

UDK: 621.314.1

Originalni naučni rad
Original scientific paper

СНАГЕ СТАТОРА И РОТОРА АСИНХРОНОГ ГЕНЕРАТОРА СА ДВОСТРАНИМ НАПАЈАЊЕМ ПРИМЕЊЕНОГ У ВЕТРОЕЛЕКТРАНАМА

Жарко Милкић^{1*}, Ђукан Вукић², Александар Чукарић¹

¹ Универзитет у Приштини, Факултет техничких наука, Косовска Митровица

² Универзитет у Београду, Пољопривредни факултет,
Институт за пољопривредну технику, Београд-Земун

Сажетак: Због стохастичке природе ветра, асинхрони генератор са двостраним напајањем, може се ефикасно користити у процесу трансформације енергије ветра у електричну енергију, нарочито за случај већих снага. Посебна погодност ове врсте генератора огледа се у томе, што ефикасно могу радити са брзинама које су веће или мање од синхроне брзине. На основу математичког модела, применом теорије просторних вектора, изведени су изрази, односно нацртане су карактеристике за активне и реактивне снаге статора, односно ротора.

Анализом добијених карактеристика уочени су специфични токови активних снага синхроних генератора са двостраним напајањем, на основу чега је нацртан енергетски биланс и указано на предности њиховог коришћења.

Кључне речи: асинхрони генератор са двостраним напајањем, ветроелектрана, енергетски претварач, снаге статора и ротора, губици снаге

УВОД

Од свих обновљивих извора енергије, када је у питању њена трансформација у електричну енергију, најзначајнију улогу има ветар, јер је временски неограничен, еколошки чист, а уједно бесплатан. У том процесу претварања енергије ветра у електричну енергију, као један од најважнијих захтева који се том приликом јавља јесте избор и конструкција електричног генератора, кога треба да

* Контакт autor. E-mail: zarkomilkic@yahoo.com

Rad je rezultat istraživanja u okviru projekta „Razvoj novih informaciono-komunikacionih tehnologija, korišćenjem naprednih matematičkih metoda, sa primenama u medicini, telekomunikacijama, energetici, zaštititi nac. baštine i obrazovanju“, III-44006.

карактерише поуздан и ефикасан рад у датим условима, погодан начин прикључења на мрежу итд. Како је коришћење стандардних електричних генератора повезано са низом проблема, као једно од најпогоднијих, намеће се решење са асинхроним генератором са двостраним напајањем [1]. Управо је због тога, ова врста генератора задњих година предмет интензивних проучавања. Његов се рад заснива на томе, што се статор прикључује директно, а ротор преко енергетских претварача напона и учестаности, на исту мрежу. Захваљујући великом развоју енергетске електронике, пре свега повећањем снаге снажних IGBT транзистора, могуће је рад асинхроног генератора са двостраним напајањем ефикасно прилагодити како ветротурбини, тако и електроенергетском систему.

На основу математичког модела, који је дефинисан применом теорије просторних вектора, написане су једначине за активне и реактивне снаге статора и ротора. Користећи ове једначине, извршен је прорачун за генератор снаге $S_n = 200$ kVA и нацртане су карактеристике ових снага у функцији клизања, односно брзине обртања. Захваљујући способности енергетских претварача у колу ротора, да омогућавају проток снаге у оба смера, уочене су значајне предности у примени ових генератора.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Посматра се рад асинхроног генератора са двостраним напајањем у синхроним режиму рада. Зато је најпогодније користити математички модел добијен применом теорије просторних вектора [2], [3], [4], који је дефинисан у односу на референтну осу везану за статор, чија је брзина једнака синхроној брзини ω_s , (кружна учестаност статора).

Напонске једначине и једначине за флуксеве написане у релативним јединицама имају облик:

$$u_s = -i_s r_s - (p + j)\psi_s \quad (1)$$

$$u_r = -i_r r_r - (p + js)\psi_r \quad (2)$$

$$\psi_s = i_s x_s + i_r x_m \quad (3)$$

$$\psi_r = i_s x_m + i_r x_r \quad (4)$$

где је:

$x_s = x_{s\gamma} + x_m$ - укупна индуктивна отпорност по фази статора,

$x_r = x_{r\gamma} + x_m$ - укупна индуктивна отпорност по фази ротора,

а клизање дефинисано релацијом:

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

За стационарни режим ($p = 0$), добијамо:

$$u_s = -i_s r_s - j\psi_s \quad (6)$$

$$u_r = -i_r r_r - js\psi_r \quad (7)$$

$$\psi_s = i_s x_s + i_r x_m \quad (8)$$

$$\psi_r = i_s x_m + i_r x_r \quad (9)$$

Вектор напона статора u_s , усвајамо да се поклапа са позитивним смером реалне осе, док вектор напона ротора u_r , предњачи за угао \mathcal{G} . Дакле,

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

односно, угао \mathcal{G} је угао помераја између вектора напона статора и ротора.

