

UDK: 621.314.1

КАРАКТЕРИСТИКА МОМЕНТА АСИНХРОНОГ ГЕНЕРАТОРА СА ДВОСТРАНИМ НАПАЈАЊЕМ ПРИМЕЊЕНОГ У ВЕТРОЕЛЕКТРАНАМА

Александар Чукарић*, Жарко Милкић*, Ђукан Вукић**

*Факултет техничких наука - К. Митровица

**Пољопривредни факултет - Београд

Садржај: Асинхрони генератор са двостраним напајањем представља специјални режим рада асинхроне машине са намотаним ротором. Може да ради са брзинама мањим или већим од синхроне брзине (брзине обртног магнетног поља). Намотаји статора и ротора се везују на исту мрежу, статор директно, а ротор преко полупроводничких претварача напона и учестаности. Због особине да може радити са различитим брзинама обртања, представља веома повољно решење за примену у ветроелектранама, за конверзију енергије ветра у електричну енергију.

У раду је анализиран електромагнетни момент асинхроног генератора са двостраним напајањем, јер се утицајем на ову значајну величину може остварити режим рада са максималним искоришћењем ветротурбине.

Кључне речи: асинхрони генератор са двостраним напајањем, електромагнетни момент, полупроводнички претварач, ветроелектрана.

1. УВОД

Асинхрона машина са двостраним напајањем ради у генераторском режиму рада када његов ротор покреће нека погонска машина, најчешће ветротурбина, а намотаји статора и ротора су прикључени на мрежу. Асинхрони генератор са двостраним напајањем тада може да ради са брзинама већим или мањим од синхроне брзине. Намотај статора се тада најчешће прикључује директно на мрежу, док се у коло ротора налазе полупроводнички претварачи напона и учестаности. Њихова је улога да променом напона и учестаности у роторском колу прилагоде механичку карактеристику асинхроног генератора са траженим погонским условима, одржавајући стабилну учестаност статора, при промени брзине обртања ротора, адекватним задавањем учестаности ротора. Ако се ова учестаност задаје независно, асинхрони генератор ради у синхронном режиму рада, слично синхронном генератору, за разлику од асинхроног режима рада, где се учестаност увек одржава на вредност учестаности клизања.

Асинхрони генератор са двостраним напајањем основну примену налази у ветроелектранама. Разлози који га препоручују су способност да може радити са снагом већом од номиналне, да је снага полупроводничког претварача у колу ротора много мања од номиналне снаге генератора и да може стабилно радити у условима променљиве брзине ветра, што нарочито долази до изражаја за генераторе већих снага [1].

Електромагнетни момент асинхроног генератора са двостраним напајањем састоји се из три компоненте. Променом напона ротора може се утицати на вредност овог момента и тако обезбедити рад са максималним искоришћењем енергије ветра.

2. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ

У раду се посматра синхрони режим рада асинхроне машине са двостраним напајањем. Тада се асинхрони генератор стабилизује променом угла оптерећења δ , по аналогији са синхроним машинама. У том случају је најпогодније користити математички модел добијен применом теорије просторних вектора [2], [3], 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 флуксе посматране у том координатном систему су:

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

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

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

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

Пошто је једноставније сва разматрања спроводити у релативним јединицама, једначине добијају облик:

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

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

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

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

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:

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

За стационарни режим рада, после замене $p = 0$, добијамо:

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

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

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

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

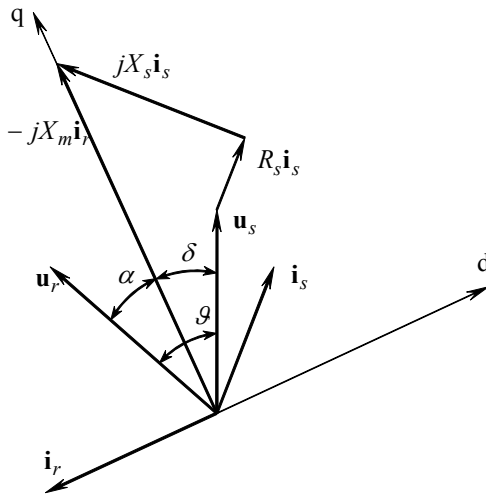
Због једноставности, усвајамо да се вектор напона статора - \mathbf{u}_s , поклапа са позитивним смером реалне осе, док вектор напона ротора - \mathbf{u}_r , предњачи за угао ϑ . Дакле,

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

односно, угао ϑ је угао помераја између вектора напона статора и ротора.

