



UDK: 621.313.1

AKTIVNA I REAKTIVNA SNAGA ASINHRONOG GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM

Žarko Milkić, Đukan Vukić*, Aleksandar Čukarić

Fakultet tehničkih nauka - K. Mitrovica

**Poljoprivredni fakultet - Beograd*

Sadržaj: U radu su date karakteristike aktivne i reaktivne snage asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem. Definisana je matematički model primenom teorije prostornih vektora. Izvedeni su izrazi za aktivnu i reaktivnu snagu statora i rotora. Na osnovu njih nacrtane su karakteristike u funkciji klizanja za konstantne vrednosti ugla opterećenja, kao i u funkciji ugla opterećenja, za konstantno klizanje. Izvršena je analiza tokova snaga za brzine manje i veće od sinhronne. Na osnovu toga, ukazano je na mogućnost korišćenja asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u vetroelektranama.

Ključne reči: *asinhroni generator sa dvostranim napajanjem, aktivna snaga, reaktivna snaga, poluprovodnički pretvarač, vetroelektrana*

1. UVOD

Asinhrona mašina predstavlja najzastupljeniju električnu mašinu u svim oblastima tehnike, ali najpre kao motor. Određena ograničenja onemogućavala su da se šire koristi kao generator. Međutim, naglim razvojem statičkih pretvarača sa regulisanim poluprovodnicima, mnogi su nedostaci prevaziđeni.

Naročito povoljno rešenje predstavlja rad asinhronog generatora u režimu dvostranog napajanja. Tada se namotaj statora direktno priključuje na električni mrežu, dok se u rotorski krug povezuju poluprovodnički pretvarači napona i učestanosti.

Aдекватnom promenom napona i učestanosti rotorskih veličina obezbeđuje se pouzdan rad asinhronog generatora u širem opsegu promene brzine rotora, kako za brzine manje, tako i za brzine veće od sinhronne [1].

U oba slučaja stator predaje aktivnu snagu mreži. Istovremeno mrežu napaja aktivnom snagom i sa strane rotora, za brzine manje od sinhronne, dok za brzine veće od brzine obrtnog polja istu uzima iz mreže.

2. MATEMATIČKI MODEL

Posmatra se rad asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u sinhronom režimu rada, Zato je najpogodnije koristiti matematički model dobijen primenom teorije prostornih vektora [2], [3], koji je definisan u odnosu na referentnu osu vezanu za stator, čija je brzina jednaka sinhronoj brzini ω_s , (kružna učestanost statora).

Naponske jednačine i jednačine za flukseve posmatrane u tom koordinatnom sistemu

$$\mathbf{U}_s = -\mathbf{I}_s R_s - \frac{d\mathbf{\Psi}_s}{dt} - j\omega_s \mathbf{\Psi}_s \quad (1)$$

$$\mathbf{U}_r = -\mathbf{I}_r R_r - \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt} - j(\omega_s - \omega) \mathbf{\Psi}_r \quad (2)$$

$$\mathbf{\Psi}_s = \mathbf{I}_s L_s + \mathbf{I}_r L_m \quad (3)$$

$$\mathbf{\Psi}_r = \mathbf{I}_s L_m + \mathbf{I}_r L_r \quad (4)$$

napisane su u apsolutnim jedinicama. Nadalje će sva razmatranja biti sprovedena u relativnim jedinicama. U tom slučaju, jednačine dobijaju oblik:

$$\mathbf{u}_s = -\mathbf{i}_s r_s - (p + j) \mathbf{\Psi}_s \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_r = -\mathbf{i}_r r_r - (p + js) \mathbf{\Psi}_r \quad (6)$$

$$\mathbf{\Psi}_s = \mathbf{i}_s x_s + \mathbf{i}_r x_m \quad (7)$$

$$\mathbf{\Psi}_r = \mathbf{i}_s x_m + \mathbf{i}_r x_r \quad (8)$$

gde je:

$$x_s = x_{s\gamma} + x_m \quad - \text{ukupna induktivna otpornost po fazi statora}$$

$$x_r = x_{r\gamma} + x_m \quad - \text{ukupna induktivna otpornost po fazi rotora}$$

a klizanje definisano relacijom:

$$s = f_r / f_s = (\omega_s - \omega) / \omega_s \quad (9)$$

Analiziraćemo stacionarni režim rada, pa posle zamene $p = 0$, dobijamo:

