

POGONSKE KARAKTERISTIKE ASINHRONOG GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM PRIMENJENOG U VETROELEKTRANAMA

Žarko Milkić¹, Đukan Vukić²

SAŽETAK:

U radu je definisan matematički model asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem primenom teorije prostornih vektora, u odnosu na referentnu osu vezanu za stator. Izvedeni su izrazi za karakteristične veličine, nacrtane su pogonske karakteristike za momenat, aktivne i reaktivne snage, faktor snage i stepen iskorišćenja, na osnovu kojih je izvršena analiza rada u uslovima sa različitim brzinom obrtanja. Na osnovu toga ukazano je na mogućnosti i prednosti primene asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u vetroelektranama, za dobijanje električne energije iz energije vetra.

Ključne reči: asinhroni generator sa dvostranim napajanjem, vetroelektrana, energetski pretvarač, IGBT tranzistor

1. UVOD

Električna se energija decenijama dobijala iz konvencionalnih izvora: uglja, nafte, gasa, nuklearnog goriva. Međutim, ovu proizvodnju prate i neki neželjeni efekti, a pre svega zagađenje životne sredine koje postaje alarmantno. Sa druge strane, period obnavljanja fosilnih goriva je preterano dug, pa njihove rezerve polako nestaju.

Zato se krajem prošlog veka počelo sa proizvodnjom električne energije iz alternativnih, odnosno obnovljivih izvora. Sa tog aspekta najznačajnija je uloga vetra, jer je on besplatan, ogromnog kapaciteta, ekološki čist i vremenski neograničen.

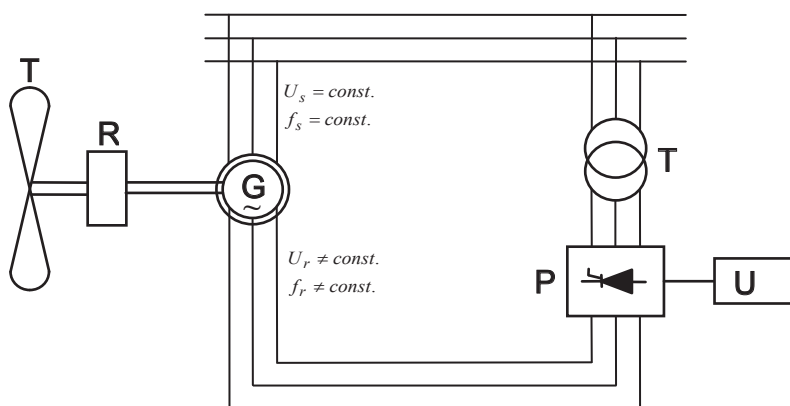
¹ Dr Žarko Milkić, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica.

² Prof. dr Đukan Vukić, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Nemanjina 6, 11081 Zemun.

Već danas, u nekim razvijenim zemljama, proizvodnja električne energije u vetroelektranama prevazilazi petinu ukupne proizvodnje električne energije, sa tendencijom intenzivnog rasta.

U procesu konverzije energije vetra u električnu energiju izuzetno je važno, zbog stohastičke prirode vetra, izabrati adekvatan električni generator. Jer suština ove konverzije ogleda se u tome da se odvija sa najvećim stepenom iskorišćenja vetroturbine, odnosno da se pri svakoj brzini vetra dobije maksimalna električna energija i to željenog kvaliteta [1].

Korišćenje standardnih električnih generatora je vezano sa nizom problema. Zato se rešenje sa asinhronim generatorom sa dvostranim napajanjem smatra najprihvatljivijim [2], (slika 1), naročito za velike snage, jer omogućava efikasnu promenu brzine obrtanja vetroagregata u širokom opsegu. Brzina se može menjati kako ispod sinhrona tako i iznad sinhrona brzine.



Sl. 1. Principijelna šema asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem

Stator se vezuje direktno na mrežu, dok se u kolo rotora nalazi energetski pretvarač napona i učestanosti, koji ujedno omogućava protok električne energije u oba smera.

Definisan je matematički model asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem, primenom teorije prostornih vektora. Koristeći opšte naponske jednačine i jednačine za flukseve, izvedeni su izrazi za sve karakteristične veličine, nacrtane su pogonske karakteristike u funkciji ugla opterećenja, odnosno u funkciji klizanja. Na osnovu analize pojedinih veličina, ukazano je na mogućnosti primene asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u vetroelektranama i na prednosti koje pruža.

