

# PRIMENA ASINHRONIH GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM ZA KORIŠĆENJE ENERGIJE VETRA

*Đukan Vukić, Đuro Ercegović, Dragiša Raičević<sup>1</sup>*

## SAŽETAK:

U radu su date osnovne karakteristike asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem. Definisani su matematički model i izvršena analiza tokova snage. Na osnovu izloženih karakteristika pokazuje se da ova vrsta generatora predstavlja veoma dobro tehničko rešenje za primenu u sistemima za pretvaranje energije vetra u električnu energiju, posebno za slučajeve većih instalisanih snaga i uz prisustvo energetskih pretvarača u kolu rotora.

**Ključne reči:** *asinhroni generator sa dvostranim napajanjem, vetar, energija.*

## 1. UVOD

Obnovljivim izvorima energije danas se u svetu posvećuje velika pažnja jer predstavljaju veliku šansu da se smanji potrošnja konvencionalnih goriva, poboljša zaštita životne sredine i poveća korišćenje domaćih energetskih potencijala.

Od svih obnovljivih izvora energije dominantnu ulogu ima vetar jer su njegove prednosti višestruke [1]. Međutim, pouzdana i ekonomski prihvatljiva konverzija mehaničke energije vetra u električnu energiju praćena je nizom problema i poteškoća.

Jedan od osnovnih problema koji se javlja u pretvaranju energije vetra u električnu energiju jeste obezbeđenje pouzdanog i efikasnog rada električnog generatora u uslovima promenljive snage vetra. U tom smislu danas se primenjuju različite vrste električnih generatora od kojih su najzastupljeniji kavezni asin-

---

<sup>1</sup> Prof. dr Đukan Vukić, prof. dr Đuro Ercegović, prof. dr Dragiša Raičević, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Nemanjina 6, 11081 Zemun.

hroni generatori, sinhroni generatori i asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem. Koji će se tip generatora koristiti zavisi od snage koja se očekuje i brzine vetra na datom području. Prvi vetrogeneratori koji su ušli u upotrebu početkom 80-ih godina prošlog veka bili su malih snaga (do 10 kW) i postavljani su na mestima sa veoma jakim vetrom, tako da su praktično stalno radili i imali približno konstantnu brzinu obrtanja. U takvim uslovima mali sinhroni generatori davali su solidne rezultate. Pored njih, u tu svrhu su se upotrebljavali i asinhroni generatori sa kaveznim rotorom i kondenzatorskim baterijama za pobudu. Ti generatori su bili najčešće samostalni izvori energije i ređe su direktno vezivani na distributivnu mrežu.

Sa porastom instalisane snage turbine i generatora javljaju se problemi vezani za varijabilnost brzine turbine i generatora. Sinhroni generator direktno vezan na mrežu postao je neupotrebljiv već kod snage od 50 kW pošto nije bilo moguće održavati stabilan rad na mreži konstantnog napona i učestanosti. Asinhroni generator sa kaveznim rotorom je još uvek mogao da se primenjuje za te i nešto veće snage ali pod uslovom da je distributivna mreža dovoljno jaka da održava stalan napon i učestanost mada je i u tom slučaju njihovo prisustvo proizvodilo više negativnih efekata (pojava flikera i propada napona).

Dalje povećanje snage generatora i mogućnost primene u širokom intervalu promene brzine vetra bilo je moguće samo uz primenu raznih vrsta poluprovodničkih energetske pretvarača, [2]. Međutim, primena energetske pretvarača donosi niz novih problema tehničke i ekonomske prirode. U tim slučajevima pokazuje se da asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem imaju najbolje osobine.

## **2. MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM**

Rad asinhrone mašine sa namotanim rotorom u režimu dvostranog napajanja ima se kada se dovod (odvod) električne energije vrši i sa strane statora i sa strane rotora. Asinhrona mašina tada može da radi u motorskom i generatorskom režimu rada, sa brzinom ispod i iznad sinhronne brzine.

