



UDK: 631.372.669-8

*Pregledni naučni rad  
Review scientific paper*

## GENERATORI ZA PRETVARANJE ENERGIJE VETRA U ELEKTRIČNU ENERGIJU

**Đukan Vukić, Đuro Ercegović, Dragiša Raičević***Poljoprivredni fakultet - Beograd*

**Sadržaj:** U radu su date karakteristike električnih generatora koji se koriste u vetroelektranama, za pretvaranje energije vetra u električnu energiju. Izvršena je analiza rada asinhronih generatora sa kaveznim rotorom, sinhronih generatora i asinhronih generatora sa dvostranim napajanjem u uslovima koji se imaju prilikom rada u vetrogeneratorskim postrojenjima i izvedeni zaključci u pogledu izbora optimalne vrste generatora za konkretne uslove.

**Ključne reči:** *vetar, energija, asinhroni generator, sinhroni generator, vetroelektrana.*

### 1. UVOD

Danas se u svetu posvećuje velika pažnja obnovljivim izvorima energije (vetar, sunčeva energija, biomasa, male hidroelektrane i dr.), pošto oni predstavljaju veliku šansu da se smanji potrošnja konvencionalnih goriva, čije su rezerve sve manje, poboljša zaštita životne sredine i poveća korišćenje domaćih energetske potencijala.

Od svih obnovljivih izvora energije dominantnu ulogu ima vetar i danas vetroenergetika predstavlja oblast sa veoma velikim trendom razvoja. Međutim, pouzdana i ekonomski prihvatljiva konverzija mehaničke energije vetra u električnu energiju praćena je nizom problema i teškoća. To je dovelo do intenzivnog razvoja novih materijala, specijalnih električnih mašina, energetske elektronike kao i niza novih tehničkih rešenja iz oblasti aeromehanike [1].

Jedan od najvažnijih zahteva koji se javlja prilikom pretvaranja energije vetra u električnu energiju jeste izbor i konstrukcija električnog generatora koga će karakterisati pouzdan i efikasan rad u datim uslovima korišćenja energije vetra, načinu priključenja generatora na mrežu i potrebne veličine i snage mašine. U tom smislu osnovne vrste električnih generatora koji se koriste u vetrogeneratorskim postrojenjima su: asinhroni generatori sa kaveznim rotorom, sinhroni generatori i asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem.

## 2. ASINHRONI GENERATORI SA KAVEZNIH ROTOROM

Asinhroni generatori sa kaveznim rotorom najčešće se koriste u vetrogeneratorskim postrojenjima u slučaju kada vetroturbina radi sa približno konstantnom brzinom. U tom smislu, ova vrsta generatora koristi se u nekoliko karakterističnih slučajeva.

U slučaju kada se vetrogeneratorsko postrojenje koristi za napajanje lokalnih mreža, trofazni asinhroni generator sa kaveznim rotorom i kondenzatorskom pobudom koristi se kao jednofazno opterećeni generator. Paralelno sa kondenzatorom za pobudu C paralelno je vezan otpornik otpornosti  $R_d$  pomoću koga se obezbeđuje da trofazni generator tada radi u približno simetričnom režimu rada [2]. Promenom brzine vetra narušava se simetričnost rada generatora što se rešava regulisanjem kapaciteta C i otpornika  $R_d$ , kontinualno ili skokovito, pomoću sistema prekidača pomoću kojih se dodaju ili oduzimaju vrednosti C i R. Jedno od rešenja obezbeđenja simetričnog režima rada jednofazno opterećenog trofaznog asinhronog generatora sa kaveznim rotorom jeste i primena tzv. Smitove faze [2].

Prilikom priključenja trofaznog asinhronog generatora, sa kaveznim rotorom, koji radi u okviru vetrogeneratorskog postrojenja, na mrežu postavljaju se dva osnovna zahteva i to neophodnost da napon i frekvencija budu konstantni u što većem opsegu promene brzine vetra i da snaga vetra bude što bolje iskorišćena [1].