2. MATEMATIČKI MODEL ASINHRONOG GENERATORA SA DVOSTRANIM NAPAJANJEM

Kako posmatramo rad asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u sinhronom režimu rada (regulisana se učestanost zadaje nezavisno), najpogodnije je koristiti matematički model dobijen primenom teorije prostornih vektora [3], [4], koji je definisan u odnosu na referentnu osu vezanu za stator, čija je brzina jednaka sinhronoj brzini ω_s .

Naponske jednačine i jednačine za flukseve, posmatrane u tom koordinatnom sistemu, napisane u relativnim jedinicama imaju oblik:

$$\mathbf{u}_s = -\mathbf{i}_s r_s - (p + j)\Psi_s \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_r = -\mathbf{i}_r r_r - (p + js)\Psi_r \quad (2)$$

$$\Psi_s = \mathbf{i}_s x_s + \mathbf{i}_r x_m \quad (3)$$

$$\Psi_r = \mathbf{i}_s x_m + \mathbf{i}_r x_r \quad (4)$$

gde su: x_s i x_r ukupne induktivne otpornosti po fazi statora i rotora respektivno, a klizanje je definisano relacijom:

$$s = f_r / f_s = (\omega_s - \omega) / \omega_s \quad (5)$$

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

$$\mathbf{u}_s = -\mathbf{i}_s r_s - j\Psi_s \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_r = -\mathbf{i}_r r_r - js\Psi_r \quad (7)$$

$$\Psi_s = \mathbf{i}_s x_s + \mathbf{i}_r x_m \quad (8)$$

$$\Psi_r = \mathbf{i}_s x_m + \mathbf{i}_r x_r \quad (9)$$

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 \mathcal{G} . Dakle,

$$\mathbf{u}_s = u_s \cdot e^{j0^\circ} \quad \mathbf{u}_r = u_r \cdot e^{j\mathcal{G}} \quad (10)$$

odnosno, ugao \mathcal{G} je ugao pomeraja između vektora napona statora i rotora.

Na osnovu vektorskog dijagrama asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u sinhronom režimu rada [4], pokazuje se da je veza između ugla pomeraja vektora napona statora i rotora - \mathcal{G} i ugla između ose rotora i vektora

napona statora - δ (ugao opterećenja, po analogiji sa sinhronim mašinama) data relacijom:

$$\delta = \vartheta - \alpha \quad (11)$$

gde je ugao α definisan sledećim izrazom:

$$\alpha = \arctg\left(-\frac{b}{a}\right) = \arctg\frac{sr_s x_r - r_r x_s}{r_s r_r + sx_s x_r - sx_m^2} \quad (12)$$

3. POGONSKE KARAKTERISTIKE

Rešavanjem naponskih jednačina i jednačina za flukseve (6), (7), (8) i (9), uvažavajući pretpostavke (10) i (11) i (12), dolazimo do izraza za karakteristične veličine asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem u sinhronom režimu rada. Pogonske karakteristike su nacrtane za asinhroni generator naznačene 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 $x_m = 3,4$. Napon i učestanost statora ostaju konstantni, dok se rotorske veličine menjaju uz konstantan odnos napona rotora i učestanosti rotora, odnosno $u_r/f_r = const$. Kako je $s = f_r/f_s$ u relativnim jedinicama će biti $u_r = s$.

3. 1. Elektromagnetni momenat

Opšti izraz za elektromagnetni momenat asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem je [4]:

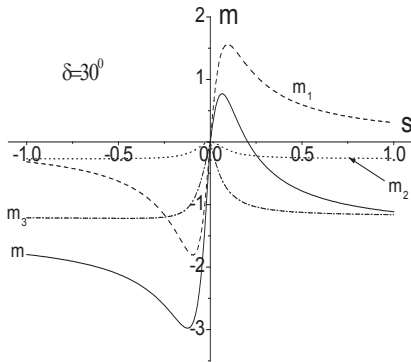
$$m_{em} = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} (sr_r x_m^2 - u^2 r_s x_m^2) + \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} ux_m \left[-(r_s r_r + sx_s x_r - sx_m^2) \sin \vartheta + (sr_s x_r - r_r x_s) \cos \vartheta \right] \quad (13)$$