На основу векторских дијаграма асинхроног генератора са двостраним напајањем у синхронном режиму рада [3], показује се да се веза између угла помераја вектора напона статора и ротора \mathcal{G} и угла између осе ротора и вектора напона статора δ (угао оптерећења, по аналогији са синхроним машинама) дефинише релацијом:

$$\delta = \mathcal{G} - \alpha \quad (11)$$

где је угао α дефинисан следећим изразом:

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

Решавањем напонских једначина и једначина за флуксеве [5], [6], добијамо изразе за:

- активне снаге статора и ротора

$$p_s = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [(r_r k_1 + sx_r k_2) - ux_m (k_2 \cos \mathcal{G} + k_1 \sin \mathcal{G})] \quad (13)$$

$$p_r = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [usx_m (k_1 \sin \mathcal{G} - k_2 \cos \mathcal{G}) + u^2 (r_s k_1 + x_s k_2)] \quad (14)$$

- реактивне снаге статора и ротора

$$q_s = -\frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} [(sx_r k_1 - r_r k_2) - ux_m (k_1 \cos \mathcal{G} - k_2 \sin \mathcal{G})] \quad (15)$$

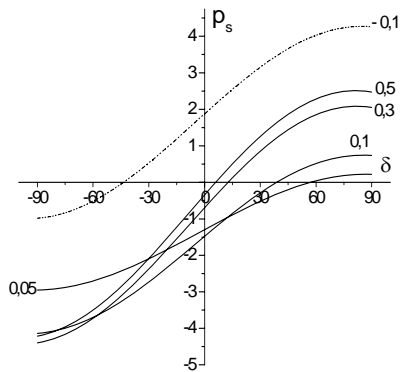
$$q_r = -\frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} \left[u^2 (x_s k_1 - r_s k_2) - u s x_m (k_1 \cos \vartheta + k_2 \sin \vartheta) \right] \quad (16)$$

где су: $k_1 = r_s r_r - s(x_s x_r - x_m^2)$, $k_2 = s r_s x_r + r_r x_s$ и $u = u_r / u_s$.

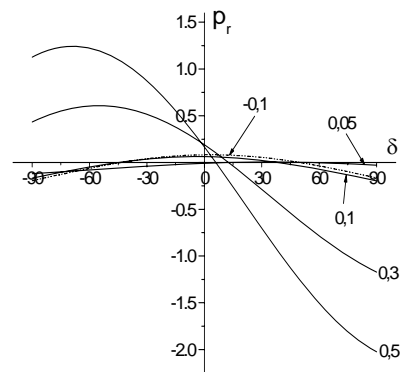
Погодно је анализу ових величина извршити у функцији угла оптерећења δ , пошто асинхронни генератор ради у синхронном режиму. При томе напон и учестаност статора остају константни, док се роторске величине мењају уз константан однос напона ротора и учестаности ротора, односно $u_r / f_r = const$. Како је $s = f_r / f_s$ у релативним јединицама ће бити $u_r = s$.

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

На основу израза (13) и (14), на Сл. 1. и 2. приказане су зависности активних снага статора и ротора, док су на основу израза (15) и (16) на Сл. 3. и 4. представљене зависности реактивних снага статора и ротора, све у функцији угла оптерећења, за константне вредности клизања. Карактеристике су нацртане за асинхронни генератор снаге 200kVA, чији су параметри еквивалентне шеме, у релативним јединицама: $r_s = 0,022$, $r_r = 0,026$, $x_{s\gamma} = 0,14$, $x_{r\gamma} = 0,14$ и $x_m = 3,4$.