U slučaju direktnog priključenja asinhronog generatora sa kaveznim rotorom na mrežu, vetroturbina je povezana sa rotorom generatora preko prenosnog mehanizma. Navedeni zahtevi se tada ispunjavaju primenom različitih rešenja od kojih su najvažnija:

- primena tzv. "stall" koncepta koji se sastoji u tome što se pri povećanju brzine vetra iznad nominalne brzina turbine smanjuje;

- postavljanje dva namotaja na statoru generatora sa različitim brojem pari polova što omogućava rad generatora sa dve brzine (jedna brzina za male a druga za velike brzine vetra);

- postavljanje dva generatora u vetrogeneratorskom postrojenju, pri čemu se jedan koristi kada su brzine vetra male a drugi kada su brzine vetra velike (tzv. danski koncept);

- priključenje asinhronog generatora sa kaveznim rotorom na mrežu preko specijalnog četvorokvadratnog pretvarača koji se sastoji od dva poluprovodnička pretvarača povezanih preko jednosmernog međukola. Pri tome, pretvarač koji se nalazi na strani statora reguliše elektromagnetni momenat i reaktivnu snagu a pretvarač koji se nalazi na strani mreže reguliše aktivnu snagu koja se daje mreži i veličine u jednosmernom međukolu [4].

Dobre osobine asinhronog generatora sa kaveznim rotorom je njegova robusnost, ekonomičnost, odsutnost četkica, dobre osobine u prelaznim stanjima i mogućnost da invertor radi kao kompenzator reaktivne snage. Nedostaci se ogledaju u složenosti sistema za regulaciju i neophodnost da snaga pretvarača preko koga je generator priključen na mrežu bude velike snage, čak 30-50% veće od snage generatora zbog potrebe obezbeđenja zahteva u pogledu potrebne reaktivne snage.

### 3. SINHRONI GENERATOR

Sinhroni generatori se primenjuju u vetrogeneratorskim postrojenjima u slučajevima kada vetroturbina radi sa promenljivom brzinom, pošto sinhroni generatori imaju mogućnost potpune regulacije brzine. Ovi generatori predviđeni za rad u vetrogeneratorskim postrojenjima izvode se ili sa namotanim rotorom ili sa rotorom sa permanentnim magnetima. Zbog specifičnosti koje se imaju u uslovima konverzije energije vetra u električnu energiju nije moguća primena standardnih sinhronih generatora, već se oni specijalno konstruišu za tu namenu. Razlog tome je prvenstveno u činjenici što generator tada obično radi sa malom brzinom obrtanja rotora, zbog čega su im i dimenzije vrlo velike. Ali zbog malih brzina nije potreban prenosni mehanizam.

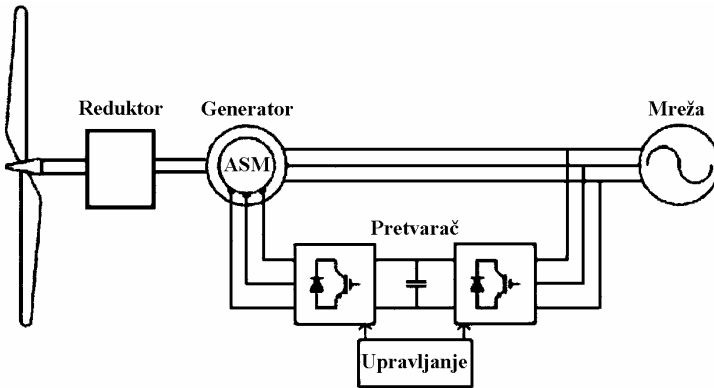
Priključenje sinhronog generatora na mrežu u uslovima primene u vetrogeneratorskim postrojenjima vrši se preko specijalnog energetskeg pretvarača (tzv. *back to back* pretvarač), čime se postiže frekventna raspregnutost od mreže. To je veoma važna prednost sinhronih generatora u smislu primene za tu namenu pošto se na taj način omogućava puno prilagođavanje brzine vetroturbine uslovim vetra. Ali, neophodnost primene ovih pretvarača predstavlja i osnovni nedostatak ovog rešenja pošto tada celokupna energija prolazi kroz pretvarač. To znači da snaga pretvarača treba da bude jednaka snazi generatora (pa i veća za oko 20% zbog regulisanja aktivne i reaktivne snage), što je veoma teško obezbediti. Osim toga, prisustvo pretvarača uzrokuje pojavu viših harmonika zbog čega je neophodno korišćenje odgovarajućih harmonijskih filtera. Za slučajeve kada se zahteva generatorska jedinica manje snage moguće rešenje su sinhroni generatori sa permanentnim magnetima, uz primenu različitih rešenja energetskih poluprovodničkih pretvarača preko kojih se tada generator priključuje na mrežu (trofazni diodni ispravljač sa čoperom, PWM ispravljač i inverter itd.), [6].

