

**KARAKTERISTIKE ASINHRONE MAŠINE SA
DVOSTRANIM NAPAJANJEM I PRIMENA ZA
KORIŠĆENJE ENERGIJE VETRA**

**CHARACTERISTICS OF A DOUBLY-FED
ASYNCHRONOUS MACHINE AND ITS APPLICATION IN
THE USE OF WIND ENERGY**

*Vukić, D. *, Radičević, B. *, Stajić, Z. ***

REZIME

U radu su date karakteristike asinhronne mašine sa namotanim rotorom koja se napaja i sa strane statora i sa strane rotora. Definisani su matematički model i ekvivalentna šema ovog režima rada asinhronne mašine i izvedeni su izrazi za karakteristične veličine. Na osnovu dobijenih karakteristika ukazano je na mogućnost korišćenja ove vrste električnih mašina, kada rade u generatorskom režimu rada, u sistemima za generisanje električne energije iz energije vetra i obrađene su osnovne karakteristike sistema vetroturbina – asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem.

Ključne reči: asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem, vetar, vetrogenerator, električna energija

SUMMARY

This paper presents the characteristics of an asynchronous machine with wound rotor, fed both from stator and from rotor side. Mathematical model and the equivalent circuit of this mode of asynchronous machine's work are defined and expressions for characteristic values are derived. On the basis of the obtained characteristics it is pointed out that this kind of electrical machines, while working in generating mode, may be used in systems where electric power is generated from wind energy. Main characteristics of wind turbine – doubly-fed asynchronous machine system are processed.

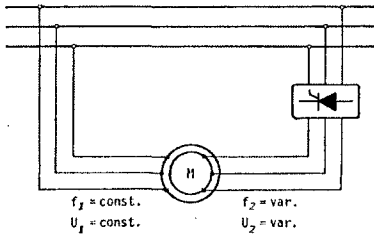
Key words: doubly-fed asynchronous machine, wind, wind generator, electric power

* dr Dukan Vukić, red. prof., dipl. inž. el. Branko Radičević, asistent pripravnik, Poljoprivredni fakultet - Institut za poljoprivrednu tehniku, Nemanjina 6, 11080 Beograd - Zemun

** dr Zoran Stajić, docent, Elektronski fakultet, Beogradska 30, 18000 Niš

UVOD

Asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem predstavlja režim rada asinhronne mašine sa namotanim rotorom u kome su i namotaj statora i namotaj rotora priključeni na mrežu. Pri tome mašina može da radi u motornom i generatorskom režimu, sa brzinama ispod i iznad sinhronne brzine, a energija se u zavisnosti od režima rada dovodi ili odvodi i sa strane statora i sa strane rotora. Principijelna šema asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem data je na slici 1. Na slici je prikazan slučaj koji se najčešće javlja, a to je slučaj kada je u namotaj rotora uključen poluprovodnički pretvarač napona i učestanosti.



Slika 1. Asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem
Picture 1. Doubly-fed asynchronous machine

Rad asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem u režimu motora karakterišu dobre regulacijske osobine, pošto je tada brzinu moguće kontinualno menjati u jednom i drugom smeru, ispod i iznad sinhronne brzine, i to odgovarajućim zadavanjem regulisane učestanosti, [1].

I u generatorskom režimu rada asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem može da radi sa brzinama ispod i iznad sinhronne brzine. Namotaj statora je najčešće priključen na mrežu, a u kolu rotora se nalaze poluprovodnički pretvarači napona i učestanosti pomoću kojih je moguće promenom napona i učestanosti rotorskog kola prilagođavati mehaničku karakteristiku generatora

uslovima pogonske mašine. To se pokazuje veoma važnim i povoljnim kada je pogonska mašina vetroturbina, zbog čega ova vrsta generatora nalazi veliku primenu kod korišćenja energije vetra, [2].