ili izražen u funkciji ugla opterećenja

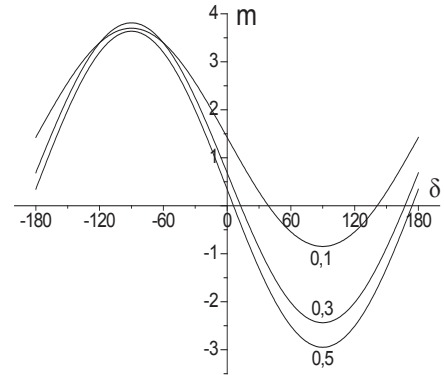
$$m_{em} = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} (sr_r x_m^2 - u^2 r_s x_m^2 + ux_m \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \delta = m_1 + m_2 + m_3 \quad (14)$$

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

Momentat se sastoji iz tri komponente. Prve dve (m_1) i (m_2) su asinhronone, dok je treća (m_3) sinhrona komponenta i odgovara momentu sinhronog genera-



Sl. 2. Zavisnost $m = f(s)$



Sl. 3. Zavisnost $m = f(\delta)$

tora na čiji se rotor dovodi napon u_r . Na sl. 2. predstavljene su komponente momenta, kao i rezultatni momentat u funkciji klizanja, za ugao opterećenja $\delta = 30^\circ$. Zbog prisustva sinhronne komponente, rezultatni momentat ima maksimalnu vrednost za ugao $\delta = \pi / 2$, za bilo koje klizanje, što je prikazano na sl. 3.

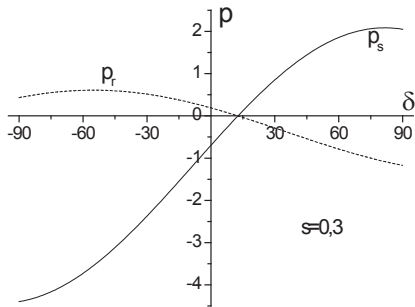
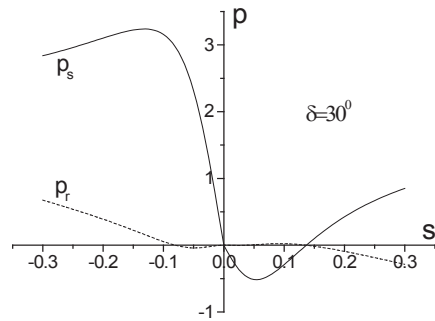
3. 2. Snage statora i rotora

Na osnovu konačnih izraza za aktivne snage statora (15) i rotora (16), [5],

$$p_s = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [(r_r k_1 + s x_r k_2) - u x_m (k_2 \cos \vartheta + k_1 \sin \vartheta)] \quad (15)$$

$$p_r = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [u s x_m (k_1 \sin \vartheta - k_2 \cos \vartheta) + u^2 (r_s k_1 + x_s k_2)] \quad (16)$$

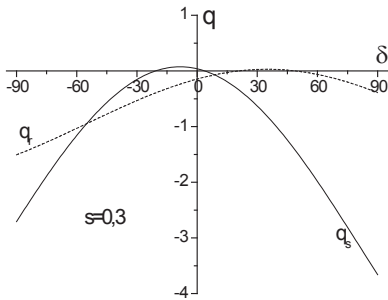
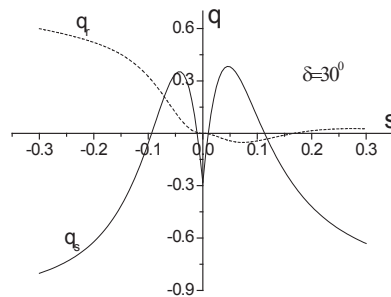
na sl. 4. i 5. nacrtnane su zavisnosti u funkciji klizanja, odnosno ugla opterećenja,

Sl. 4. Zavisnost $p = f(\delta)$ Sl. 5. Zavisnost $p = f(s)$

a na sl. 6. i 7. pogonske karakteristike za reaktivne snage, imajući u vidu (17) i (18).

