A XIV-a Conferinţă internaţională – multidisciplinară,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2014

CALCULUL CU ELEMENTE FINITE A PARAMETRILOR ŞI CARACTERISTICILOR GENERATORULUI ELECTRIC ASINCRON CU DOUĂ ÎNFĂŞURĂRI STATORICE

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

FINITE ELEMENT CALCULATION OF THE PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF ELECTRIC GENERATOR STATOR WINDINGS WITH TWO ASYNCHRONOUS

Induction generator with dual stator winding is very good for low power and speed, wind and hydro power plant systems, because it has a good controllability, low reactive power consumption, low cost and flexible characteristics. In this paper is presented the 2D finite element method (FEM) analysis, and parameters and characteristics.

Keywords: electrical generator stator windings, two asynchronous, low speed, power and finite element analysis
Cuvinte cheie: generator electric asincron, două înfăşurări statorice, putere şi turaţie reduse, analiză cu elemente finite

1. Introducere

În prezent 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, cu costuri cât mai mici. 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]. Pentru simplitate constructivă trebuie luată în considerare soluţia de cuplare directă între generator şi turbină cu dezavantajul de a fi necesare cupluri ridicate la arbore. Prin cuplarea directă se reduce zgomotul, creşte randamentul şi densitatea de putere.

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]-[6]. 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 care de obicei se alege de 90^0 [2]-[6].

Generatorul asincron 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. 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. 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.

Metodele de analiză numerică cu elemente finite se folosesc pentru calculul precis al parametrilor şi caracteristicilor în diferite regimuri de funcţionare, chiar dacă durata de calcul este mult mai mare. Pentru generatorul considerat o analiză bi-dimensională 2D este suficient de precisă datorită simetriilor existente în construcţia lui.

2. Lansarea în execuţie a analizei cu elemente finite cu ajutorul unui program scris în mediul Matlab

Proiectarea optimală [7] a scos în evidenţă faptul că performanţele şi caracteristicile DSWA depind de numărul perechilor de poli. Utilizarea DSWA poate reduce puterea aparentă a invertorului (redresorului activ) cu 43 % până la 28 % (la 8, respectiv, 24 poli),

atunci când convertizorul este plasat în serie cu înfăşurarea de excitaţie. Reducerea de putere aparentă a convertorului de putere este mai mică atunci când numărul de poli este în creştere, deoarece invertorul trebuie să transfere o putere reactivă tot mai mare. Avantajul acestei scheme este practic eliminat în cazul în care se foloseşte un redresor necomandat la puterea nominală şi este nevoie în plus şi de un convertor curent continuu-curent continuu ridicător de tensiune. Pentru cazul în care convertorul este plasat în înfăşurarea principală reducerea puterii aparente a acestuia este mai mică decât în cazul precedent (19 % până la 30,6 %), valorile mai mari obţinându-se la maşinile cu număr mai mare de poli. În acest caz nu mai este nevoie de un al doilea convertor, ci doar de o baterie de condensatoare plasată în înfăşurarea de excitaţie. Dacă generatorul DSWA este realizat la aceleaşi dimensiuni cu unul normal cu o singură înfăşurare statorică, randamentul care se obţine este cu 5 % mai redus putând apărea probleme de răcire. Randamentul poate fi menţinut doar cu preţul creşterii dimensiunilor DSWA cu până la 10 % în diametru care determină o creştere de până la 35 % în ceea ce priveşte masa respectiv cu 33 % a costului materialelor active. Datorită puterii mici, costul invertorului este cu peste 50 % mai mare decât costul maşinii şi în acest caz se justifică din punct de vedere economic utilizarea DSWA.