EKVIVALENTNA ŠEMA

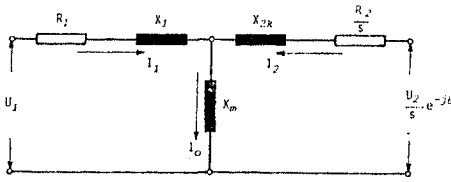
Ekvivalentna šema asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem u sinhronom režimu rada dobija se iz osnovnih naponskih jednačina statora i rotora, [3]:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_S) \underline{I}_1 + jX_m \underline{I}_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\underline{U}_2}{s} = jX_m \underline{I}_1 + \left(\frac{R_2}{s} + jX_R \right) \underline{I}_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

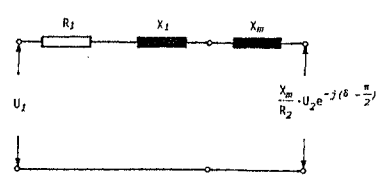
gde je: $\underline{U}_1 = U_1 e^{j\theta}$, $\underline{U}_2 = U_2 e^{-j\delta}$, $X_S = X_1 + X_m$, $X_R = X_{2K} + X_m$ i prikazana je na slici 2.

Ekvivalentna šema na slici 2 može se primeniti za sve režime rada asinhronog motora sa dvostranim napajanjem izuzev za režim rada koji se ima pri $s = 0$, čemu odgovara slučaj kada se rotor napaja jednosmernom strujom. Za taj režim rada, primenom Tevenenove teoreme, polazeći od ekvivalentne šeme na slici 2 dolazi se do ekvivalentne šeme na slici 3.



Slika 2. Ekvivalentna šema asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem

Picture 2. Equivalent scheme of the doubly-fed asynchronous machine



Slika 3. Ekvivalentna šema asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem za s = 0

Picture 3. Equivalent scheme of the doubly-fed asynchronous machine for s = 0

MATEMATIČKI MODEL

S obzirom na karakteristike režima rada asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem matematički model koji omogućava analizu stacionarnih i prelaznih režima rada, najpovoljnije je definisati u odnosu na referentnu osu vezanu za stator, čija je brzina jednaka sinhronoj brzini ω_s (kružna statorska učestanost), [4], čemu odgovara sledeći sistem kompleksnih jednačina:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \frac{d\underline{\psi}_1}{dt} + j\omega_1 \underline{\psi}_1 \quad \dots \quad (3)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} + j(\omega_1 - \omega) \underline{\psi}_2 \quad \dots \quad (4)$$

$$\underline{\psi}_1 = L_s \underline{I}_1 + L_m \underline{I}_1 \quad \dots \quad (5)$$

$$\underline{\psi}_2 = L_m \underline{I}_1 + L_r \underline{I}_2 \quad \dots \quad (6)$$

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

$$\underline{u}_1 = r_1 \underline{i}_1 + (p + j) \underline{\psi}_1 \quad \dots \quad (7)$$

$$\underline{u}_2 = r_2 \underline{i}_2 + (p + js) \underline{\psi}_2 \quad \dots \quad (8)$$

$$\underline{\psi}_1 = x_s \underline{i}_1 + x_m \underline{i}_2 \quad \dots \quad (9)$$

$$\underline{\psi}_2 = x_m \underline{i}_1 + x_r \underline{i}_2 \quad \dots \quad (10)$$

gde je klizanje s definisano relacijom:

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad \dots \quad (11)$$

Za stacionarni režim rada ($p = 0$) dobija se da je:

$$\underline{u}_1 = r_1 \underline{i}_1 + j \underline{\psi}_1 \quad \dots \quad (12)$$

$$\underline{u}_2 = r_2 \dot{i}_2 + js\underline{\psi}_2 \quad \dots\dots\dots \quad (13)$$

$$\underline{\psi}_1 = x_s \dot{i}_1 + x_m \dot{i}_2 \quad \dots\dots\dots \quad (14)$$

$$\underline{\psi}_2 = x_m \dot{i}_1 + x \dot{i}_2 \quad \dots\dots\dots \quad (15)$$