$$\mathbf{u}_s = -\mathbf{i}_s r_s - j \mathbf{\Psi}_s \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_r = -\mathbf{i}_r r_r - js \mathbf{\Psi}_r \quad (11)$$

$$\mathbf{\Psi}_s = \mathbf{i}_s x_s + \mathbf{i}_r x_m \quad (12)$$

$$\mathbf{\Psi}_r = \mathbf{i}_s x_m + \mathbf{i}_r x_r \quad (13)$$

Vektor napona statora \mathbf{u}_s , usvajamo da se poklapa sa pozitivnim smerom realne ose, dok vektor napona rotora \mathbf{u}_r , prednjači za ugao δ . Dakle,

$$\mathbf{u}_s = u_s \cdot e^{j0^\circ} \quad \mathbf{u}_r = u_r \cdot e^{j\vartheta} \quad (14)$$

odnosno, ugao δ je ugao pomeraja između vektora napona statora i rotora.

Na osnovu ekvivalentne šeme i vektorskih dijagrama asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u sinhronom režimu rada [2], pokazuje se da se veza između ugla pomeraja vektora napona statora i rotora δ i ugla između ose rotora i vektora napona statora ϑ (ugao opterećenja, po analogiji sa sinhronim mašinama) definiše relacijom:

$$\delta = \vartheta - \alpha \quad (15)$$

gde je ugao α definisan sledećim izrazom:

$$\alpha = \arctg\left(-\frac{b}{a}\right) = \arctg \frac{sr_s x_r - r_r x_s}{r_s r_r + sx_s x_r - sx_m^2} \quad (16)$$

3. AKTIVNE I REAKTIVNE SNAGE

Rešavanjem naponskih jednačina i jednačina za flukseve dobijamo izraze za:

- aktivne snage statora i rotora

$$p_s = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [(r_r k_1 + sx_r k_2) - ux_m (k_2 \cos \vartheta + k_1 \sin \vartheta)] \quad (17)$$

$$p_r = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [usx_m (k_1 \sin \vartheta - k_2 \cos \vartheta) + u^2 (r_s k_1 + x_s k_2)] \quad (18)$$

- reaktivne snage statora i rotora

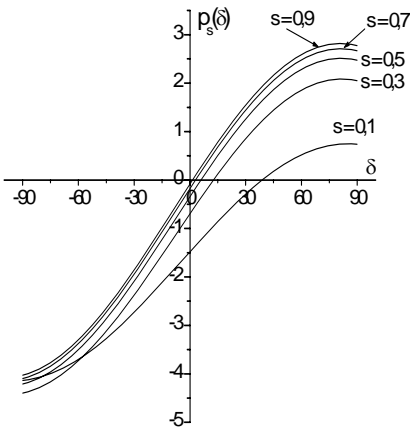
$$q_s = -\frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [(sx_r k_1 - r_r k_2) - ux_m (k_1 \cos \vartheta - k_2 \sin \vartheta)] \quad (19)$$

$$q_r = -\frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [u^2 (x_s k_1 - r_s k_2) - usx_m (k_1 \cos \vartheta + k_2 \sin \vartheta)] \quad (20)$$

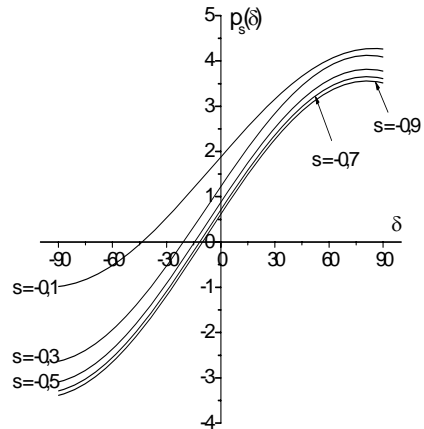
gde su: $k_1 = r_s r_r - s(x_s x_r - x_m^2)$, $k_2 = sr_s x_r + r_r x_s$ i $u = u_r / u_s$

Sve karakteristične veličine se mogu analizirati u funkciji ugla δ , međutim prikladnije je analizu izvršiti u funkciji ugla opterećenja δ , pošto asinhroni motor radi u sinhronom režimu. Pri tome napon i učestanost statora ostaju konstantni, dok se rotorske veličine menjaju uz konstantan odnos napona rotora i učestanosti rotora, odnosno $u_r / f_r = \text{const}$. Kako je $s = f_r / f_s$ u relativnim jedinicama će biti $u_r = s$.