Pentru analiza cu elemente finite s-a utilizat programul FEMM 4.2, geometria, frontierele, proprietăţile de material, condiţiile de simetrie, repartiţia înfăşurărilor, distribuţia curenţilor în crestături fiind construită cu ajutorul unui program scris în Matlab care apelează funcţiile din programul de analiză cu elemente finite. Se prezintă în continuare o parte a codului Matlab utilizat:

```
%interface with FEMM 4.2
clear all;
close all;
g1;
I0=4.5; %A magnetisation pick current
w_name=['Ae';'Be';'Ce';'Am';'Bm';'Cm'];
constant;
set_mat;
pp=poles/2; %pole pairs
poles1=poles/gcd(Nrs,poles);
q1=Nss/(3*poles);
ym1=round(cSpanm*3*q1);
if(layerse==1) ye1=3*q1; end
if(layersm==1) ym1=3*q1; end
Dro=Dsi-2*hag;
hsy=(Dso-Dsi)/2-hst;
```

```
hry=(Dro-Dri)/2-hrt;

try closefemm; end
openfemm;
newdocument(0);
%Seting the material
mi_probdef(0,'millimeters','planar',1e-8,li,25);
mi_getmaterial('Air');

if(stcore_fem)
   %try mi_getmaterial(stcore_fem); catch stcore_fem=0; end
   eval('mi_getmaterial(stcore_fem)', 'stcore_fem=0');
end

if(~stcore_fem)
   stcore_fem=stcore_mat;
   mi_addmaterial(stcore_fem,1,1,0,0,1e-
6/rho_ironst,lamThick*1000,0,ssf*lfe/li,0);
   mi_addbhpoints(stcore_fem,BHs_ref(1,:),BHs_ref(2,:));
end

if(kmrid<1)
   if(strcmp(rtcore_mat,shaft_mat)) shaft_fem=rtcore_fem;
   elseif(strcmp(stcore_mat,shaft_mat)) shaft_fem=stcore_fem;
   end
   if(~(strcmp(shaft_fem,stcore_fem)|strcmp(rtcore_fem,shaft_fem)))
      mi_addmaterial(shaft_fem,1,1,0,0,1e-6/rho_ironrt,RlamThick,0,1,0);
      mi_addbhpoints(shaft_fem,BHsh_ref(1,:),BHsh_ref(2,:));
  end
end
```

3. Analiza cu elemente finite la funcţionarea în gol, în scurtcircuit şi în sarcină a generatorului

S-a analizat cu elemente finite maşina cu 8 poli în vederea validării rezultatelor obţinute în proiectarea optimală. Înfăşurările sunt în conexiune stea. Un prim calcul s-a făcut pentru mersul în gol iar în următoarea etapă s-a considerat că în faza A curentul este I, iar prin B şi C va fi – I/2. Analiza s-a făcut pentru o jumătate de maşină (4 poli). Discretizarea domeniului a generat 47758 de noduri şi 95129 elemente triunghiulare de discretizare. În figura 1 se prezintă geometria unei jumătăţi de maşină generată în FEMM 4.2 din codul de program scris în Matlab.

În figurile 2, 3, 4 şi 5 se prezintă alocarea proprietăţilor de material, o porţiune de discretizare în zona întrefierului, repartiţia

inducţiei magnetice pentru anumite valori ale curenţilor respectiv pentru cazul unui scurtcircuit virtual.

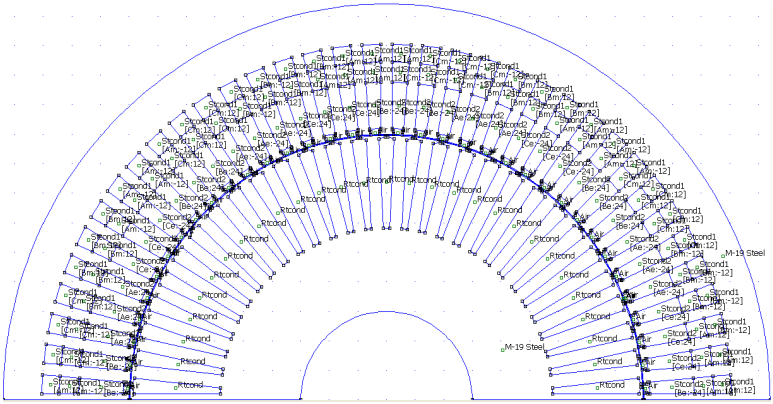


Fig. 1 Realizarea construcţiei geometrice (jumătate de maşină) prin apelarea mediului de programare FEMM 4.2 din Matlab

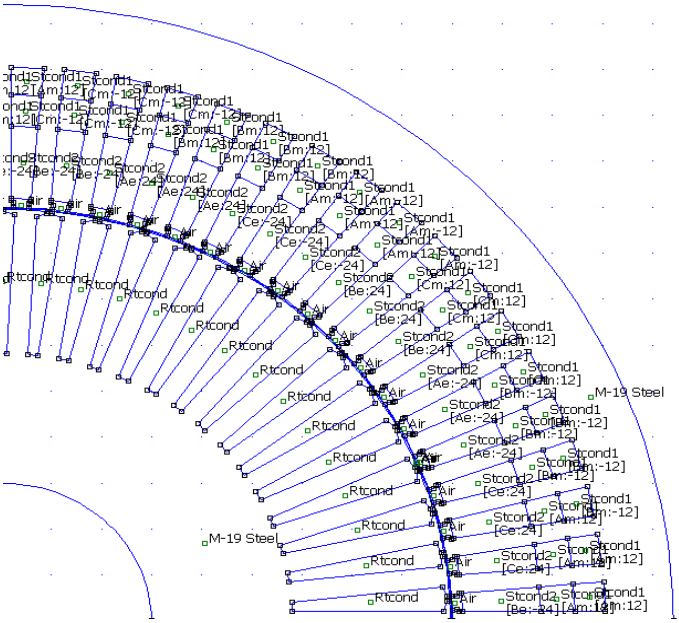


Fig. 2 Alocarea proprietăţilor de material pentru miezul feromagnetic statoric şi rotoric