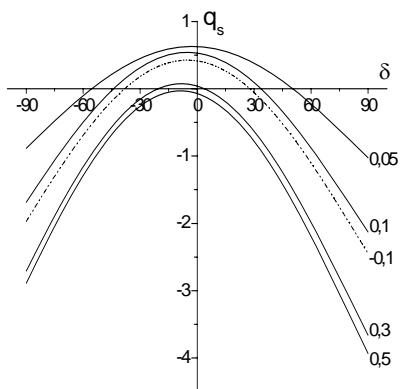
Слика 1. Активна снага статора
Figure 1. Active stator power



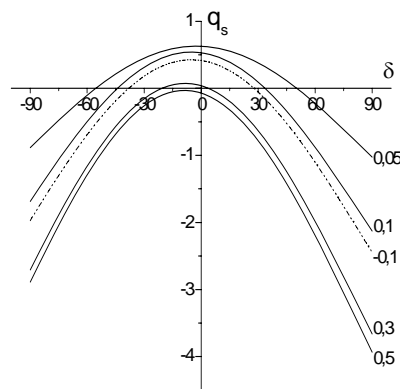
Слика 2. Активна снага ротора
Figure 2. Active rotor power

Анализом приказаних карактеристика долази се до сазнања о специфичним токовима активних снага асинхроног генератора са двостраним напајањем, [6], на основу чега је на Сл. 5. нацртан је дијаграм активних снага и губитака. У случају када генератор ради са брзинама мањим од синхроне ($s > 0$), снага се предаје мрежи, односно потрошачима са стране статора, док се ротор напаја из мреже. При брзинама већим од синхроне ($s < 0$), активна снага предаје се мрежи како са

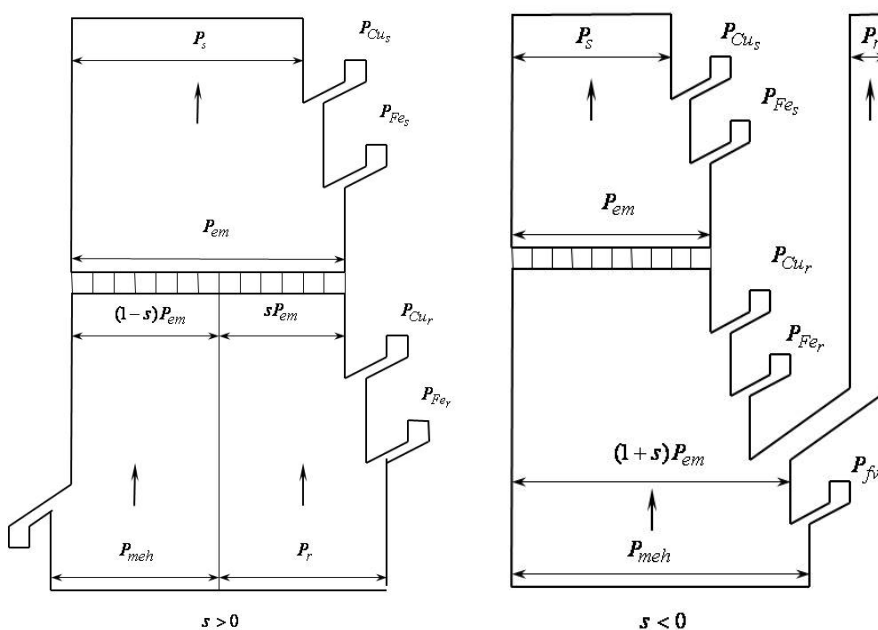
стране статора, тако и са стране ротора. То практично значи, да се при брзинама већим од синхроне, двостраним напајањем асинхроног генератора може постићи режим рада са снагом већом од номиналне, пошто је укупна активна снага једнака збиру снага статора и ротора.



Слика 3. Реактивна снага статора
Figure 3. Reactive stator power



Слика 4. Реактивна снага ротора
Figure 4. Reactive rotor power



Слика 5. Активне снаге и губици асинхроног генератора са двостраним напајањем
Figure 5. Doubly-fed asynchronous generator active power and losses

ЗАКЉУЧАК

Асинхрони генератор са двостраним напајањем представља добро техничко решење за претварање енергије ветра у електричну [7], [8]. Његова особина да поуздано ради у условима променљиве брзине обртања ротора, чини га најзаступљенијим, нарочито у ветроелектранама веће снаге, где су његове предности посебно изражене. Може да ради са брзинама већим и мањим од синхроне брзине. У режиму рада са негативним клизањем предаје мрежи активну снагу већу од номиналне, како са стране статора, тако и са стране ротора.