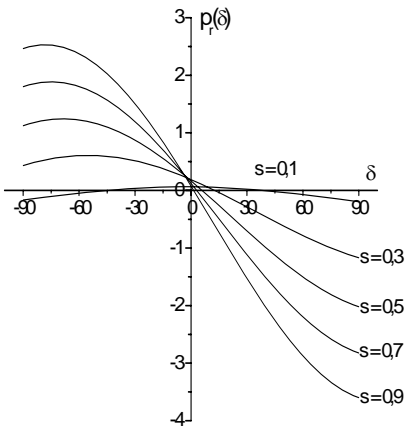
Na osnovu izraza (17) i (18), na Sl. 1, 2, 3. i 4. prikazane su zavisnosti aktivnih snaga stratora i rotora u funkciji ugla opterećenja, za pozitivna i negativna klizanja, dok su na Sl. 5, 6, 7. i 8. predstavljene zavisnosti aktivnih snaga statora i rotora u funkciji klizanja za konstantne vrednosti ugla opterećenja. Karakteristike su nacrtane za asinhroni generator snage 200 kVA, čiji su parametri ekvivalentne šeme, u relativnim jedinicama: $r_s = 0,022$, $r_r = 0,026$, $x_{s\gamma} = 0,14$, $x_{r\gamma} = 0,14$ i $x_m = 3,4$.



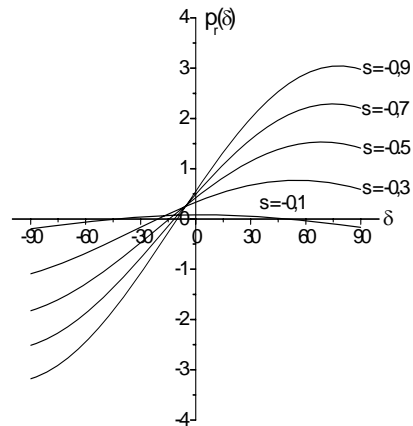
Sl. 1. Zavisnost $p_s = f(\delta)$
za $s > 0$



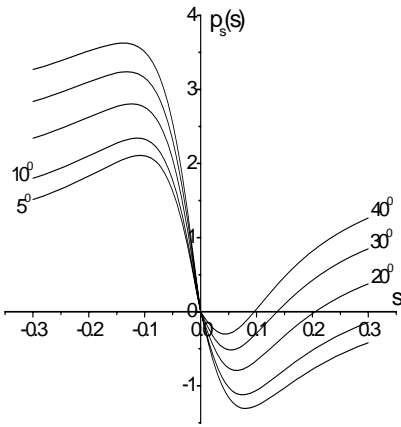
Sl. 2. Zavisnost $p_s = f(\delta)$
za $s < 0$



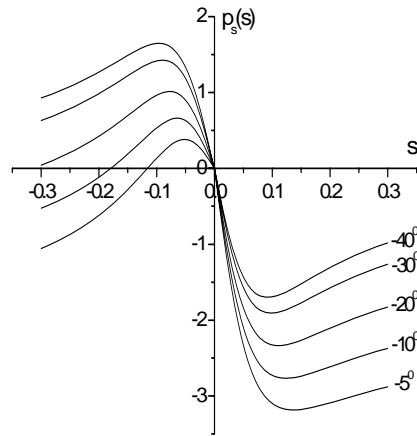
Sl. 3. Zavisnost $p_r = f(\delta)$
za $s > 0$



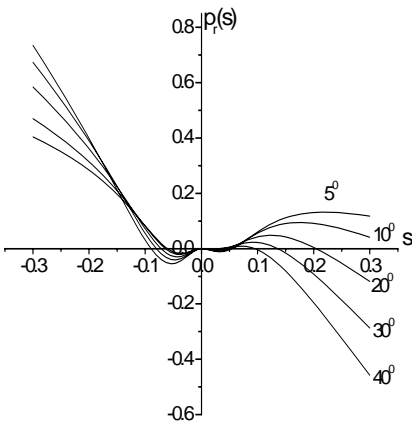
Sl. 4. Zavisnost $p_r = f(\delta)$
za $s < 0$