Detaljna analiza rada asinhrone mašine sa dvostranim napajanjem u motorskom i generatorskom režimu rada, sa brzinama ispod i iznad sinhronne brzine moguće je sprovesti pomoću odgovarajućeg matematičkog modela. S obzirom na karakteristike i specifičnosti rada asinhrone mašine sa dvostranim napajanjem matematički model je povoljno definisati u odnosu na referentnu osu vezanu za stator čija je brzina jednaka sinhronoj brzini  $\omega_s$  (kružna učestanost statora), čemu odgovara sledeći sistem kompleksnih jednačina, [3], [4]:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \frac{d\underline{\psi}_1}{dt} + j\omega_1 \underline{\psi}_1 \quad (1)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} + j(\omega_1 - \omega) \underline{\psi}_2 \quad (2)$$

$$\underline{\psi}_1 = L_s \underline{I}_1 + L_m \underline{I}_2 \quad (3)$$

$$\underline{\psi}_2 = L_s \underline{I}_1 + L_r \underline{I}_2 \quad (4)$$

Ovaj sistem jednačina, napisan u relativnim jedinicama, uz uvođenje diferencijalnog operatora  $p$  ima sledeći oblik:

$$\underline{u}_1 = r_1 \underline{i}_1 + (p + j) \underline{\psi}_1 \quad (5)$$

$$\underline{u}_2 = r_2 \underline{i}_2 + (p + js) \underline{\psi}_2 \quad (6)$$

$$\underline{\psi}_1 = (x_1 + x_m) \underline{i}_1 + x_m \underline{i}_2 \quad (7)$$

$$\underline{\psi}_2 = x_m \underline{i}_1 + (x_2 + x_m) \underline{i}_2 \quad (8)$$

gde je klizanje  $s$  definisano relacijom:

$$s = \frac{f_2}{f_1} = (\omega_1 - \omega) / \omega_1 \quad (9)$$

Matematički model definisan na navedeni način kompletiran je sa mehaničkom jednačinom:

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_m + m_{el} \quad (10)$$

Elektromagnetni moment se izračunava iz izraza za struje statora i rotora, prema relaciji, [3]:

$$m_{el} = x_m \operatorname{Re} j \left[ \underline{i}_2 \underline{i}_1^* \right] \quad (11)$$

Rešavanjem navedenih jednačina koje definišu matematički model moguće je izvršiti potpunu analizu rada asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem u generatorskom režimu rada i doći do izraza za sve karakteristične veličine (fluksevi statora i rotora, struje statora i rotora, elektromagnetni moment, aktivne snage statora i rotora, reaktivne snage statora i rotora, faktori snage statora i rotora, gubici i stepen korisnog dejstva itd.) i definisati uslove optimalnog rada generatora u datom režimu rada a u skladu sa unapred postavljenim zahtevima [4], [5], [6] i [7].

Značenje pojedinih oznaka u prethodnim izrazima poznat je iz osnovne teorije asinhronih mašina.

### 3. TOKOVI SNAGA I ENERGETSKI BILANS

Osobine asinhronih generatora sa dvostranim napajanjem u pogledu tokova snaga sa strane statora i rotora imaju veliki značaj za njihovu primenu za korišćenje energije vetra.

