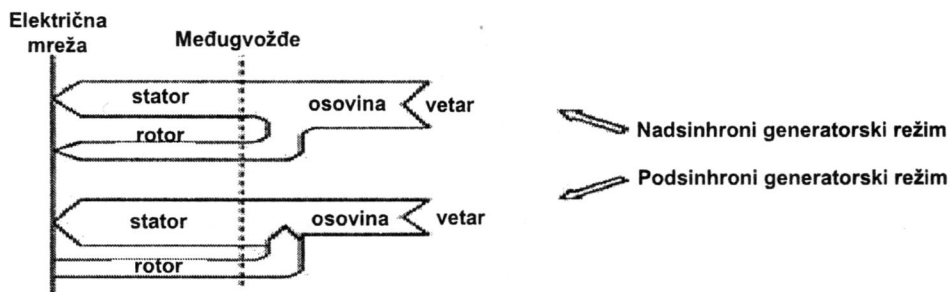


Slika 4 Prilagođavanje mehaničke karakteristike generatora karakteristici vetroturbine

Opseg brzina ($\omega_{\min} + \omega_{\max}$) u kome mašina radi se u praksi kreće oko $\pm 30\%$ u odnosu na prirodnu sinhronu brzinu (za $U_r=0$) i određen je pre svega mehaničkom karakteristikom turbine (slika 2), ali i snagom pretvarača u rotorskom kolu.

5. TOKOVI SNAGA U DVOSTRANO NAPAJANOJ ASINHRONOJ MAŠINI

Analiza tokova snaga u dvostrano napajanoj asinhronoj mašini u nadsinhronom i podsinhronom generatorskom režimu je prikazana na slici 5. Sa dijagrama se vidi da se snaga u nadsinhronom režimu injektira u mrežu i sa strane statora i sa strane rotora, dok se u podsinhronom režimu rotor napaja iz mreže. Sa dijagrama sledi da pri nadsinhronom režimu AM može da radi sa snagom većom od nominalne jer je ukupna snaga koju generiše AM jednaka zbiru snage statora i rotora. Iz ovog razloga se prenosni odnos u reduktoru vetroturbine (slika 1) bira tako da se postiže nominalna snaga AM pri brzinama koje su manje od nominalne (slika 2).

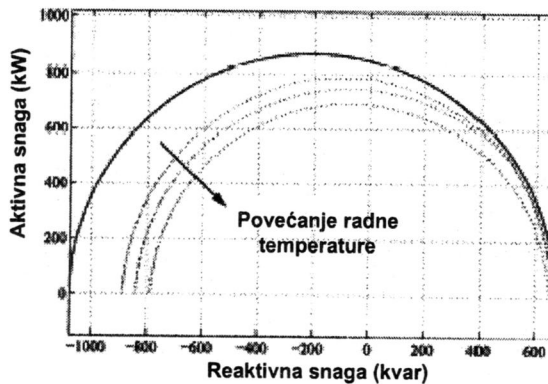


Slika 5. Tokovi aktivne snage u vetrogeneratoru sa dvostrano napajanom asinhronom mašinom

Iz teorije asinhronih mašina poznato je da je snaga koja se prenosi kroz rotor, ako se zanemare gubici u namotu rotora, srazmerna relativnom klizanju. Ako se pretpostavi da je opseg radnih brzina vetrogeneratora $\omega_{\pm 0,3\omega_0}$, gde je ω_0 sinhrona brzina, tada je snaga koju odaje vetrogenerator u mrežu (70+130)% nominalne snage AM, odnosno, nominalna snaga vetrogeneratora je 130% nominalne snage AM. Snaga koja se prenosi kroz rotor je prolazna snaga i kroz pretvarač u rotorskom kolu. Dakle, snaga pretvarača za konkretan vetrogenerator je definisana opsegom brzina u kojem radi vetroturbina i za prethodni primer je to 30% nominalne snage AM ili oko 23% nominalne snage vetroturbine. Ovo je osnovna prednost asinhronog dvostrano napajanog generatora nad sinhronom mašinom (slika 1-b) kod koje snaga pretvarača odgovara nominalnoj (maksimalnoj) snazi vetrogeneratora.

