



RAPORT DE CERCETARE ȘTIINȚIFICĂ

**LA PROIECTUL PCCA NR. 29 / 2012
'Microsistem inovativ de conversie a energiei eoliene
pentru aplicații rezidențiale
utilizând generator electric cu acționare directă – INNOWECS'**

(Coordonator : Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (UTC-N))

- Aprilie 2013 -

Studiul microaerogeneratoarelor cu magneți permanenți și autocomutație electronică (μ AGMPAE)

Introducere

Utilizarea excesivă a carburanților fosili în secolul trecut a determinat comunitatea științifică internațională să caute noi surse de energie. Ritmul actual de consum pe plan mondial este de aproximativ 4 milioane de țitei anual, rezervele totale fiind estimate la 120-160 miliarde tone. Un calcul simplu arată că, în acest ritm, în 30-40 de ani întreaga rezervă de combustibili va fi epuizată. O primă tentativă de înlocuire pe scară largă a combustibililor fosili a fost în anii '50, prin apariția energiei atomice. Succesul imediat de care s-a bucurat aceasta a fost limitat de neajunsurile tehnologice și de riscurile mari pe care le implică utilizarea ei.

În ultimele decenii, cercetarea surselor de energie alternativă a devenit o prioritate pentru statele puternic dezvoltate, aceste studii fiind focalizate pe *sursele de energie regenerabile*, care prezintă avantajul de a exista practic nelimitat în natură. La ora actuală, pe plan mondial, cele mai studiate tipuri de energie regenerabilă sunt: energia vântului, energia solară, energia geotermală, energia biochimică și energia valurilor. La acestea se mai adaugă energia apelor curgătoare, exploatată pe plan mondial de câteva secole cu rezultate foarte bune.

În contextul actual, caracterizat de creșterea alarmantă a poluării cauzate de producerea energiei din arderea combustibililor fosili, devine din ce în ce mai importantă reducerea dependenței de acești combustibili. Energia eoliană este printre formele de energie regenerabilă care se pretează aplicațiilor la scară redusă, fiind folosită extensiv în ziua de astăzi. Turbine noi de vânt se construiesc în toată lumea, energia eoliană fiind sursa de energie cu cea mai rapidă creștere în ultimii ani.

Stadiul actual al cercetării științifice în domeniu

De interes pentru această lucrare sunt centralele eoliene ce utilizează *microaerogeneratoare cu magneți permanenți și autocomutație electronică* (μ AGMPAE).

Înlocuirea mașinilor de curent continuu și a mașinilor de curent alternativ cu mașini electrice cu magneți permanenți și autocomutație electronică a dobândit, recent, un mare interes

pentru industria autovehiculelor, calculatoarelor, aerospațială și medicală. Mașinile cu magneți permanenți au câștigat popularitate datorită următoarelor avantaje :

- excitația prin magneți permanenți elimină periile și inelele colectoare, rezultând o construcție mai robustă și mai simplă a mașinii ;
- excitația permanentă se realizează fără consum de curent și fără pierderi, astfel că mașina are randament energetic ridicat ;
- rotorul este mai simplu și mai fiabil decât al mașinilor de c.c. cu colector, iar lipsa oricărei surse de căldură majoră pe rotor contribuie la reducerea posibilității de deformări structurale ale rotorului și lagărelor acestuia ;
- modul de funcționare și construcția mașinii prezintă avantaje suplimentare în controlul poziției și vitezei rotorului.

În mod specific, μ AGMPAE prezintă următoarele avantaje :

- sunt utilizate pentru a crea un câmp magnetic, fără nevoia de aplicare a energiei electrice ;
- sunt foarte simple de construit și necesită întreținere minimă, fiind fără perii și colector ;
- sunt de dimensiuni reduse și necesită, prin urmare, mai puțin spațiu în comparație cu alte tipuri de generatoare ;
- prezintă o durată de viață îndelungată și sunt deosebit de silențioase.

Pe de altă parte, μ AGMPAE prezintă și o serie de dezavantaje :

- nu pot fi oprite și pornite cu ușurință ;
- sunt dificil de a fi standardizate ;
- este nevoie de magneți de dimensiuni mari pentru a genera cupluri importante.