Опсег регулације рада асинхроног генератора са двостраним напајањем је уобичајено $\pm 30\%$ у односу на синхрону брзину. Како је снага која се преноси кроз ротор сразмерна клизању, то ће и снага енергетског претварача бити сразмерна опсегу регулисаних брзина, односно 30% од номиналне снаге ветрогенератора. То је значајна предност ове врсте генератора у односу на остале ветрогенераторе, код којих снага енергетског претварача одговара њиховој номиналној снази.

Још једна предност асинхроног генератора са двостраним напајањем, огледа се у томе, што је могуће управљање и његовом реактивном снагом [9]. Савремени ветрогенератори могу радити са фактором снаге $\cos \varphi = \pm 0,9$. Наравно, генерисана реактивна снага утиче на повећање инсталисане снаге енергетског претварача, о чему треба водити рачуна.

Овакво независно управљање активном и реактивном снагом остварује се најчешће коришћењем четвороквадратних PWM претварача са снажним IGBT транзисторима, које карактерише знатно краће време реаговања у односу на тиристоре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Petersson, A. 2003. *Analysis, Modeling and Control of Double – Fed induction Generators for Wind Turbines*. Geteborg, Chalmers University of Tehnology, Geteborg (Sweden), 2003.
- [2] Важнов, А.И. 1980. Переходные процессы в машинах переменого тока. *Энергия, Ленинград, 1980*.
- [3] Милкић, Ж. 2009. *Анализа рада асинхроне машине са двостраним напајањем и примена у ветрогенераторским постројењима*. Докторска дисертација. Универзитет у Приштини, Факултет техничких наука, Косовска Митровица.
- [4] Милкић, Ж., Чукарић, А., Вукић, Ђ., Ерцеговић, Ђ. 2007. Математички модел асинхроног генератора са двостраним напајањем и примена у ветроелектранама. *Трактори и погонске машине*, број 4, пп. 161-168, Нови Сад, 2007.
- [5] Чукарић, А., Милкић, Ж., Вукић, Ђ. 2008. Карактеристика момента асинхроног генератора са двостраним напајањем примењеног у ветроелектранама. *Пољопривредна техника*, број 4, пп. 37-44, Београд 2008.
- [6] Милкић, Ж., Вукић, Ђ., Чукарић, А. 2007. Активна и реактивна снага асинхроног генератора са двостраним напајањем. *Пољопривредна техника*, број 4, пп. 1-9, Београд 2007.
- [7] Вукић, Ђ., Ерцеговић, Ђ., Радичевић, Б. 2004. Генератори за претварање енергије ветра у електричну енергију. *Пољопривредна техника*, број 4, пп. 94-102, Београд 2004.

- [8] Вукић, Ђ., Ерцеговић, Ђ., Радичевић, Б.. 2006. Примена асинхроних генератора са двостраним напајањем за коришћење енергије ветра. ЦАНУ, Одељење природних наука, Зборник радова, књига 10, стр. 117-125, Подгорица, 2006.
- [9] Милкић, Ж., Вукић, Ђ., Чукарић, А., Ерцеговић, Ђ. 2008. Регулисање снаге асинхроног генератора са двостраним напајањем примењеног у ветроелектранама. Трактори и погонске машине, број 2 пп. 93-98, Нови Сад 2008.

STATOR AND ROTOR POWER OF THE DOUBLY-FED ASYNCHRONOUS GENERATOR APPLIED IN WIND POWER PLANTS

Žarko Milkić¹, Đukan Vukić², Aleksandar Čukarić¹

¹University of Pristina, Faculty of Technical Sciences, Kosovska Mitrovica, Republic of Serbia

²University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Institute of Agricultural Engineering, Belgrade-Zemun, Republic of Serbia

Abstract: Due to the stochastic nature of the wind, doubly-fed asynchronous generator can be used effectively in the process of transforming wind energy into electrical energy, especially for the case of higher power. A special advantage of this type of generator is reflected in the fact that they can work effectively with speeds that are greater or less than the synchronous speed. Mathematical model are defined applying a theory of space vectors. Expressions for active and reactive power of the stator and rotor are derived and obtained main characteristics are processed.

Analyzing the characteristics identified specific active power flow double-fed asynchronous generator, based on which energy balance is drawn, and the advantages of their use.

Key words: doubly-fed asynchronous generator, wind power plants, semiconductor converter, stator and rotor power, power losses.

Datum prijema rukopisa: 21.11.2012.
Datum prijema rukopisa sa ispravkama:
Datum prihvatanja rada: 25.12.2012.