Usvajajući da se vektor napona statora poklapa sa referentnom osom, kompleksni izrazi napona statora i rotora mogu se definisati sledećim izrazima:

$$\underline{u}_1 = u_1 e^{j0} \quad \text{i} \quad \underline{u}_2 = u_2 e^{-j\alpha} \quad \dots\dots\dots \quad (16)$$

Rešavanjem sistema jednačina (12), (13), (14) i (15), uz uzimanje u obzir izraza (16), dolazi se do izraza za sve veličine datog režima rada asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem (struje statora i rotora, elektromagnetni momenat, aktivne, reaktivne i prividne snage statora i rotora, faktori snage statora i rotora, gubici, stepen iskorišćenja i dr., [3], [5] i [6].

Značenje pojedinih oznaka u navedenim jednačinama je poznato iz osnovne teorije asinhronih mašina, [7].

TOKOVI SNAGA U ASINHRONOJ MAŠINI SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM

Osobine asinhronih mašina sa dvostranim napajanjem u pogledu tokova snaga sa strane statora i sa strane rotora imaju veliki značaj za mnoge oblasti njihove primene, uključujući i primenu za korišćenje energije vetra.

Kada asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem radi kao motor, u podsinhronom režimu rada (klizanje pozitivno) energija klizanja se po odbitku gubitaka u rotoru vraća u mrežu, a u nadsinhronom režimu rada (klizanje negativno) aktivna snaga se dovodi i sa strane statora i sa strane rotora, čime se npr. omogućava da motor pri dvostrukoj sinhronoj brzini i nominalnom momentu razvija dva puta veću snagu od nominalne.

I u generatorskom režimu rada se ima slična situacija. U nadsinhronom režimu asinhronog generatora snaga se daje mreži (potrošačima) i sa strane statora i sa strane rotora, dok se u podsinhronom režimu rada aktivna snaga daje mreži sa strane statora, dok se rotor napaja iz mreže. To znači da pri nadsinhronoj brzini pogonske mašine (npr. vetroturbina) koja pokreće rotor, asinhroni generator može da radi sa snagom većom od nominalne pošto je ukupna snaga koja se generiše jednaka zbiru snaga statora i rotora. Zato se npr. prenosni odnos u reduktoru vetroturbine bira tako da se nominalna snaga generatora postiže pri brzinama koje su manje od nominalne, [2].

Navedene osobine asinhronog generatora važe za aktivnu snagu, ali posebno za rad generatora važni su i tokovi reaktivne snage kojima je neophodno upravljati na odgovarajući način, [2].

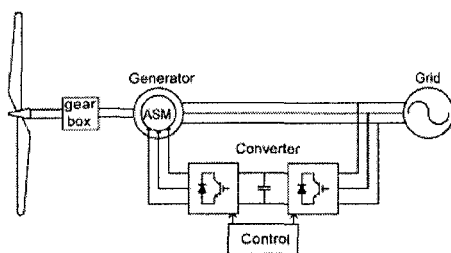
PRIMENA ASINHRONOG GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM U VETROELEKTRANAMA

Obnovljivim izvorima energije se danas u svetu posvećuje velika pažnja, jer predstavljaju veliku šansu da se smanji potrošnja konvencionalnih goriva, poboljša zaštita životne sredine i poveća korišćenje domaćih energetske potencijala. Od svih obnovljivih izvora energije dominantnu ulogu ima vetar, jer su njegove prednosti višestruke, [8]. 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 pri 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 u vetroelektranama od kojih su najzastupljeniji kavezni asinhroni generatori, sinhroni generatori i asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem, [8].

Kod savremenih vetrogeneratorskih jedinica veće snage danas najveću zastupljenost imaju asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem. Na slici 4 prikazana je principijelna šema vetrogeneratorskog postrojenja priključenog na električnu mrežu sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem.



Slika 4. Vetrogeneratorsko postrojenje sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem
Picture 4. Wind turbine plant with the doubly-fed asynchronous machine

Namotaj statora je direktno priključen na mrežu, a namotaj rotora je, preko kliznih prstenova, pretvarača napona i učestanosti i eventualno transformatora takođe priključen na mrežu.