μ AGMPAE se încadrează în categoria mașinilor de curent continuu fără perii (consacrate sub denumirea, în engleză, de « permanent-magnet brushless DC machines »). În această categorie, μ AGMPAE oferă avantajele înaltei eficiențe într-o gamă largă de funcționare, întreținerii reduse, durabilității mai mari, compactității, densității de putere mărite. De aceea, ele se pretează microsystemelor de producere a energiei electrice. În plus, ele pot fi utilizate în sisteme îmbarcate de tipul vehiculele hibride și electrice sau în dispozitive de stocare a energiei.

Principiul de funcționare a μ AGMPAE

Microsistemul eolian de producere a energiei electrice este format dintr-o microturbină eoliană, un μ AGMPAE și un invertor AC/DC. Mai departe, se poate utiliza un alt invertor , pentru conectarea microsistemului la rețea electroenergetică de c.a. mono- sau trifazat.

Secțiunile transversale rotorice ale μ AGMPAE cu diferite dispuneri ale magneților permanenți sunt prezentate în Fig. 1.

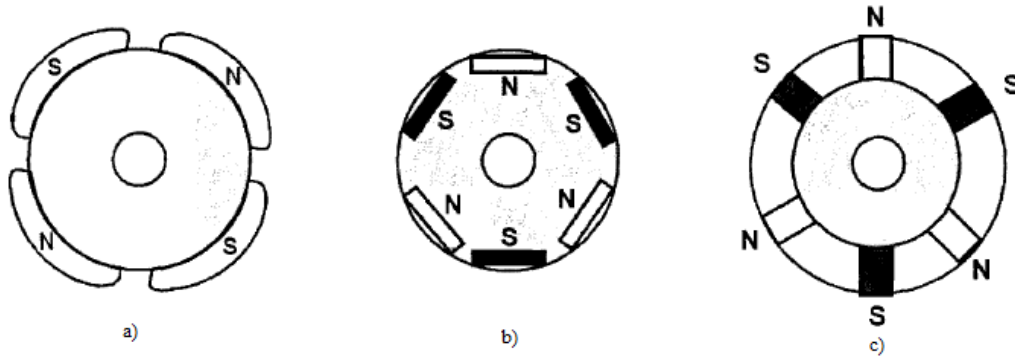


Fig. 1 Secțiuni transversale rotorice ale μ AGMPAE cu diferite dispuneri ale magneților permanenți:
a) la suprafață; b) în interior, cu magnetizare radială alternată ;
c) în interior, cu magnetizare tangențială alternată [3].

μ AGMPAE, în funcție de structura lor, pot fi:

- cu rotor exterior;
- cu rotor interior;
- cu rotor discoidal (cu flux axial).

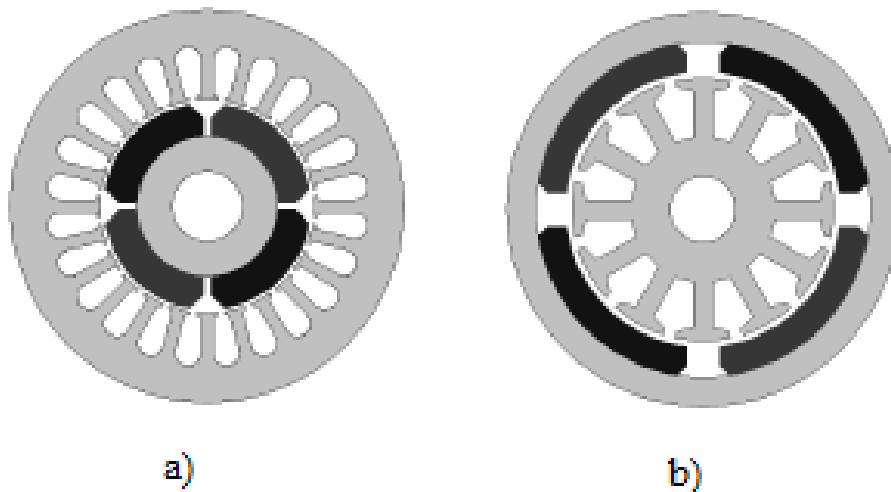


Fig. 2. μ AGMPAE cu rotor interior (a) și exterior (b) [1].

μ AGMPAE este practic o mașină de c.c. cu inductor rotoric excitat permanent și cu indus trifazat statoric comutat electronic în funcție de poziția rotorului printr-un redresor în punte trifazată. Esențial la acest tip de generator este detecția poziției rotorice, necesară pentru a realiza o secvență de autocomutație electronică adecvată. Statorul este, uzual, realizat din tole de oțel pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari.

