A XIII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2013

GENERATOR ELECTRIC ASINCRON CU DOUĂ ÎNFĂŞURĂRI STATORICE PENTRU SISTEME EOLIENE DE PUTERE ŞI TURAŢIE REDUSE

Sorin Ioan DEACONU, Lucian Nicolae TUTELEA, Gabriel Nicolae POPA, Maria NĂSĂUDEAN, Carmen MOTORGA

ASYNCHRONOUS ELECTRIC GENERATOR WITH DUAL STATOR WINDING FOR LOW POWER AND SPEED WIND SYSTEM

Asynchronous generator with dual stator winding is very good for low power and speed wind systems because it has a good controllability, low power capacitor bank and flexible characteristics.

Cuvinte cheie: generator electric asincron, două înfăşurări statorice, invertor, baterie de condensatoare
Keywords: asynchronous electric generator, stator windings second, inverter, battery of capacitors

1. Introducere

În literatura de specialitate există un mare interes pentru studiul unor sisteme de producere a energiei electrice din surse regenerabile cu putere şi turaţie redusă pentru aplicaţii casnice, în regim cuplat la reţea sau în regim autonom. Utilizarea generatoarelor asincrone cu rotorul în colivie este o soluţie avantajoasă datorită performanţelor dinamice bune, lipsa periilor, lipsa unei surse suplimentare de alimentare în curent continuu, costuri de întreţinere reduse etc. [1], [2].

Cuplarea directă între turbină şi generator reduce zgomotul, creşte randamentul şi densitatea de putere.

O problemă care apare este variaţia în limite destul de largi a vitezei turbinei dată de circulaţia maselor de aer şi de variaţia sezonieră sau multianuală a debitelor de apă pe râurile mici. Utilizarea turbinelor reglabile creşte mult costul sistemului. În această situaţie generatorul asincron clasic nu se comportă destul de bine, fiind necesar un convertor static de frecvenţă de putere cel puţin egală cu generatorul care să permită circulaţia bidirecţională a puterii [3] - [6]. Prezenţa acestui convertor determină variaţii de tensiune şi injectează armonice superioare în curentul de sarcină. Tensiunea indusă este puternic dependentă de turaţia turbinei, valoarea capacităţii condensatoarelor de excitaţie şi valoarea curentului de sarcină [1], [5].

Maşina asincronă cu două înfăşurări trifazate statorice (DSWA), una de excitaţie şi alta principală pentru alimentarea sarcinii, având acelaşi număr de perechi de poli, bobinate în unul sau două straturi şi rotorul cu colivie normală poate să facă faţă cerinţelor la viteze reduse şi curenţi de sarcină ce variază într-un domeniu larg [3]. Un avantaj esenţial dat de reducerea necesarului de putere reactivă din înfăşurarea principală, se poate obţine prin defazarea spaţială a celor două înfăşurări cu un unghi α [2] - [6].

Sursele bibliografice [1] - [6] prezintă numeroase scheme de conectare a excitaţiei atât pentru generatoarele asincrone clasice cât şi pentru cele cu două înfăşurări statorice. Ca surse de energie reactivă se utilizează condensatoare, compensatoare sincrone sau convertoare statice. În figura 1 se prezintă soluţia aleasă.

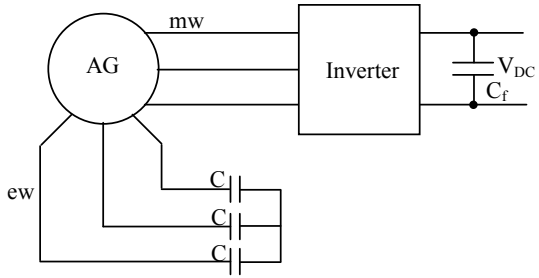

Fig. 1 Schema de principiu a generatorului asincron cu două înfăşurări statorice

Prezenţa înfăşurării de excitaţie înseriată cu bateria de condensatoare furnizează generatorului energia reactivă necesară, aceasta nu va mai fi adusă din circuitul de curent continuu al micro reţelei şi în acest fel puterea aparentă a convertorului conectat la

bornele înfăşurării principale va fi mai mică cu aproximativ 40 %. În regim autonom datorită legăturii directe între înfăşurarea de excitaţie şi bateria de condensatoare (fără convertor) procesul de autoexcitaţie se declanşează chiar în absenţa unei surse externe.