Osnovni zahtev koji se postavlja kod eksploatacije energije vetra jeste obezbediti u svakom trenutku što veći stepen iskorišćenja. Prema Betz-ovom 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 vidi se da se optimalan stepen iskorišćenja vetroturbine, za različite brzine vetra, postiže pri različitim ugaonim brzinama turbine, [9]. To znači da pri elektromehaničkom pretvaranju energije vetra u električnu energiju generator treba da radi sa promenljivom brzinom obrtanja. Tehničke i ekonomske analize su pokazale da tim zahtevima najbolje odgovara asinhroni generator sa dvostranim napajanjem, [2]. Osnovni razlog za to jeste činjenica da, za razliku od standardnog asinhronog generatora, električna snaga asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem ne zavisi od brzine. To omogućava realizaciju vetrogeneratora čija je brzina promenljiva, a koji omogućava rad turbine na optimalnoj radnoj tački, za određeni interval brzine vetra.

ZAKLJUČAK

Asinhrona mašina sa dvostranim napajanjem jeste režim rada asinhronne mašine sa namotanim rotorom u kome se dovod (odvod) električne energije vrši i sa strane statora i sa strane rotora.

Najčešće se napajanje sa strane statora vrši direktno iz mreže, a napajanje sa strane rotora preko poluprovodničkog pretvarača koji omogućava regulisanje učestanosti, amplitude i faze napona koji se uvodi u kolo rotora. Asinhrona mašina može da radi i u režimu motora i u režimu generatora, sa brzinama većim i manjim od sinhronne brzine. Asinhroni motor sa dvostranim napajanjem ima veoma dobre osobine u pogledu mogućnosti regulisanja brzine, potrošnje reaktivne energije i rada sa visokim stepenom korisnog dejstva. Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem predstavlja veoma pogodno tehničko rešenje za proizvodnju električne energije u uslovima promenjive brzine obrtanja rotora zbog čega danas predstavlja najzastupljeniji električni generator u vetroelektranama.

LITERATURA

- [1] Vukić Đ., Milkić Ž., Stojanović D., Mitrović N.: „The characteristics and development trends for double - fed induction motor”, Fifth International Conference, „Tesla III Millennium”, Proceedings, p. 139-147, Beograd (1996);
- [2] Petersson A.: „Analysis, Modeling and Control of Double - Fed induction Generators for Wind Turbines”, Goteborg, Chalmers University of Technology, Goteborg (Sweden) (2003);
- [3] Vukić Đ., Petrović M.: „Statičke karakteristike asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem”, Simpozijum „Energetska elektronika 86”, Zbornik radova, Subotica (1986);
- [4] Važnov A. I.: „Perehodnie processi v mašinah peremennogo toka”, Energija, Leningrad (1980);
- [5] Vukić Đ., Stajić Z., Vukić Marija: „An Optimization reactive power consumption of double-fed induction motors”, IX International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET 97), Book of Proceedings, p. 135-140, Palermo (Italy) (1997);
- [6] Vukić Đ.: „Karakteristike momenta asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem”, Publikacije Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, br: 148, Beograd (1990);
- [7] Vukić Đ., Stajić Z., Radić P.: „Asinhronne mašine - zbirka zadataka”, Akademski misao, Beograd (2004);
- [8] Buton T. et al: „Wind Energy Handbook”, John Wiley and Sons Ltd, (2001);
- [9] Đurišić Ž., Krajišnik N., Božović D.: „Dvostrano napajana asinhrona mašina primenjena u vetrogeneratorima”, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene u zemlji, Podgorica (2004);
- [10] Radičević B., Vukić Đ.: „Upporedna analiza vetroenergetskog potencijala i mogućnosti korišćenja energije vetra u Srbiji i Crnoj Gori”, časopis „Poljoprivredna tehnika”, br. 1/2, str. 79-101, Beograd (2003).

Rad primljen: 25.10.2004.

Rad prihvaćen: 04.11.2004.