Fig. 2 prezinta un model de μ AGMPAE trifazat cu patru poli rotorici. Mașina primară de antrenare a rotorului este, în acest caz, microturbina eoliană. În timp ce rotorul se învârte, în înfășurările de fază statorice se induc t.e.m. de formă trapezoidală (Fig. 3). Datorită acestei forme de undă a t.e.m. induse dinamic, μ AGMPAE poate avea o densitate de putere cu 15% mai mare față de microgeneratoarele sincrone cu magneți permanenți și t.e.m. indusă sinusoidală [1].

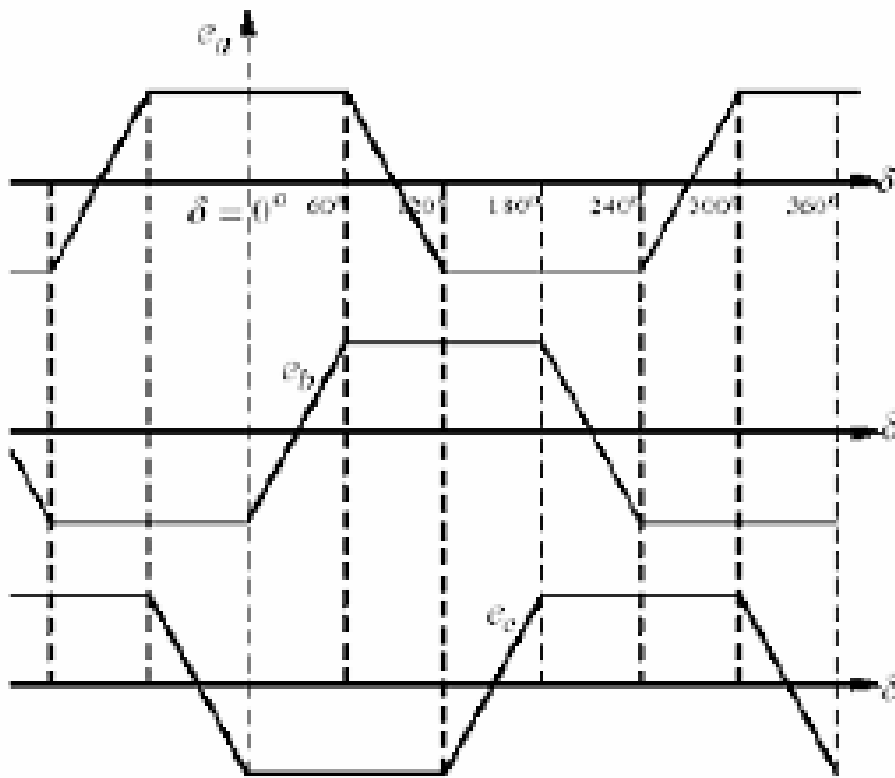


Fig.3 Formele de undă trapezoidale ale t.e.m. de fază ale μ AGMPAE trifazat [1].

În cazul acestui sistem s-a considerat că:

- mașina este nesaturată;
- rezistența și inductanța statorice sunt aceleași pentru toate cele trei faze;
- dispozitivele semiconductoare de putere din redresor sunt ideale.

Modelul matematic al microsistemului eolian

Modelul turbinei eoliene

Modelul de microturbină eoliană dezvoltat este unul general, preluat din literatura de specialitate. Expresia de calcul a puterii extrase din vânt este

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3, \quad (1)$$

unde ρ este densitatea aerului (kg/m³), $A = \pi \cdot R^2$ este aria paletelor (m²), R este raza rotorului, iar v_w reprezintă viteza vântului. O turbină electrică poate recupera doar o parte din energia vântului, care este limitată de limita lui Betz (maxim 59%). Cel pe care se bazează limita lui Betz este coeficientul de putere al turbinei, C_p . Astfel că puterea mecanică a turbinei se poate exprima astfel :

$$P_w = 0.5 \cdot C_p(\beta, \lambda) \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \quad (2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (3)$$

unde C_p este coeficientul de putere al turbinei (care este dependent de viteza specifică a turbinei – λ – și de unghiul de înclinare al palelor – β –) fiind responsabil pentru pierderile din procesul de conversie al energiei. Viteza specifică se definește ca și raportul dintre viteza mecanică de rotație a turbinei și viteza vântului v_w :

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v_w} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}, \quad (5)$$

unde Ω este viteza de rotație a turbinei și R este raza palelor turbinei.