2. Elemente geometrice şi constructive. Ecuaţii. Scheme echivalente

Generatorul de inducţie cu două înfăşurări are o greutate şi un volum mai mare decât generatorul de inducţie clasic în cazul general, dar în cazul turaţiei şi sarcinii variabile întâlnite la antrenarea cu turbină eoliană, randamentul şi costul total maşină şi convertor static este mai bun pentru DSWA. Domeniul în care viteza de rotaţie poate să varieze depinde şi de valoarea capacităţii bateriei de condensatoare. Cele două înfăşurări statorice sunt introduse în aceleaşi crestături putând avea acelaşi număr de perechi de poli sau un număr diferit.

În modelul dinamic al DSWA parametrii înfăşurării de excitaţie şi ai înfăşurării rotorice sunt raportaţi la înfăşurarea principală. Ecuaţiile tensiunilor într-un sistem de referinţă staţionar sunt prezentate în continuare:

$$\underline{U}_m = R_m \cdot \underline{I}_m + \omega_1 \cdot \underline{\Psi}_m , \tag{1}$$

$$\underline{U}_e = R_e \cdot \underline{I}_e + \omega_1 \cdot \underline{\Psi}_e , \tag{2}$$

$$\underline{U}_r = R_r \cdot \underline{I}_r + \left(\omega_1 - \omega_r\right) \cdot \underline{\Psi}_r , \tag{3}$$

$$\underline{\Psi}_m = L_m \cdot \underline{I}_m + L_{me} \cdot \underline{I}_e + L_{mr} \cdot \underline{I}_r , \tag{4}$$

$$\underline{\Psi}_e = L_e \cdot \underline{I}_e + L_{me} \cdot \underline{I}_m + L_{mr} \cdot \underline{I}_r , \tag{5}$$

$$\underline{\Psi}_r = L_r \cdot \underline{I}_r + L_{mr} \cdot \left(\underline{I}_m + \underline{I}_e\right), \tag{6}$$

unde indicii m, e şi r se referă la variabilele asociate înfăşurărilor principală, de excitaţie şi rotorică, ω_1 este pulsaţia în înfăşurarea principală, ω_r viteza rotorică, L_{mr} şi L_{me} sunt inductivităţile mutuale între înfăşurarea principală şi cea de excitaţie respectiv rotorică, iar inductivităţile celor trei înfăşurări şi curentul de magnetizare vor avea expresiile:

$$L_m = L_{\sigma m} + L_{me} + L_{mr} , \tag{7}$$

$$L_e = L_{\sigma e} + L_{me} + L_{mr} , \tag{8}$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_{mr} , \tag{9}$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_r + \underline{I}_m + \underline{I}_e , \tag{10}$$

cu σ notându-se inductivitatea de dispersie. Din modelul matematic se poate deduce schema electrică echivalentă (figura 2).

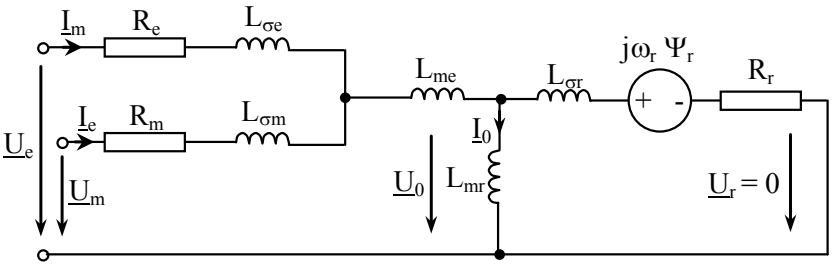

Fig. 2 Schema electrică echivalentă a DSWA

Cazul ideal de simplificare a modelului matematic se obţine la o plasare a celor două înfăşurări statorice cu un defazaj de 90 grade electrice între ele.

Controlul sistemului se simplifică în această situaţie.

3. Datele de proiectare. Descrierea metodologiei de proiectare

Pentru uşurinţa realizării practice a modelului experimental s-au ales tolele statorică şi rotorică dintre cele care sunt în fabricaţie curentă în fabricile de profil.

Tabelul 1

Frecvenţa (f)	15 Hz	Diametrul exterior statoric (D_{so})	268,2 mm
Numărul de poli - 2p	8	Diametrul interior statoric (D_{si})	180 mm
Întrefierul (h_{ag})	0,4 mm	Adâncimea crestăturii statorice (h_{ss})	30,5 mm
Lungimea ideală (l_i)	230 mm	Adâncimea crestăturii rotorice (h_{rs})	31,5 mm
Numărul de crestături stator (N_{ss})	72	Diametrul interior al tolei rotorice	60 mm
Numărul de crestături rotor (N_{sr})	58	Tensiunea nominală DC (U_{DC})	310 V
Puterea nominală (P_n)	3 KW	Tensiunea nominală AC (U_n)	220 V
Turaţia	250 rpm	Conexiunea fazelor statorice	Y
Număr de straturi ale înfăşurării de excitaţie	1	Numărul de straturi ale înfăşurării principale	2

4. Calculul preliminar de optimizare

Pentru optimizare s-a utilizat metoda Hooke Jeeves acordându-se o atenţie deosebită dimensiunilor geometrice, pierderilor, evoluţiei funcţiilor obiectiv şi a masei, fiind surprinsă evoluţia acestora de la valorile iniţiale până la soluţia optimă finală.