На основу векторског дијаграма асинхроног генератора са двостраним напајањем у синхроним режиму рада, сл. 1, показује се да се веза између угла помераја вектора напона статора и ротора ϑ и угла између осе ротора и вектора напона статора δ (угао оптерећења, по аналогији са синхроним машинама) дефинише релацијом:

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



Сл. 1. Векторски дијаграм за генераторски режим рада

где је угао α дефинисан следећим изразом:

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

3. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ МОМЕНТ АСИНХРОНОГ ГЕНЕРАТОРА СА ДВОСТРАНИМ НАПАЈАЊЕМ

Електромагнетни момент асинхроног генератора са двостраним напајањем, изражен преко просторних вектора, дат је изразом:

$$\mathbf{M} = \frac{3}{2} \Psi_s \times \mathbf{I}_s$$

У складу са усвојеним базним величинама, може се у релативним јединицама написати

$$\mathbf{m}_{em} = \text{Im}[\Psi_s^* \mathbf{i}_s] \qquad (17)$$

Решавањем напонских једначина и једначина за флуксеве и после замене израза за флукс статора ψ_s и израза за струју статора i_s и након сређивања, добијамо коначни израз за електромагнетни момент асинхроног генератора са двостраним напајањем:

$$m_{em} = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} (sr_r x_m^2 - u^2 r_s x_m^2) + \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} ux_m \left[-(r_s r_r + sx_s x_r - sx_m^2) \sin \vartheta + (sr_s x_r - r_r x_s) \cos \vartheta \right] \quad (18)$$

Погодно је уместо угла ϑ , увести угао оптерећења δ . Ако напишемо да је:

$$a = -(r_s r_r + sx_s x_r - sx_m^2) \\ b = sr_s x_r - r_r x_s$$

Израз у средњој загради се може трансформисати на следећи начин:

$$a \sin \vartheta + b \cos \vartheta = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin(\vartheta - \alpha)$$

где је $\vartheta - \alpha = \delta$, а угао α дефинисан релацијом (16)

Сада израз за електромагнетни момент (18) постаје:

$$m_{em} = \frac{u_s^2}{k_1^2 + k_2^2} (sr_r x_m^2 - u^2 r_s x_m^2 + ux_m \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \delta) \quad (19)$$

Момент се састоји из три компоненте, од којих су прве две асинхроне, док трећа

$$m_3 = \frac{u_s u_r}{k_1^2 + k_2^2} x_m \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \delta$$

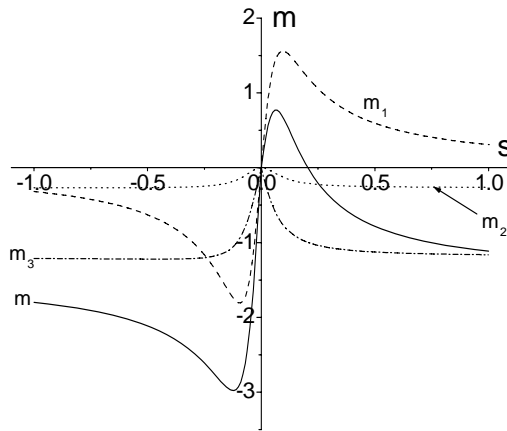
представља синхрону компоненту момента која одговара моменту синхроног генератора на чији се ротор доводи напон u_r .

Према томе, укупни момент се може написати и на следећи начин:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 = m_{as} + m_s \quad (20)$$

Сада се на основу израза (18), може нацртати зависност $m = f(s)$, за константну вредност угла оптерећења δ . Карактеристика је нацртана за асинхрони 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 $x_m = 3,4$, уз законитост промене напона ротора, дефинисане релацијом $u_r = s$, у релативним јединицама.