U prethodnoj analizi su posmatrani samo tokovi aktivnih snaga, ali za rad vetrogeneratora na mrežu potrebno je upravljati i tokovima reaktivne snage. Ovo je od posebne važnosti kod vetrogeneratora jer se imaju jake varijacije izlazne snage, pa je srazmerno tome prisutna i varijacija napona (naročito ako je vetrogenerator priključen na slabu mrežu). Da bi se naponi održali u propisanim granicama potrebno je kontrolisati reaktivnu snagu koju

generiše vetrogenerator. U direktnoj sprezi (slika 1-a) asinhrona mašina je isključivo potrošač reaktivne energije, ali u slučaju dvostranog napajanja vektorskom kontrolom struja u rotorskom kolu moguće je upravljanje reaktivnom snagom generatora [8]. Moderni vetrogeneratori mogu raditi sa faktorom snage u opsegu $\cos\varphi=\pm 0,9$ (Danski koncept) sa potpuno nezavisnim upravljanjem reaktivnom i aktivnom snagom generisanja. Ipak, generisanje reaktivne snage povlači povećanje instalisane snage pretvarača. Iz tog razloga vetrogenerator radi u kapacitivnom režimu samo za lokalno obezbeđenje reaktivne energije. Na slici 6 prikazana je pogonska karta realnog vetrogeneratora nominalne snage 1000 kVA sa dvostrano napajanom asinhronom mašinom za različite radne temperature koje ograničavaju maksimalno dozvoljenu struju u rotoru, odnosno pretvaraču.



Slika 6. Pogonska karta vetrogeneratora sa asinhronom mašinom za različite radne temperature

6. ZAKLJUČAK

Pri konverziji energije vetra u električnu potrebno je obezbediti efikasan rad vetro turbine uz zadovoljenje svih tehničkih kriterijuma koje diktira mreža. U tom cilju, a u skladu sa trendom rasta snage vetrogeneratorskih jedinica, dvostrano napajana asinhrona mašina predstavlja koncept za koji se opredelio najveći broj vodećih firmi u oblasti vetroenergetike. Razvoj upravljačkog i kontrolnog sistema je i dalje intenzivan, ali već na postojećem nivou omogućava potpunu kontrolu generisanja aktivne i reaktivne energije, a time i stabilan rad vetrogeneratora na mrežu. Robusnost ovakve mašine i njena potpuna kontrolabilnost nameću ovu mašinu kao rešenje i u drugim oblastima kao npr. za male protočne hidroelektrane ali i za pumpno-akumulaciona postrojenja.

LITERATURA

- [1] "Wind Force 12" Greenpeace and European Wind Energy Association, Preparatory meeting of the "Earth Summit – Greenpeace" Bali, Indonesia, May 2002.
- [2] D. Mikičić, Ž. Đurišić, B. Radičević: "Vetrogeneratori – perspektivni izvori električne energije" *Elektroprivreda*, broj 4, 2002.

- [3] R. Datta, V. T. Ranganathan: *"Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine - A Comparison With Alternative Schemes"* IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, N° 3, september 2002.
- [4] Z. Chen, E. Spooner: *"Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines"* IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 16, N° 2, june 2001.
- [5] I. Boldea, L. Tutulea, I. Serban: *"Variable Speed Electric Generators and Their Control: an emerging technology"* Journal of Electrical Engineering, Vol. 2, 2002.
- [6] Prospektni materijali firmi: Nordex, NEG Micon, Vestas i Bonus .
- [7] Krause, P.C.: *"Analysis of Electric Machinery"*, McGraw-Hill Book, New York, 1986.
- [8] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J. R. Sáenz: *"Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator"* IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 18, N° 2, june 2003.

DOUBLE FED INDUCTION MACHINE APPLIED IN WINDPOWER GENERATORS

ABSTRACT:

In this article special type of asynchronous machine is analized, which became very applicable in modern systems for energy sources such as wind. Random characteristics of the wind and tendency for maximum exploitation of wind energy demand a variable speed operation for wind generator. Such an operation makes it difficult to satisfy technical criteria of wind generator operation connected to stiff electrical grid. Double fed induction machine has shown itself as a solution that could satisfy those conditions of electromechanical conversion. After explanation of basic strategies of control in article is explained the principle of "double feeding" of asynchronous machine and it's operation in electrical grid. In the end, operation chart of wind generator for conditions of exploitation is given.