Prednosti primene klasičnog sinhronog generatora u vetrogeneratorskim postrojenjima jesu dobre osobine u pogledu faktora snage, mogućnost rada u širokom intervalu promenu brzine i mogućnost dobijanja maksimalnog elektromagnetnog momenta. Osnovni nedostatak je neophodnost primene energetskog pretvarača čija je snaga za oko 20% veća od snage generatora. Kod sinhronih generatora sa permanentnim magnetima važni nedostaci jesu relativno visoka cena magneta, smanjenja magnetnog polja permanentnih magneta sa vremenom i nemogućnost regulacije faktora snage.

### 4. ASINHRONI GENERATOR SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM

Asinhrona mašina sa namotanim rotorom radi u režimu dvostranog napajanja u slučaju kada se dovod (odvod) električne energije vrši i sa strane statora i sa strane rotora. Mašina tada može da radi u motorskom i generatorskom režimu rada, sa brzinama ispod i iznad sinhronne brzine. Detaljnu analizu rada asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem i dobijanje svih potrebnih statičkih i dinamičkih karakteristika moguće je sprovesti primenom odgovarajućeg matematičkog modela [7].

S obzirom na svoje osobine asinhroni generator sa dvostranim napajanjem predstavlja veoma dobro tehničko rešenje za pretvaranje energije vetra u električnu energiju. Principijelna šema vetrogeneratorskog postrojenja sa ovom vrstom generatora prikazana je na slika 1.



Sl. 1. Vetrogeneratorsko postrojenje sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem

Osnovne karakteristike asinhronih generatora sa dvostranim napajanjem koje ga preporučuju za primenu u vetrogeneratorskim postrojenjima su:

a) Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem može da radi sa snagom većom od nominalne. To se ima u slučaju kada generator radi u nadsinhronom režimu rada i tada se aktivna snaga daje mreži i sa strane statora i sa strane rotora [8].

b) Snaga energetskih pretvarača u kolu rotora mnogo je manja od snage generatora. Naime, snaga koja se dovodi (odvodi) sa strane rotora u generatorskom režimu rada asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem iznosi s-ti deo elektromagnetne snage mašine, gde je  $s$  - klizanje, koje je definisano relacijom:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1)$$

gde je  $n_1$  - brzina obrtnog polja a  $n$  - brzina obrtanja rotora. To npr. znači da ako se brzina rotora kreće u intervalu  $0,7 n_1 < n < 1,3 n$ , maksimalna snaga pretvarača iznosi najviše 30% snage koja se predaje mreži. Zato se energetski pretvarači koji se uključuju u kolo rotora asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem dimenzionišu na 20-30% nominalne snage generatora. Ta snaga se još može smanjiti uključivanjem prebacača zvezda - trougao u kolo rotora [7].

c) Delovanjem na napon i frekvenciju u rotorskom kolu moguće je efikasno prilagođavanje karakteristika generatora uslovima vetra, odnosno mehaničkoj karakteristici vetroturbine [9].

d) Vektorskom kontrolom struja u rotorskom kolu moguće je regulisanje reaktivne snage ovog generatora. Moderni asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem mogu da rade sa faktorom snage u opsegu  $\cos \varphi = \pm 0,9$ , sa potpuno nezavisnim upravljanjem reaktivnom i aktivnom snagom generatora [10].

e) Asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem ne ispadaju iz sinhronizma zbog rasta mehaničke brzine.

f) Regulaciju asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem primenjenog u vetrogeneratorskim postrojenjima moguće je vršiti i po kriterijumu maksimalne snage i po kriterijumu konstantne snage [8].