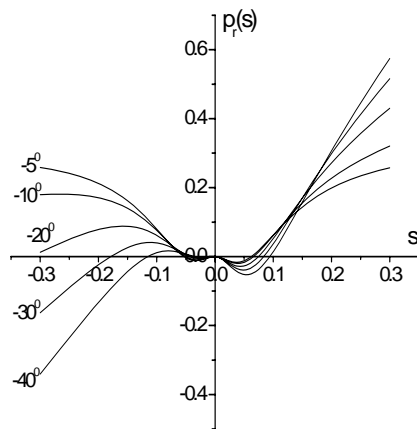
Sl. 5. Zavisnost $p_s = f(s)$
za $\delta > 0$



Sl. 6. Zavisnost $p_s = f(s)$
za $\delta < 0$

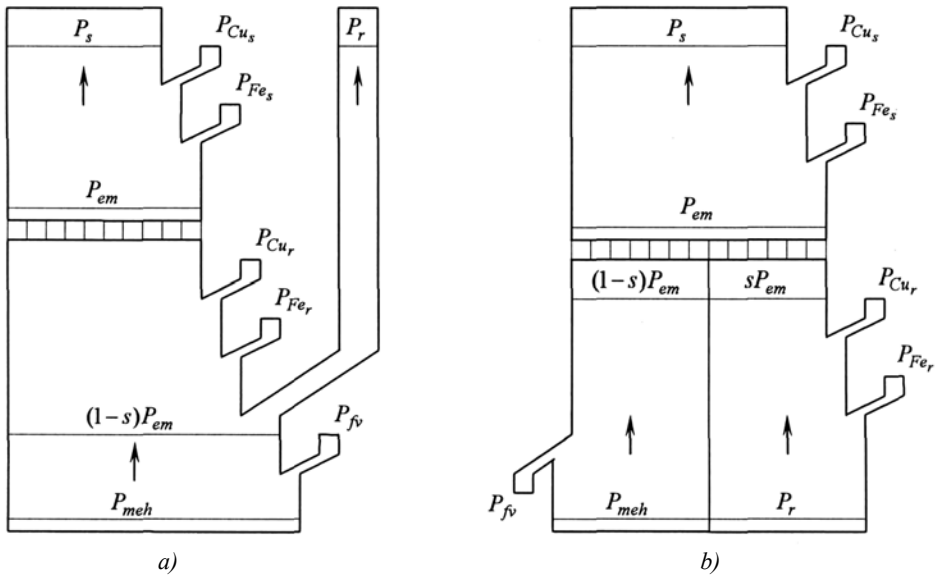


Sl. 7. Zavisnost $p_r = f(s)$
za $\delta > 0$



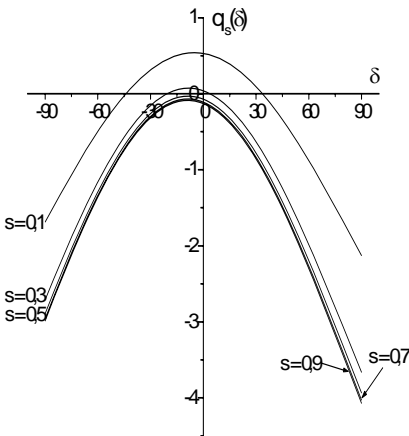
Sl. 8. Zavisnost $p_r = f(s)$
za $\delta < 0$

Analizom predstavljenih karakteristika dolazi se do saznanja o specifičnim tokovima aktivnih snaga asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem, na osnovu čega je na Sl. 9. nacrtan energetski bilans. U slučaju kada generator radi sa brzinama manjim od sinhrona ($s > 0$), snaga se daje mreži, odnosno potrošačima, kako sa strane statora, tako i sa strane rotora, Sl. 9.a), dok se pri brzinama većim od sinhrona ($s < 0$), aktivna snaga daje mreži sa strane statora, dok se rotor napaja iz mreže (Sl. 9.b). To znači da se pri klizanjima većim od nule, dvostranim napajanjem može postići da radi sa snagom većom od nominalne, pošto je ukupna aktivna snaga jednaka zbiru snaga statora i rotora.