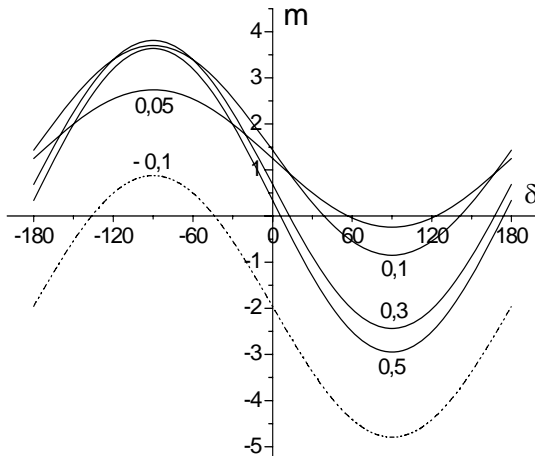
Тако је на сл. 2. приказана карактеристика момента у функцији клизања, за угао оптерећења $\delta = 30^\circ$.



Сл. 2. Карактеристика резултантног момента и његових компоненти у функцији клизања, за угао $\delta = 30^\circ$

Синхрона компонента m_3 значајно утиче на резултантни момент, израженије за негативно клизање.

Из израза (18), добија се да се максимални момент има за угао $\vartheta = \vartheta_{\max} = \arctg \frac{b}{a}$. Како је $\delta = \vartheta - \alpha$, то је и $\delta_{\max} = \vartheta_{\max} - \alpha$ и после замене добијеног израза за ϑ_{\max} и α коначно добијамо да се максимални момент има за угао $\delta = \delta_{\max} = \frac{\pi}{2}$, што још једном потврђује да угао δ одговара углу оптерећења код синхроних генератора.



Сл. 3. Карактеристика момента у функцији угла оптерећења - δ за константне вредности клизања

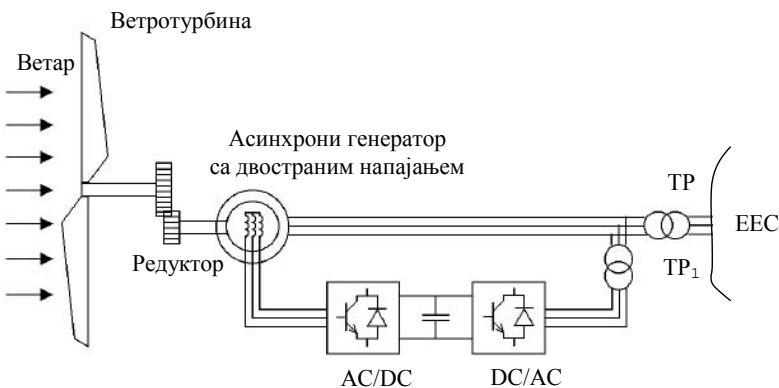
Нарочито је ово изражено на сл. 3, која даје зависност момента асинхроног генератора са двостраним напајањем у функцији угла оптерећења, $m = f(\delta)$, за константне вредности клизања.

Уочљиво је да се за било коју вредност клизања максимални момент јавља за угао $\delta = \frac{\pi}{2}$.

4. ПРИМЕНА АСИНХРОНОГ ГЕНЕРАТОРАСА ДВОСТРАНИМ НАПАЈАЊЕМ У ВЕТРОЕЛЕКТРАНАМА

Ветроенергетика као млада научна грана задњих година добија на значају и све се више проучава, јер је све већа потреба за добијањем енергије из оних извора који се обнављају, а ветар је један од најзначајнијих извора. Његов потенцијал је огроман и вишеструко премашује потребе за електричном енергијом у свету и код нас. Уједно процес трансформације енергије ветра у електричну енергију је еколошки чист и не загађује животну средину.

Постоје различити проблеми у процесу претварања енергије ветра у електричну енергију. Један од основних проблема је одређивање адекватног електричног генератора који треба ефикасно да ради у различитим условима које диктира стохастичка природа ветра [4]. У ветроелектранама мањих снага користе се асинхрони генератори са кавезним ротором и синхрони генератори са перманентним магнетима, док су за ветроелектране већих снага, најпогоднији асинхрони генератори са двостраним напајањем. На сл. 4 представљена је принципијелна шема ветрогенераторског постројења са асинхроним генератором са двостраним напајањем.