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

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

Sl. 6. Zavisnost $q = f(\delta)$ Sl. 7. Zavisnost $q = f(s)$

Analizom prikazanih karakteristika [5], [6], dolazimo do saznanja o specifičnim tokovima snaga asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem. Kada generator radi sa brzinama koje su manje od sinhrona (pozitivno klizanje), aktivna se snaga predaje potrošačima sa strane statora, dok rotor uzima aktivnu snagu iz mreže. Međutim, u nadsinhronom režimu rada ($s < 0$), i stator i rotor

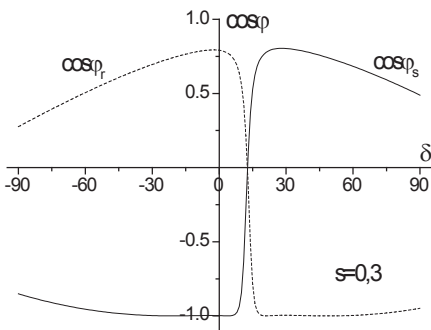
napajaju mrežu aktivnom snagom. To je velika prednost, jer se dvostranim napajanjem može ostvariti režim rada sa snagom koja je veća od naznačene, pošto je ukupna aktivna snaga jednaka zbiru aktivnih snaga statora i rotora.

3.3 FAKTOR SNAGE STATORA I ROTORA

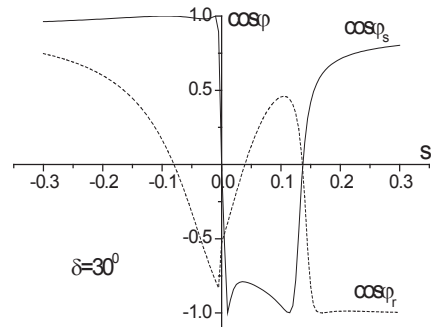
Zbog potreba elektroenergetskih sistema, asinhroni generator sa dvostranim napajanjem, koji je predviđen da proizvodi aktivnu snagu, u nekim slučajevima treba da generiše i reaktivnu, odnosno da radi sa željenim faktorom snage statora. Sa sl. 8. i 9. koje prikazuju promene faktora snage u zavisnosti od klizanja i ugla opterećenja, može se zaključiti, da se adekvatnom promenom napona rotora može obezbediti rad sa konstantnim faktorom snage.

$$\cos \varphi_s = \frac{(r_r k_1 + s x_r k_2) - u x_m (k_2 \cos \vartheta + k_1 \sin \vartheta)}{\sqrt{(k_1^2 + k_2^2) [(r_r^2 + s^2 x_r^2) + u^2 x_m^2 - 2 u x_m (s x_r \cos \vartheta + r_r \sin \vartheta)]}} \quad (19)$$

$$\cos \varphi_r = \frac{u (r_s k_1 + x_s k_2) - s x_m (k_2 \cos \vartheta - k_1 \sin \vartheta)}{\sqrt{(k_1^2 + k_2^2) [s^2 x_m^2 + u^2 (r_s^2 + x_s^2) - 2 u s x_m (x_s \cos \vartheta - r_s \sin \vartheta)]}} \quad (20)$$



Sl. 8. Zavisnost $\cos \varphi = f(\delta)$

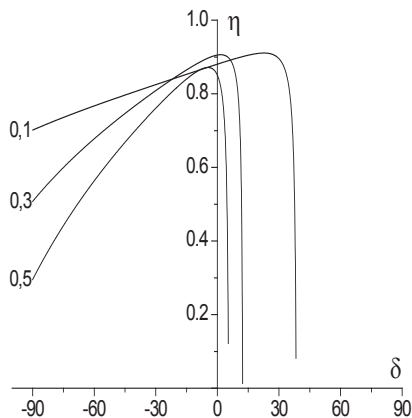
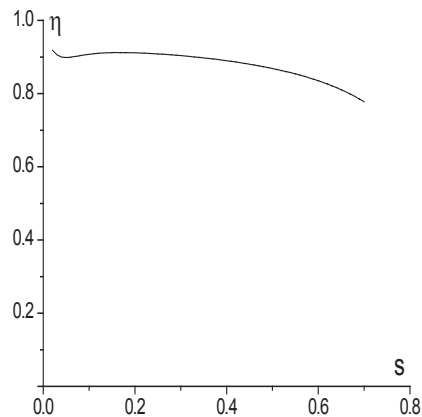