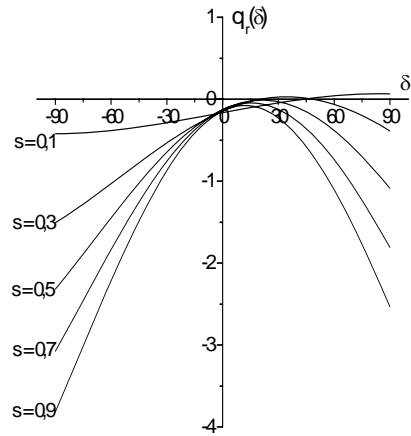


Sl. 9. Energetski bilans asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem
a) za $s > 0$ b) za $s < 0$

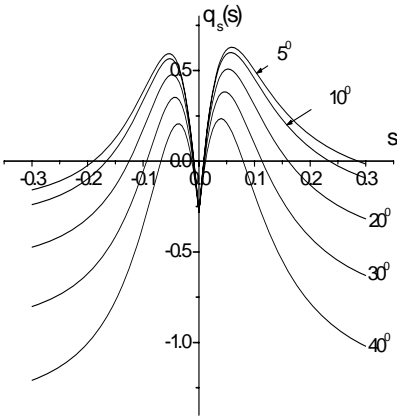
Takođe, veoma su važni i tokovi reaktivnih snaga asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem [4]. Ilustracije radi, na Sl. 10. i 11, prikazane su promene reaktivnih snaga statora i rotora u funkciji ugla opterećenja, za konstantna klizanja, dok su na Sl. 12. i 13. date zavisnosti u funkciji klizanja za konstantne ugllove.



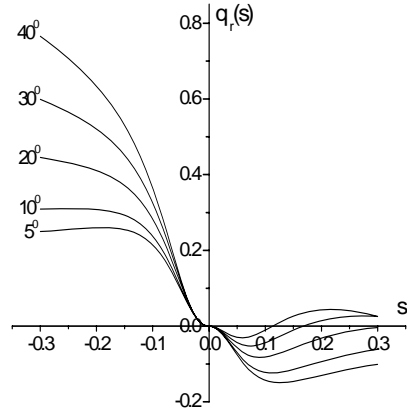
Sl. 10. Zavisnost $q_s = f(\delta)$
za $s > 0$



Sl. 11. Zavisnost $q_r = f(\delta)$
za $s < 0$



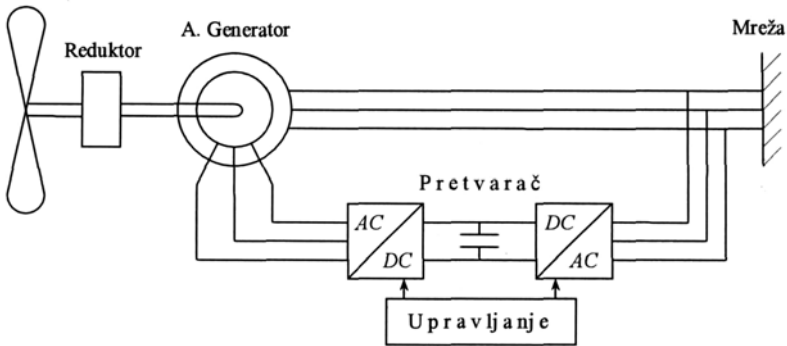
Sl. 12. Zavisnost $q_s = f(s)$ za $\delta > 0$



Sl. 13. Zavisnost $q_s = f(s)$ za $\delta < 0$

4. PRIMENA ASINHRONOG GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM U VETROELEKTRANAMA

Kako se neprekidno povećava potrošnja energije u svetu, a zalihe konvencionalnih goriva ubrzano smanjuju, javlja se potreba za korišćenjem onih izvora energije koji se obnavljaju. Iz tog se razloga vetroenergetika zadnjih godina najintenzivnije proučava, jer je potencijal vetra ogroman [6].



Sl. 14. Vetrogeneratorsko postrojenje sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem

Jedan od osnovnih problema koji u procesu pretvaranja energije vetra u električnu treba rešiti, jeste određivanje odgovarajućeg električnog generatora, koji treba pouzdano i efikasno da radi u određenim tehničkim uslovima.

Za primenu u vetroelektranama većih snaga, kojih je danas u svetu sve više, najpogodniji je asinhroni generatori sa dvostranim napajanjem. Na Sl.14. je prikazana principijelna šema vetrogeneratorskog postrojenja sa asinhronom generatorom sa dvostranim napajanjem. Namotaji stratora i rotora su istovremeno priključeni na električnu mrežu. U kolu rotora je preko kliznih prstenova povezan poluprovodnički pretvarač napona i učestanosti.