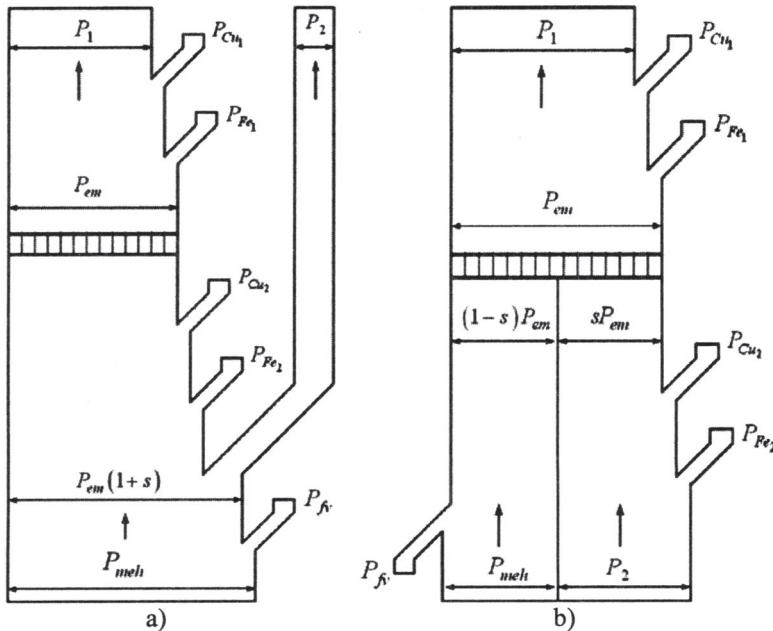
Kada generator radi u nadsinhronom režimu rada ( $n > n_1$ ) snaga se daje mreži (potrošačima) i sa strane statora i sa strane rotora (slika 1a), dok se u podsinhronom režimu rada ( $n < n_1$ ) aktivna snaga daje mreži (potrošačima) sa strane statora dok se rotor napaja iz mreže (slika 1b).

Na osnovu dijagrama tokova snaga asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem mogu se, pored ostalog, izvesti dva važna zaključka:

a) Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem, kada radi u nadsinhronom režimu rada, može da radi sa snagom većom od nominalne snage.

b) Snaga pretvarača koji je uključen u kolo rotora iznosi s-ti deo elektromagnetne snage mašine. To npr. znači da ako se brzina rotora generatora kreće u intervalu  $0,7 n_1 < n < 1,3 n_1$  maksimalna snaga pretvarača iznosi najviše 30% snage koja se predaje mreži. Zato se pretvarači koji se uključuju u kolo rotora asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem i dimenzionišu na 20-30% instalisane snage generatora.

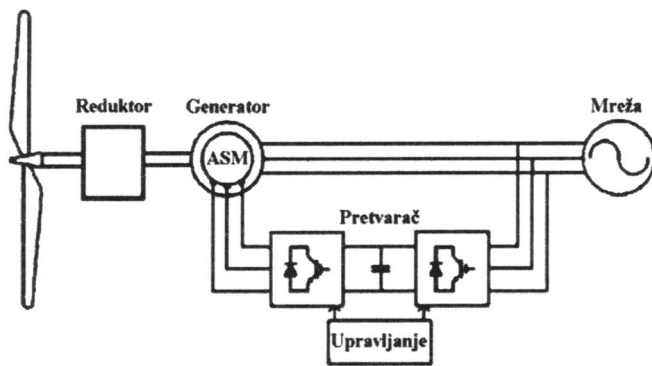
Snaga energetskih pretvarača međutim zavisi i od zahteva u pogledu reaktivne snage. Ispunjenje standarda da asinhroni generator sa dvostranim napajanjem treba da radi u vetrogeneratorskim postrojenjima sa faktorom snage u okviru  $\cos \varphi = \pm 0,9$  pri nominalnoj aktivnoj snazi, zahteva određeno povećanje instalisane snage pretvarača u kolu rotora [6].



Slika 1. Energetski bilans asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem  
a) za  $n > n_1$  b) za  $n < n_1$

#### 4. PRIMENA ZA KORIŠĆENJE ENERGIJE VETRA

S obzirom na svoje osobine asinhroni generator sa dvostranim napajanjem predstavlja veoma povoljno tehničko rešenje za pretvaranje energije vetra u električnu energiju. Principijelna šema vetrogeneratorskog postrojenja sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem prikazana je na sl. 2.



Slika 2. Vetrogeneratorsko postrojenje sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem

Osnovni zahtev koji se postavlja kod eksploatacije energije vetra jeste obezbediti u svakom trenutku što veći stepen korisnog dejstva. Prema Betzovom zakonu vetar može predati turbini maksimalno 59% svoje kinetičke energije, ali je praktično moguće postići maksimalni stepen iskorišćenja vetroturbine oko 42%. Sa mehaničke karakteristike vetroturbine [1], vidi se da optimalan stepen iskorišćenja vetroturbine, za različite brzine vetra, postiže pri različitim ugaonim brzinama turbine. To znači da pri elektomehaničkom pretvaranju energije vetra u električnu energiju generator treba da radi sa promenljivom brzinom obrtanja.