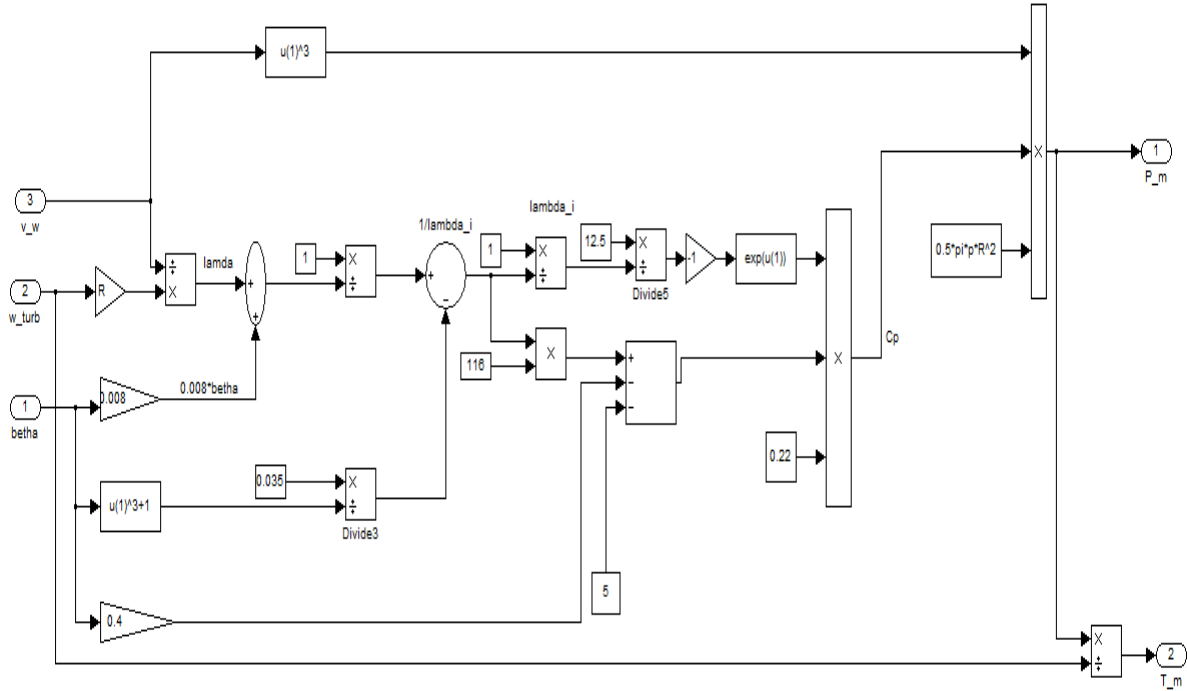


Fig. 4. Modelul în Matlab/Simulink al microturbinei eoliene.

Modelul μ AGMPAE

Modelul matematic al μ AGMPAE, având cele trei faze conectate în stea, este :

$$v_{ab} = R \cdot (i_a - i_b) + (L - M) \cdot \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_a - e_b \quad (6)$$

$$v_{bc} = R \cdot (i_b - i_c) + (L - M) \cdot \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + e_b - e_c \quad (7)$$

$$v_{ca} = R \cdot (i_c - i_a) + (L - M) \cdot \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + e_c - e_a \quad (8)$$

$$T_e = T_L + J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + B \cdot \omega_r \quad (9)$$

unde v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} reprezintă tensiunile de linie, i_a, i_b, i_c sunt curenții celor trei faze, iar e_a, e_b, e_c reprezintă t.e.m. de fază, având formă trapezoidală. Rezistența R și inductanțele L, M au aceleași valori pentru fiecare fază. T_e definește cuplul electromagnetic dezvoltat de generator, T_L este

cuplul mașinii primare de antrenare, J reprezintă inerția rotorului, B este coeficientul de frecare vâscoasă, iar ω_r reprezintă viteza unghiulară de rotație a rotorului.

T.e.m. indusă dinamic se determină în funcție de poziția rotorului, amplitudinea ei calculându-se astfel:

$$E = k_e \cdot \omega_r \quad (10)$$

unde k_e este coeficientul t.e.m.