Jedna od prednosti ovog generatora je što se zadavanjem odgovarajućeg zakona promene napona i učestanosti rotora može ostvariti efikasan rad postrojenja za različite brzine vetra, koje mogu biti manje i veće od sinhrone. Ovo je naročito važno iz razloga, što vetroturbina optimalan stepen iskorišćenja ostvaruje za različite brzine vetra, pri različitim ugaonim brzinama turbine [7].

Druga važna osobina asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem ogleda se u tome, što se u slučaju rada sa pozitivnim klizanjem ($s > 0$), snaga predaje mreži kako sa strane statora tako i sa strane rotora. Drugim rečima, on tada radi sa snagom većom od nominalne, pošto je ukupna aktivna snaga jednaka zbiru snaga statora i rotora.

ZAKLJUČAK

Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem predstavlja dobro tehničko rešenje za pretvaranje energije vetra u električnu. Njegova osobina da pouzdano radi u uslovima promenljive brzine obrtanja rotora, čini ga najzastupljenijim, naročito u vetroelektranama veće snage, gde su njegove prednosti posebno izražene. Može da radi sa brzinama većim i manjim od sinhrone brzine. U režimu rada sa pozitivnim klizanjem predaje mreži aktivnu snagu veću od nominalne. Takođe se može upravljati i sa reaktivnim snagama. Ovakav rad omogućen je napajanjem asinhronog generatora i sa strane rotora, preko poluprovodničkih pretvarača, koji omogućavaju regulisanje učestanosti, amplitude i faze napona rotora.

SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA

f_s - frekvencija statora	r_s - aktivna otpornost po fazi statora
f_r - frekvencija rotora	r_r - aktivna otpornost po fazi rotora
i_s - struja statora	u_s - napon statora
i_r - struja rotora	u_r - napon rotora
p - diferencijalni operator	$x_{s\gamma}$ - reaktansa rasipanja po fazi statora
p_s - aktivna snaga statora	$x_{r\gamma}$ - reaktansa rasipanja po fazi rotora
p_r - aktivna snaga rotora	x_m - reaktansa magnećenja
q_s - reaktivna snaga statora	ψ_s - magnetni fluks statora
q_r - reaktivna snaga rotora	ψ_r - magnetni fluks rotora

Napomena: Kompleksne veličine su označene masnim slovima.

LITERATURA

- [1] Petersson A.: *Analysis, Modeling and Control of Double - Fed induction Generators for Wind Turbines*, Geteborg, Chalmers University of Tehnology, Geteborg (Sweden) (2003).
- [2] Važnov A.I.: *Perehodnie processi v mašinah peremenoga toka*, Energija, Leningrad (1980).
- [3] Milkić Ž.: *Karakteristike asinhrone mašine u režimu dvostranog napajanja*, Magistarska teza, Priština (1995).
- [4] 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).
- [5] Vukić Đ., Ercegović Đ., Radičević B.: *Generatori za pretvaranje energije vetra u električnu energiju*, Poljoprivredna tehnika, broj 4, pp. 94-102, Beograd, 2005.
- [6] Buton T. Et al: *Wind Energy Handbook*, John Wiley and SONS Ltd, (2001).
- [7] Đurišić Ž., Krajišnik N., Božović D.: *Dvostrano napajana asinhrona mašina primenjena u vetrogeneratorima*, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene u zemlji, str. 134-141, Podgorica (2004).

ACTIVE AND REACTIVE POWER OF A DOUBLE-FED ASYNCHRONOUS GENERATOR

Žarko Milkić, Đukan Vukić*, Aleksandar Čukarić

*Fakultet tehničkih nauka - K. Mitrovica***Poljoprivredni faultet - Beograd*

Abstract: This paper presents the characteristics of active and reactive power of a double-fed asynchronous generator. Mathematical model are defined applying a theory of space vectors. Expressions for active and reactive power on stator and rotor are derived and obtained main characteristics are processed. A power flow analysis for speed less and great then synchronous is performed. According to the obtained characteristics it is pointed out that a double-fed asynchronous generator may be used in wind power plants, where electric power is generated from wind energy.

Key words: *doubly-fed asynchronous generator, active power, reactive power, wind power plants, semiconductor converter.*