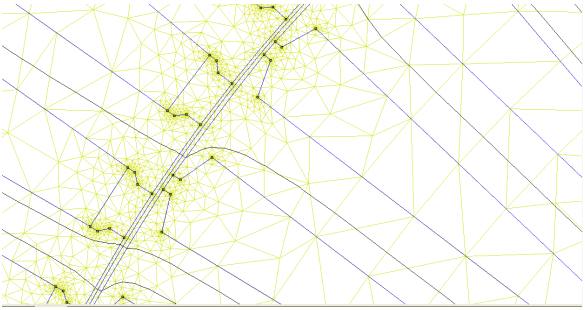


Fig. 3 Porţiune discretizată şi linii de câmp în zona dinspre întrefier

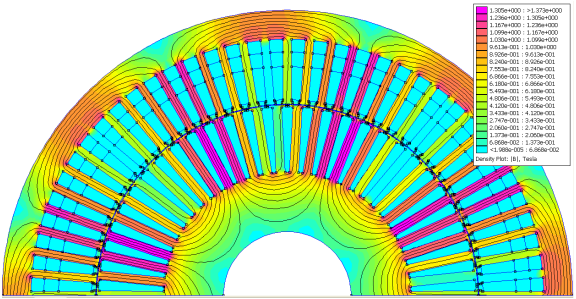


Fig. 4 Repartiţia inducţiei magnetice pe o jumătate de maşină
la I_{Am} = 4,5A şi I_{Ae} = 0

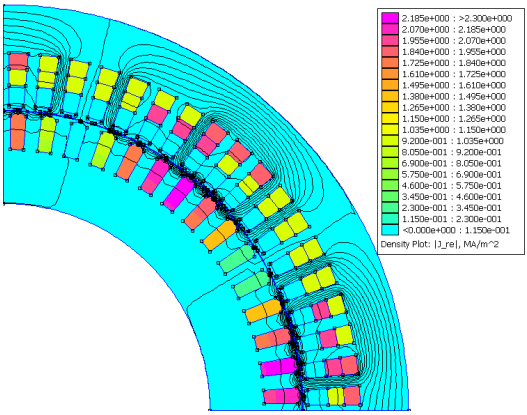


Fig. 5 Scurtcircuit virtual în element finit (f = f_N =15 Hz, I_{mA} = 7 A valoarea de vârf a curentului în înfăşurarea principală, I_{mB} = I_{mC} = -3,5 A)

Figurile 6, 7, 8, 9 şi 10 redau forma de variaţie în întrefier a inducţiei magnetice şi intensităţii câmpului magnetic, normale şi tangenţiale.