Сл. 4. Принципијелна шема ветроагрегата са двостраним напајањем асинхроним генератором

Брзина ветра мења се у току године, променом годишњих доба, па чак и у току дана. Управо зато, због сталне промене снаге (зависи од трећег степена брзине ветра), ветрогенератор мора да обезбеди стабилан и поуздан рад у ширем опсегу

промене брзине обртања. Са друге стране, суштина конверзије енергије ветра у електричну енергију је, да се одвија са највећим степеном искоришћења турбине, односно да се при свакој брзини ветра добија максимална електрична енергија (прати се „S” крива). Управо асинхрони генератор са двостраним напајањем, деловањем на електромагнетни момент, задавањем одговарајућег закона промене напона и учестаности ротора, омогућава ефикасну промену обртања ветроагрегата.

ЗАКЉУЧАК

Захваљујући особини да може поуздано да ради у ширем опсегу промене брзине, како испод, тако и изнад синхроне брзине, асинхрони генератор са двостраним напајањем представља оптимално решење за примену у ветроелектранама, за претварање енергије ветра у електричну енергију. Задавањем адекватног закона промене амплитуде и учестаности напона који се доводи у ротор, може се остварити режим са максималним искоришћењем ветротурбине. Ово се постиже деловањем на електромагнетни момент, чиме се ефикасно прати „S” крива. Зато се у коло ротора укључују енергетски претварачи са регулисаним полупроводницима (тиристори, IGBT транзистори итд.). Поред деловања на активну, може се утицати и на реактивну снагу, обезбедити проток електричне енергије из мреже у ротор и обрнуто, итд.

Списак коришћених ознака

- f_s - фреквенција статора
- f_r - фреквенција ротора
- i_s - струја статора
- i_r - струја ротора
- p - диференцијални оператор
- r_s - активна отпорност по фази статора
- r_r - активна отпорност по фази ротора
- u_s - напон статора
- u_r - напон ротора
- $x_{s\gamma}$ - реактанса расипања по фази статора
- $x_{r\gamma}$ - реактанса расипања по фази ротора
- x_m - реактанса магнећења
- ψ_s - магнетни флук статора
- ψ_r - магнетни флукс ротора

Напомена: Комплексне величине су означене масним словима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Petersson A.: *Analysis, Modeling and Control of Double – Fed induction Generators for Wind Turbines*, Geteborg, Chalmers University of Tehnology, Geteborg (Sweden), (2003).
- [2] Важнов А.И.: *Переходные процессы в машинах переменного тока*, Энергия, Ленинград (1980).
- [3] Милкић Ж.: *Карактеристике асинхроне машине у режиму двостраног напајања*, Магистрарска теза, Приштина (1995).
- [4] Вукић Ђ., Ерцеговић Ђ., Радичевић Б.: *Генератори за претварање енергије ветра у електричну енергију*, Пољопривредна техника, број 4, пп. 94-102, Београд (2005).

**CHARACTERISTICS OF ELECTROMECHANICAL
TORQUE DOUBLY-FED ASYNCHRONOUS GENERATOR
USED IN WIND POWER PLANTS**

Aleksandar Čukarić*, Žarko Milkić*, Đukan Vukić**

*Faculty of Technical Science - K. Mitrovica

**Faculty of Agriculture - Belgrade

Abstract: Doubly-fed asynchronous generator expresses an especial regime of work asynchronous generator with winding rotor. This generator can works in oversynchronous and subsynchronous situation. Stator and rotor windings are connected to the same electrical grid. However, the rotor winding is fed through a semiconductor converter which can vary the electrical frequency and voltage. Doubly-fed asynchronous generator is a most useful in wind power plants. In this work we are analysed electromechanical torque of doubly-fed asynchronous generator, related with the maximum efficiency.

Key words: doubly-fed asynchronous generator, electromechanical torque, wind power plants, semiconductor converter.