## ZAKLJUČAK

S obzirom na specifičnosti koje se imaju u uslovima konverzije energije vetra u električnu energiju, kao električni generator u vetrogeneratorskim postrojenjima moguće je primeniti asinhroni generator sa kaveznom rotorom, sinhroni generator i asinhroni generator sa dvostranim napajanjem. Asinhroni generator sa kaveznom rotorom primenjuje se kao generator male snage u uslovima približno konstantne brzine vetra. Sinhroni generatori su frekventno raspregnuti od mreže zbog čega ih karakteriše dobra prilagodljivost različitim brzinama vetra. Snaga energetskih pretvarača preko kojih se sinhroni generatori priključuju na mrežu mora da bude ista kao snaga generatora što predstavlja osnovni ograničavajući faktor u pogledu povećanja snage sinhronog generatora primenjenog u vetrogeneratorskom postrojenju. Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem karakteriše se nizom dobrih osobina povoljnih za rad u vetrogeneratorskim postrojenjima. To se, pre svega, ogleda u mogućnosti da ta vrsta generatora može da radi sa snagom većom od nominalne, zahtevom za energetskim pretvaračem čija je snaga mnogo manja od snage generatora i veoma dobrim regulacijskim karakteristikama u odnosu na sve važne parametre rada. U pogledu oblasti primene pojedinih električnih generatora može se zaključiti da u malim i srednjim vetrogeneratorskim postrojenjima prednost imaju asinhroni generatori sa kaveznom rotorom i sinhroni generatori sa permanentnim magnetima a u vetrogeneratorskim postrojenjima većih snaga prednost je na strani klasičnih sinhronih generatora i naročito asinhronih generatora sa dvostranim napajanjem.

## LITERATURA

- [1] Buton T.: "Wind Energy Handbook", John Wiley and Sons Ltd, 2001.
- [2] Vukić Đ., Stajić Z., Radić P.: "Asinhrona mašine", Akademski misao, Beograd, 2003.
- [3] Vukić Đ., Kavgić, P., Stajić Z.: "Autonomni izvori električne energije u poljoprivredi", Naučno-stručni skup DPT-96, Zbornik radova, str. 279-287, Beograd, 1996.
- [4] Vukić Đ., Stajić Z., Radičević B., Ercegović Đ.: "Jednofazni asinhroni generator sa dva namotaja na statoru", Traktori i pogonske mašine, Vol. 7, No 2, p. 51-55, Novi Sad, 2002.
- [5] Mohan N.: "Power Electronics: converters, applications and design", University of Minesota, 1998.
- [6] Grabić S., Katić V., Sakić M.: "Vetrogenerator sa sinhronom mašinom sa stalnim magnetima upravljana punoupodnošnjim upravljajem", XXVII Savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, 2005.
- [7] Vukić Đ., Radičević B.: "Osobine asinhrona mašine sa dvostranim napajanjem i primena u vetrogeneratorskim postrojenjima", XXVII Savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, 2005.
- [8] Vukić Đ., Ercegović Đ., Raičević D.: "Primena asinhronih generatora sa dvostranim napajanjem za korišćenje energije vetra", IV Naučni skup "Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene", Crnogorska akademija nauka i umetnosti, Budva, 2005.
- [9] Vukić Đ., Stajić Z.: "Rotor voltage influence on the Characteristics of Double - Fed Induction Machines", Biletinul Automatic Control and Computer Science, No 1-2, Temisoara (Romania) 1997.
- [10] Vukić Đ., Stajić Z., Vukić Marija: "An Optimization reactive power consumption of double-fed induction machines", IX International Symposium on Theoretical Engineering (ISTET 97), Book of Proceedings, Palermo (Italy), 1997.

## GENERATORS FOR CONVERSION OF WIND ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY

**Đukan Vukić, Đuro Ercegović, Dragiša Raičević**

*Faculty of Agriculture - Belgrade*

**Abstract:** This paper presents the characteristics of electrical generators which are being used for conversion of wind energy to electrical energy. There has been performed analysis of the work of induction generators with the squirrel-cage rotor, as well as analysis of synchronous generator and double-fed induction generator in the systems where electric energy is generated from wind energy, upon which is concluded what kind of generators is optimal for specific cases.

**Key words:** *wind, energy, asynchronous generator, synchronous generator, wind power station.*