Considerându-se că t.e.m. corespunzătoare celor trei faze statorice prezintă forme de undă identice, ecuațiile utilizate pentru generarea se pot scrie [5]:

$$e_a = \begin{cases} \left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r, & 0 < \theta_r < \frac{\pi}{6} \\ E, & \frac{\pi}{6} < \theta_r < \frac{5 \cdot \pi}{6} \\ -\left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r + 6 \cdot E, & \frac{5 \cdot \pi}{6} < \theta_r < \frac{7 \cdot \pi}{6} \\ -E, & \frac{7 \cdot \pi}{6} < \theta_r < \frac{11 \cdot \pi}{6} \\ \left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r - 12 \cdot E, & \frac{11 \cdot \pi}{6} < \theta_r < 2 \cdot \pi \end{cases} \quad e_b = \begin{cases} -E, & 0 < \theta_r < \frac{\pi}{2} \\ \left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r - 4 \cdot E, & \frac{\pi}{2} < \theta_r < \frac{5 \cdot \pi}{6} \\ E, & \frac{5 \cdot \pi}{6} < \theta_r < \frac{9 \cdot \pi}{6} \\ -\left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r + 10 \cdot E, & \frac{9 \cdot \pi}{6} < \theta_r < \frac{11 \cdot \pi}{6} \\ -E, & \frac{11 \cdot \pi}{6} < \theta_r < 2 \cdot \pi \end{cases}$$

$$e_c = \begin{cases} E_r, & 0 < \theta_r < \frac{\pi}{6} \\ -\left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r + 2 \cdot E, & \frac{\pi}{6} < \theta_r < \frac{\pi}{2} \\ -E, & \frac{\pi}{2} < \theta_r < \frac{7 \cdot \pi}{6} \\ \left(\frac{6 \cdot E}{\pi}\right) \cdot \theta_r - 8 \cdot E, & \frac{7 \cdot \pi}{6} < \theta_r < \frac{9 \cdot \pi}{6} \\ E, & \frac{9 \cdot \pi}{6} < \theta_r < 2 \cdot \pi \end{cases} \quad (11)$$

Expresia de calcul a cuplului electromagnetic rezultă

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (12)$$

În general, t.e.m. pot fi scrise sub forma:

$$e_a = K_e \omega_m f_a(\theta) \quad (13), \quad e_b = K_e \omega_m f_b(\theta) \quad (14), \quad e_c = K_e \omega_m f_c(\theta) \quad (13)$$

Înlocuind în (12), se obține următoarea expresie a cuplului electromagnetic:

$$T_e = K_e [f_a(\theta)i_a + f_b(\theta)i_b + f_c(\theta)i_c] \quad (14)$$

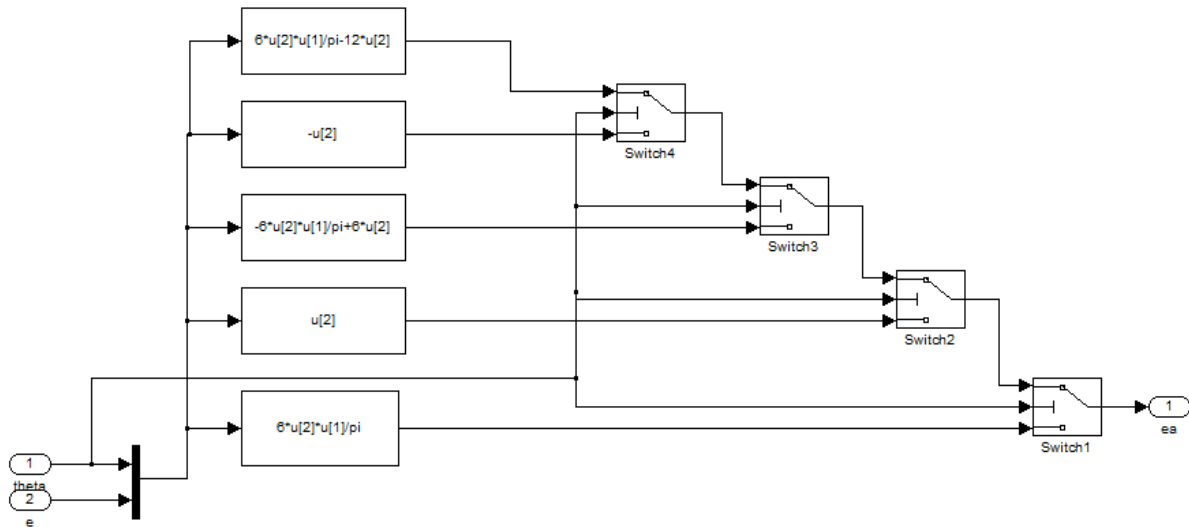


Fig. 5 Modelul t.e.m. e_a în Matlab/Simulink

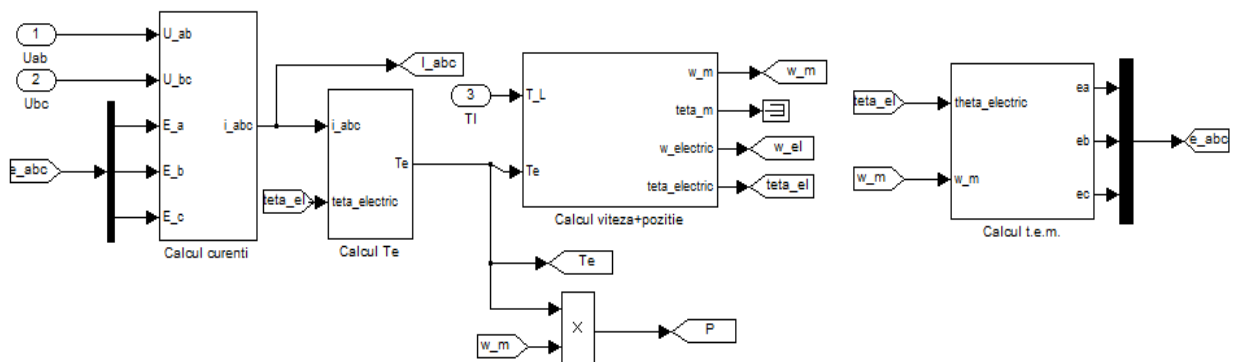


Fig.6 Modelul μ AGMPAE în Matlab/Simulink

Modelul redresorului

În funcție de starea de conducție a curentului există șase stări de operare ale redresorului electronic de putere de la ieșirea μ AGMPAE. Curentii de pe cele trei faze sunt controlați prin

regulator cu histerezis pentru a se obține niște forme de undă cvasi-dreptunghiulare simetrice în raport cu formele de undă ale t.em. de fază.

Rezultatele de simulare numerică

Simularea microsistemului eolian s-a realizat în mediul Matlab/Simulink, în baza modelului din Fig. 7.