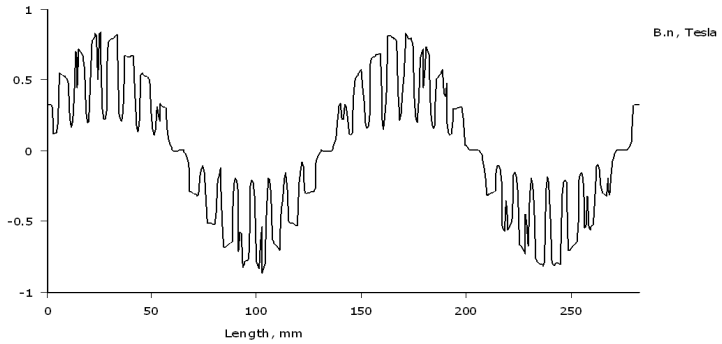


Fig. 6 Inducţia magnetică normală în întrefier pe o jumătate de maşină

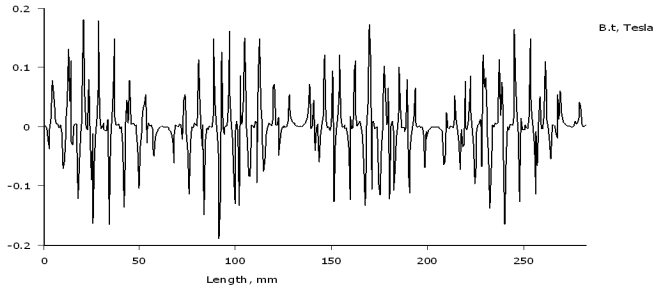


Fig. 7 Inducţia magnetică tangenţială în întrefier pe o jumătate de maşină

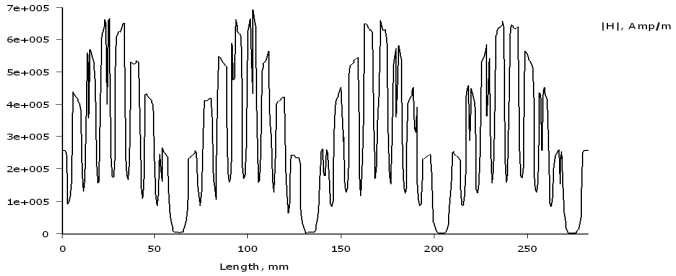


Fig. 8 Amplitudinea intensităţii câmpului magnetic în întrefier pe o jumătate de maşină (în modul)

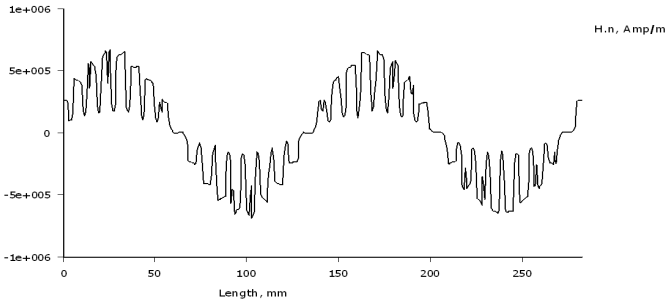


Fig. 9 Intensitatea câmpului magnetic normală în întrefier pe o jumătate de maşină

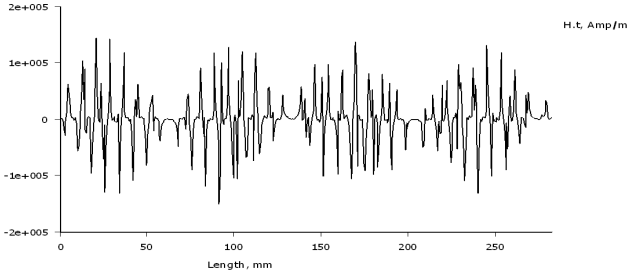
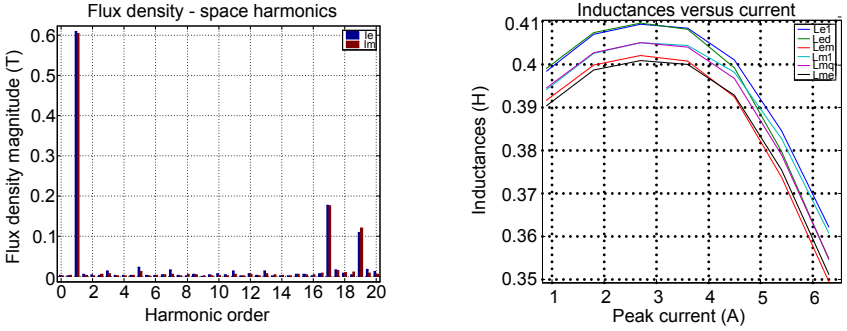


Fig. 10 Intensitatea câmpului magnetic tangenţială în întrefier pe o jumătate de maşină



a) b)

Fig. 11 Armonicele de spaţiu ale inducţiei în întrefier a) şi dependenţa inductanţelor în funcţie de curent b)

În figura 11 se face o analiză armonică a curbei inducţiei magnetice în întrefier şi se reprezintă dependenţa de curent a inductanţelor. Diferenţa dintre L_{em} şi L_{me} este mai mică de 0,3 % ceea ce se încadrează în eroarea admisibilă la calculul cu elemente finite. Există deci o validare cu elemente finite a calculului de optimizare.

4. Concluzii

■ Studiul DSWA cu metoda elementelor finite 2D-FEM demonstrează că această maşină poate fi utilizată cu succes în aplicaţii de producere a energiei electrice 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 cazul invertorului utilizat la un generator asincron clasic la aceeaşi putere.

■ Pentru modelul proiectat de 3 kW şi 250 rpm s-a obţinut un randament de 84 %, un cuplu de 170 Nm şi 1,93 Nm/kg la 8 perechi de poli respectiv 3,48 Nm/kg la 24 poli.

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, Th., *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 Davidson*, I.E., 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.
[7] Tutelea, L.N., Deaconu, S.I., Budişan, N., and Boldea, I., *Double Staor Winding Induction Generator for Wind and Hydro Applications: 2D-FEM Analysis and Optimal Design*, 15th European Conference on Power Electronics and Application, EPE ECCE Europe, 3-5 September 2013, Lille, France, 10 pag.

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

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