În figura 3 se prezintă dimensiunile şi forma crestăturii statorice, în figurile 4, 5, 6 şi 7 se dă evoluţia pierderilor în înfăşurări, în fier şi a celor mecanice, a randamentului şi factorului de putere, a inducţiei magnetice şi a inductanţei de magnetizare respectiv. S-au considerat următoarele preţuri pentru materiale: cuprul 10 USD/kg, aluminiul 2,1 USD/kg şi fierul 1,4 USD/kg.

Durata medie de funcţionare pe an s-a considerat 3000 de ore iar durata medie de viaţă a maşinii s-a considerat 10 ani.

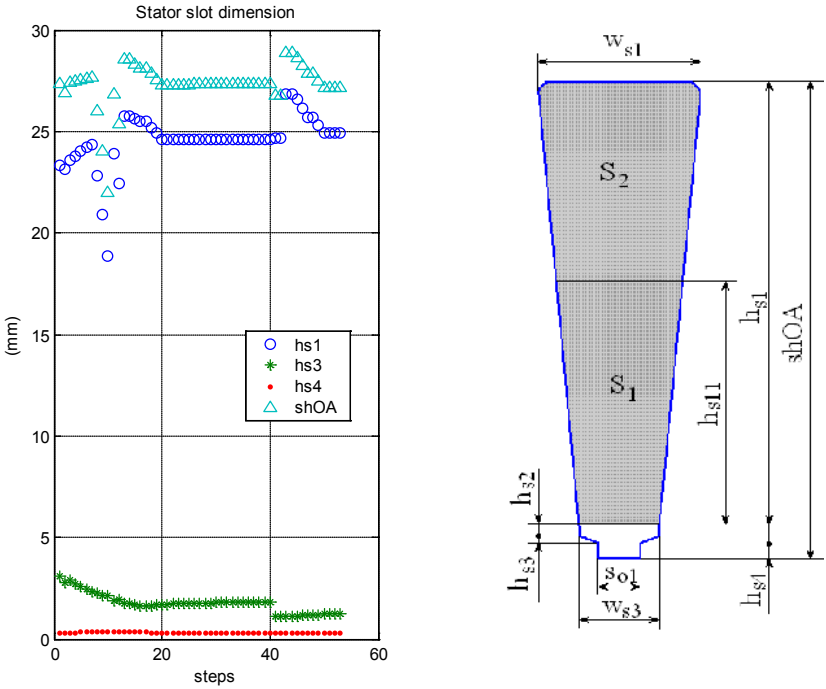

Fig. 3 Forma crestăturii statorice şi dimensiunile acesteia

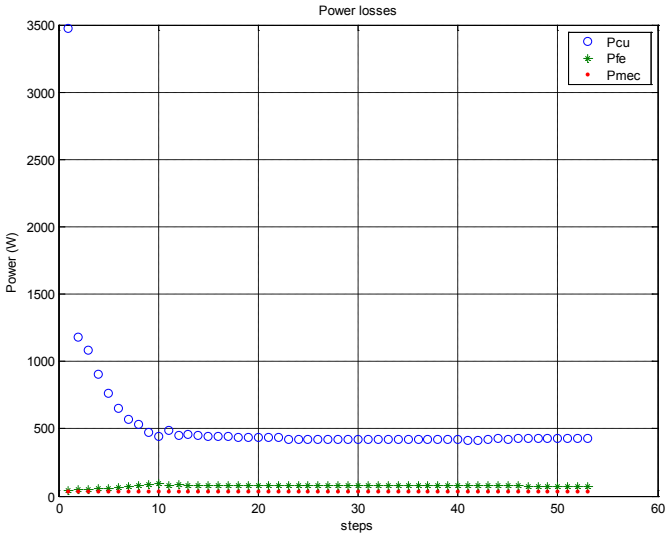

Fig. 4 Pierderile în maşină

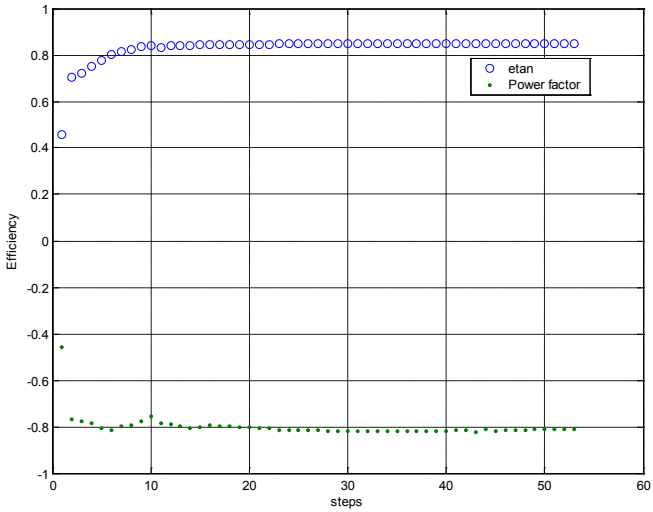

Fig. 5 Randamentul şi factorul de putere

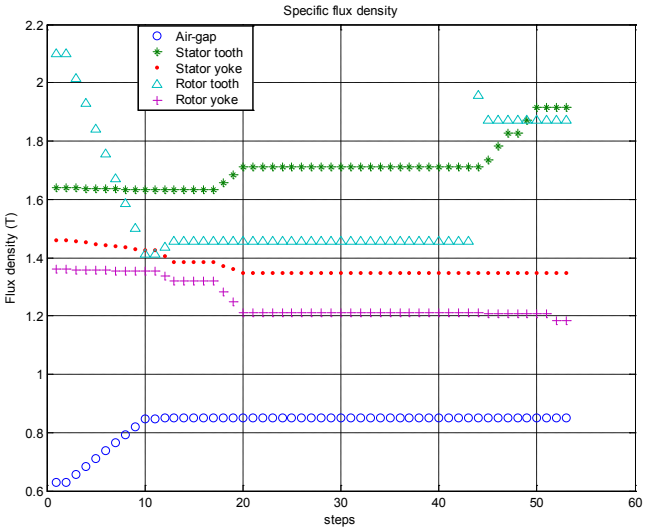