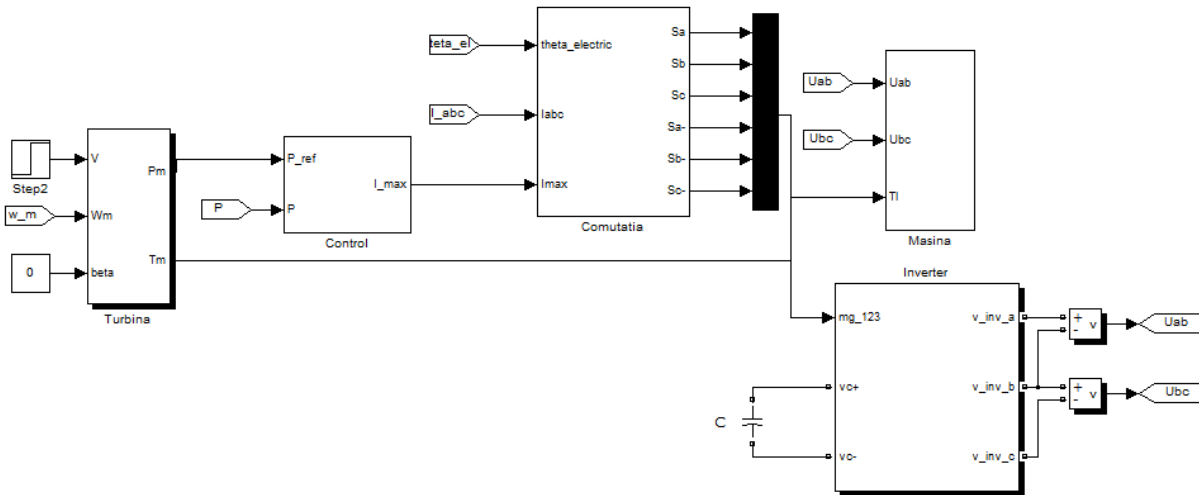


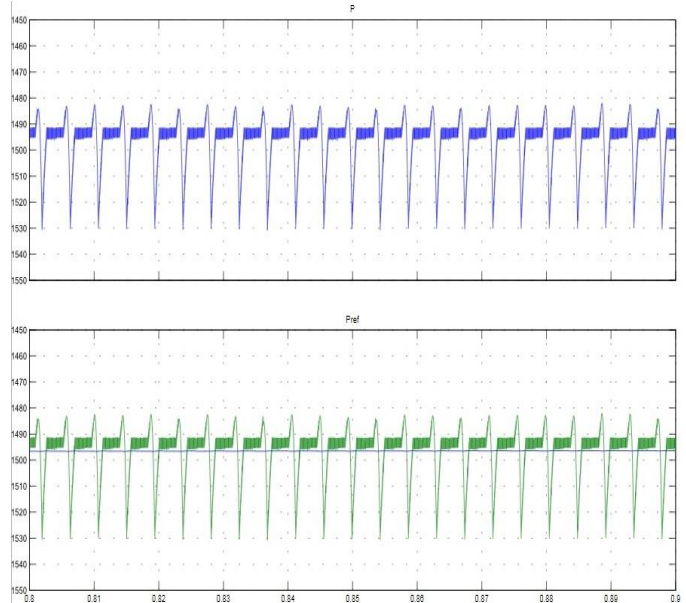
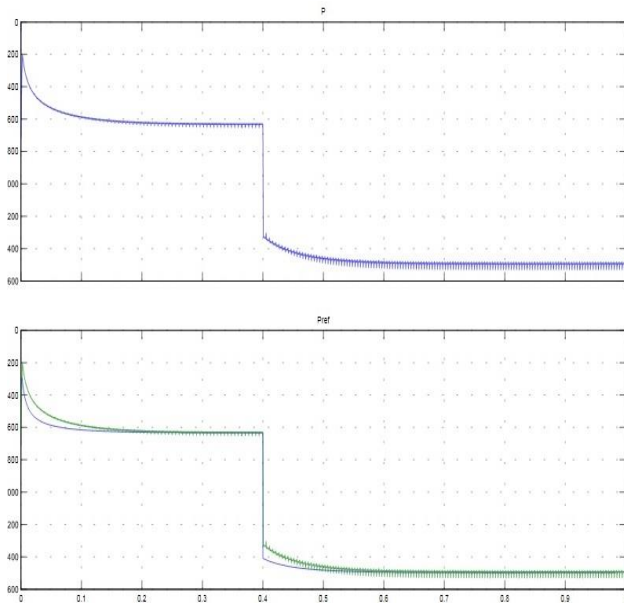
Fig. 7 Modelul microsistemului eolian cu μ AGMPAE în Matlab/Simulink

Sistemul, după cum se observă și în figură, cuprinde blocul „Turbina”, unde în funcție de viteza vântului se determină cuplul și puterea mecanică dezvoltată de turbina eoliană. Cuplul dezvoltat reprezintă cuplul mecanic de antrenare a μ AGMPAE, iar puterea mecanică este utilizată în blocul „Control” pentru a determina curentul de referință. Semnalele aplicate redresorului de ieșire se obțin în blocul „Comutatie”, în urma unui control prin histerezis al curenților de fază și în funcție de secvența de comutație electronică funcție de poziția rotorului. Valorile tuturor parametrilor utilizați precum și rezultatele simulării sunt exemplificate în tabelul și figurile de mai jos.