S obzirom na svoje osobine kao i uslove koji se imaju prilikom rada u vetrogeneratorskim postrojenjima asinhroni generator sa dvostranim napajanjem predstavlja veoma dobro rešenje, posebno za slučajeve većih instalisanih snaga uz obavezno prisustvo energetskih pretvarača i to iz sledećih osnovnih razloga:

- asinhroni generator sa dvostranim napajanjem može da radi i sa snagama većim od nominalne snage;
- snaga energetskih pretvarača u kolu rotora je mnogo manja od snage generatora;
- delovanjem na napon i učestanost u rotorskom kolu moguće je prilagođavati mehaničku karakteristiku generatora uslovima vetra, odnosno mehaničkoj karakteristici vetroturbine, [7];

- vektorskom kontrolom struja u rotorskom kolu moguće je regulisanje reaktivne snage asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem. Moderni generatori mogu raditi sa faktorom snage u opsegu  $\cos \varphi = \pm 0,9$ , sa potpuno nezavisnim upravljanjem reaktivnom i aktivnom snagom generisanja, [6];
- asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem ne ispadaju iz sinhronizma zbog rasta mehaničke brzine;
- regulaciju asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem primenjenog u vetrogeneratorskim postrojenjima moguće je vršiti ili po kriterijumu maksimalne snage ili po kriterijumu konstantne snage [2].

## 5. ZAKLJUČAK

Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem je generatorski režim rada asinhronne mašine sa namotanim rotorom u kome su i namotaji statora i namotaji rotora priključeni na mrežu i odvod (dovod) energije se vrši i sa jedne i sa druge strane, što zavisi od toga da li generator radi u nadsinhronom ili podsinhronom režimu rada. Osobine asinhronih generatora u pogledu njihove primene u vetrogeneratorskim postrojenjima, posebno za veće instalisane snage i u uslovima prisustva energetskih pretvarača u kolu rotora, takve su da oni danas u tom smislu predstavljaju najbolje tehničko rešenje.

## 6. LITERATURA

- [1] Buton T.: „Wind Energy Handbook”, John Wiley and Sons Ltd, 2001.
- [2] Petersson A.: „Analysis, Modeling and Control of Double - Fed induction Generators for Win Turbines”, Geteborg, Chalmers University of Technology, Geteborg (Sweden), 2003.
- [3] Važnov A. I.: „Pehodnie processi v mašinah peremenoga toka”, Energia, Lenin-grad, 1980.
- [4] Vukić, Đ.: „The characteristics and development trends for double fed induction machines”, Fifth International Conference „Tesla III Millenium”, Proceedings, Beograd 1996, p. 139-147.
- [5] Vukić, Đ., Radičević, B.: *Osobine asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem i primena u vetrogeneratorskim postrojenjima*, 27. Savetovanje Juko CIGRE, Zlatibor 2005, RA1-05.
- [6] Vukić, Đ., Stajić, Z., Vukić, M.: „An Optimization reactive power consumption of double-fed induction machines”, IX International Symposium on Teoretical Electrical Engineering (ISTET 97), Book of Proceedings, Palermo (Italy), p. 134-140.
- [7] 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, p. 171-179.

## **APPLICATION OF THE DOUBLE FED INDUCTION GENERATOR FOR USING WIND ENERGY**

### **ABSTRACT:**

**This paper presents the characteristics of an double fed induction generators. Mathematical models are defined and accomplished the analysis of the power flow. Based on the obtained characteristic it is pointed out that this kind of electrical machines are very good technical solution for used in systems where electric generated from wind energy, aspecially in cases of higher installed power, and in presence of energy converters in rotor circuit.**