Fig. 6 Inducţia magnetică în diverse porţiuni

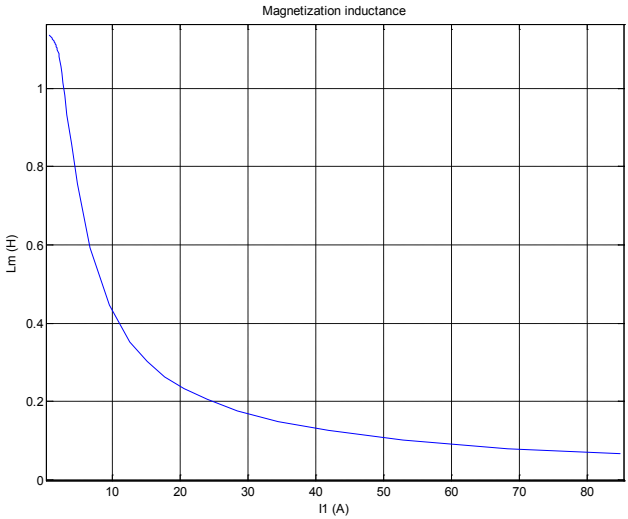

Fig. 7 Inductanţa de magnetizare

Cu ajutorul programului de optimizare s-a urmărit variaţia costului iniţial şi a costului total (pentru 10 ani de funcţionare) al maşinii pentru număr de poli diferit: 8, 12, 16, 18, 20 şi 24. Aceste costuri împreună cu alte caracteristici sunt prezentate în tabelul 2. Analizând rezultatele obţinute se constată că cea mai ieftină maşină este cea cu 20 de poli, cea care are costul total cel mai redus este cea cu 16 poli (care are şi randamentul cel mai mare), cea mai uşoară este maşina cu 24 de poli, factorul de putere cel mai bun îl are maşina cu 8 poli etc. În funcţie de datele prezentate trebuie să se hotărască varianta care se va utiliza pentru modelul experimental.