Sl. 9. Zavisnost $\cos \varphi = f(s)$

3.4 STEPEN ISKORIŠĆENJA

Osnovni pokazatelj ekonomičnosti rada asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem je analiza karakteristika stepena iskorišćenja [4], sl. 10. i 11. dobijenih na osnovu izraza

$$\eta = 1 - \frac{r_s i_s^2 + p_{Fe_s} + r_r i_r^2 + s p_{Hk_r} + s^2 p_{Fk_r} + p_{fv_n} (1-s)^{\frac{3}{2}}}{m_{em} (1-s) + p_{fv_n} (1-s)^{\frac{3}{2}}} \quad (21)$$

Sl. 10. Zavisnost $\eta = f(\delta)$ 

Sl. 11. Zavisnost

Upoređenjem sa karakteristikama u standardnom režimu rada može se uočiti izvesno smanjenje stepena iskorišćenja, što je posledica prisustva viših harmonika u strujama statora i rotora, što se odražava pre svega u pojavi dodatnih gubitaka i dodatnih momenata. Odgovarajućom promenom dovedenog napona rotora može se obezbediti rad sa minimalnim gubicima.

4. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu prikazane pogonske karakteristike, može se zaključiti da se asinhroni generator sa dvostranim napajanjem može efikasno koristiti u vetroelektranama, za transformaciju kinetičke energije vetra u električnu energiju. Kada se učestanost rotora zadaje nezavisno, može se obezbediti stabilan rad u širem opsegu promene brzine, uobičajeno 30% ispod i iznad sinhronne brzine.

Na taj način može se ostvariti efikasna konverzija energije, a to znači da se odvija sa najvećim iskorišćenjem vetroturbine (za svaku brzinu vetra postoji tačno određena brzina vetroturbine, kada je njen stepen iskorišćenja maksimalan).

Da bi se ostvarila željena promena napona koji se dovodi u rotor, u rotorsko kolo se uključuju energetska pretvarači sa regulisanim poluprovodnicima (tiristo-

ri, IGBT tranzistori itd.). Kako u različitim režimima energija u rotoru menja smer proticanja, energetski pretvarači moraju obezbediti protok energije iz mreže ka rotoru, ali i obrnuto. Zahvaljujući tome što se pri brzinama većim od sinhronne transformisana energija odvodi u mrežu kako sa strane statora tako i sa strane rotora, asinhroni generator sa dvostranim napajanjem može raditi sa snagom koja je veća od naznačene.

Kako je snaga koja se prenosi kroz rotor srazmerna klizanju, to će i snaga energetskog pretvarača biti srazmerna opsegu regulisanih brzina, obično do 30% od normalne snage vetrogeneratora.

Još jedna prednost asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem ogleda se u tome, što je moguće upravljanje njegovom reaktivnom snagom. Savremeni vetrogeneratori mogu raditi sa faktorom snage $\cos \varphi = \pm 0,9$, pri čemu se nezavisno upravlja aktivnom i reaktivnom snagom koja se generiše. Normalno je da će stvorena reaktivna snaga uticati na povećanje instalisane snage energetskog pretvarača.

5. 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] Vukić Đ., Ercegović Đ., Raičević D.: „Primena asinhronih generatora sa dvostranim napajanjem za korišćenje energije vetra“, *Crnogorska Akademija nauka i umjetnosti: Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene, knjiga 10, pp. 116-123, Podgorica 2006*.
- [3] Важнов А. И.: „Переходные процессы в машинах переменого тока“, *Энергия, Ленинград, 1980*.
- [4] Milkić Ž.: „Analiza rada asinhronne mašine sa dvostranim napajanjem i primena u vetrogeneratorским postrojenjima“, *Doktorska disertacija, K. Mitrovica, 2009*.
- [5] Milkić Ž., Vukić Đ., Čukarić A.: „Aktivna i reaktivna snaga asinhronog generatora sa dvostranim napajanjem“, *Časopis Poljoprivredna tehnika, broj 4, Beograd, 2007*.
- [6] 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*.

POWER CHARACTERISTICS A DOUBLE-FED ASYNCHRONOUS
GENERATOR IN WIND POWER PLANTS

ABSTRACT:

This paper presents mathematical model of a double-fed asynchronous generator, defined applying a theory of space vectors. Expressions for all characteristics values are derived and obtained main characteristics are processed. A power flow analysis for speed less and great than 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.

Keywords: *doubly-fed asynchronous generator, wind power plants, semiconductor converter, IGBT transistor*