Tabelul 2

Număr de poli 2p	8	12	16	18	20	24
Frecvenţa de bază f_n [Hz]	15	24	32,5	36,5	40,5	49
Costul de fabricaţie i_cost [USD]	512,8	425,1	399,1	398,8	384,7	403,3
Funcţia obiectiv(cost total) t_cost [USD]	1478,8	1385,3	1355,8	1367,7	1399,7	1431,2
Randamentul etan	84,83	84,9	84,95	84,79	84,18	84,01
Factorul de putere cosphin	0,81	0,75	0,73	0,72	0,7	0,69
Greutatea materiale active weightM [kg]	88,8	68	58,4	55,4	51,8	48,8
Timp de calcul optimizare sim_time [s]	10	23,8	12,8	8,9	6,8	10,2
Valoare întrefier hag [mm]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Curentul nominal I_{1n} [A]	5,61	6,05	6,19	6,31	6,54	6,56
Diametrul exterior statoric D_{so} [mm]	386	409	484	519	533	594

Diametrul interior statoric D_{si} [mm]	286,3	319,6	393,9	433,4	450,1	519,7
Lungimea pachet tole lc [mm]	139,3	107,1	72,0	65,1	60,2	55,3
Inducţia în întrefier B_{agsp} [T]	0,85	0,85	0,83	0,81	0,81	0,73
Pătura de curent elsp [kA/m]	16,22	15,31	15,94	15,0	14,45	13,07

5. Concluzii

■ Studiul DSWA cu metoda elementelor finite 2D-FEM şi calculul de optimizare demonstrează că această maşină poate fi utilizată cu succes în aplicaţii de producere a energiei la turaţii variabile reduse, putând înlocui cu succes maşinile sincrone cu magneţi permanenţi.

■ Prezenţa înfăşurării de excitaţie permite utilizarea unui convertor în înfăşurarea principală având o putere mult redusă faţă de un generator asincron clasic la aceeaşi putere.

■ Se impune studierea în continuare a influenţei poziţionării diferite în crestături a celor două înfăşurări statorice şi de asemenea influenţa alegerii unui număr de perechi de poli diferit pentru acestea.

■ Se poate aborda de asemenea soluţia cuplării directe la reţea a înfăşurării principale în regim de viteză subsincron sau suprasincron, înfăşurarea de excitaţie fiind conectată la bateria de condensatoare printr-un invertor de putere redusă.

BIBLIOGRAFIE

[1] Dong Wang, Weiming Ma, Fei Xiao, Botao Zhang, Dezhi Liu, and An Hu, *A novel stand-alone dual stator-winding induction generator with static excitation regulation*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, December 2005, pag. 826-835.

[2] Alfredo, R. Munozand Thomas Lipo, *Dual stator winding induction machine drive*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 5, September/October 2000, pag. 1369-1379.

[3] IndramanTamrakar, and O.P. Malik, *Power factor corection of induction motors using PWM inverter fed auxiliary stator winding*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999, pag. 426-432.

[4] Tadashi Fukami, Masatoshi Momiyama, Kazuo Shima, Ryoichi Hanaoka, and Shinzo Takata, *Steady-State Analysis of a Dual-Winding Reluctance Generator With a Multiple-Barrier Rotor*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 2, June 2008, pag. 492-498.
[5] Olorunfemi Ojo, and Innocent Ewean Davidson, *PWM-VSI Inverter-Assisted Stand-Alone Dual Stator Winding Induction Generator*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No.6, November/December 2000, pag. 1604-1610.
[6] Yong Li, Yuwen Hu, Wenxin Huang, Lingshun Liu, and Yong Zhang, *The Capacity Optimization for the Static Excitation Controller of the Dual-Stator-Winding Induction Generator Operating in a Wide Speed Range*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 2, February 2009, pag. 530-541.

Conf.Dr.Ing. Sorin DEACONU, Facultatea de Inginerie Hunedoara,
Universitatea „Politehnica” Timişoara, membru AGIR,
membru IEEE, membru AAIR
e-mail: sorin.deaconu@fih.upt.ro
Conf.Dr.Ing. Lucian Nicolae TUTELEA, Facultatea de Electrotehnică Timişoara,
Universitatea „Politehnica” Timişoara, membru AGIR,
e-mail: luci@lselinux.upt.ro
Şef lucr.Dr.Ing. Gabriel Nicolae POPA, Facultatea de Inginerie Hunedoara,
Universitatea „Politehnica” Timişoara, membru AGIR, membru IEEE,
membru AAIR
e-mail: gabriel.popa@fih.upt.ro
Drd.Ing. Maria NĂSĂUDEAN, Facultatea de Inginerie Hunedoara,
Universitatea „Politehnica” Timişoara, membru AGIR,
e-mail: mariana.nasaudean@fih.upt.ro
Ing. Carmen MOTORGA, Universitatea „Politehnica” Timişoara,
Facultatea de Inginerie Hunedoara,
e-mail: carmen.motorga@fih.upt.ro