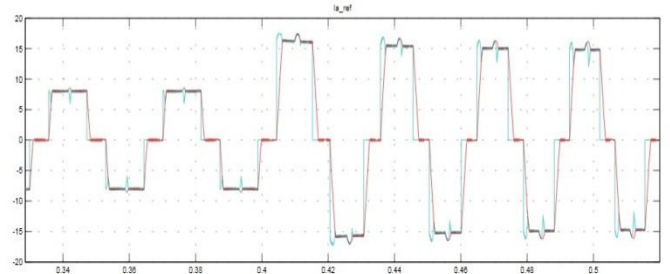
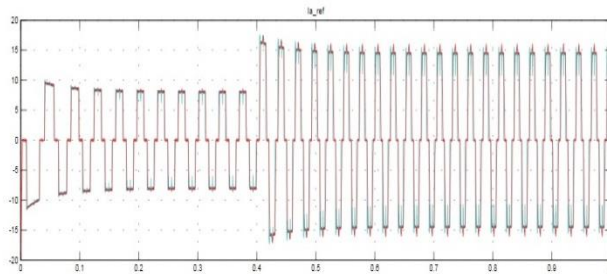
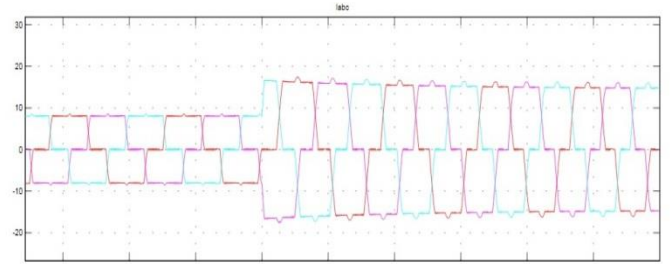
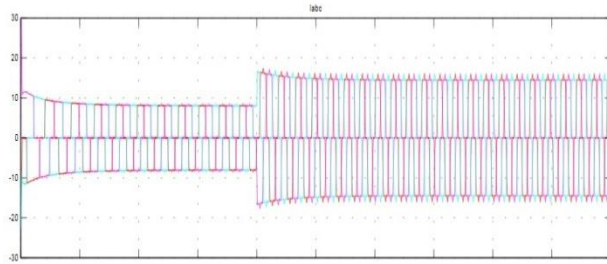
După cum se observă și din figuri, până la $t=0.4$ s s-a considerat viteza vântului egală cu 3 m/s, iar de la $t=0.4$ s s-a impus o ușoară creștere a vitezei vântului, până la 4 m/s. Această creștere determină o creștere a tuturor mărimilor microsistemului eolian, adică a puterii electrice a μ AGMPAE, a cuplului electromagnetic și a vitezei rotorice, precum și a curenților și a t.e.m.

Tabel 1. Parametrii de bază ai μ AGMPAE și microturbinei eoliene

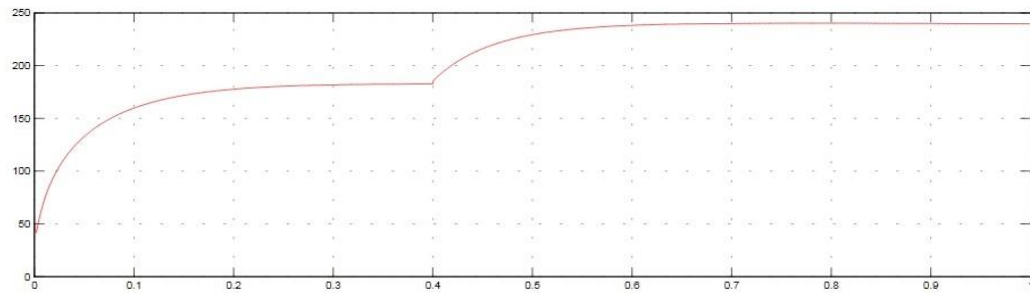
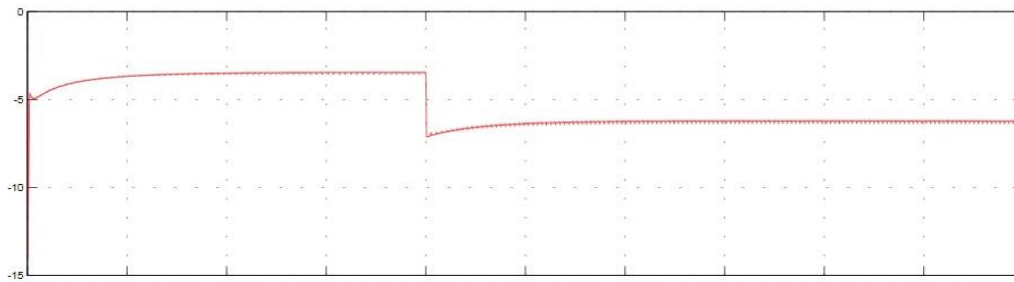
Parametru	Valoare	Unitate
Nr. faze	3	-
Nr.poli	2	-
Puterea electrică	1.5	[kW]
Rezistența	1.5	[Ω]
Inductanța	6.1	[mH]
Inerție	0.0005	[kg*m ²]
Coeficient de fricțiune	$1.5 \cdot 10^{-4}$	-
Constanta t.e.m.	0.21486	
Tensiunea în circuitul de c.c. în aval de redresorul în punte trifazată	200	[V]
Viteza vântului	3-4	[m/s]



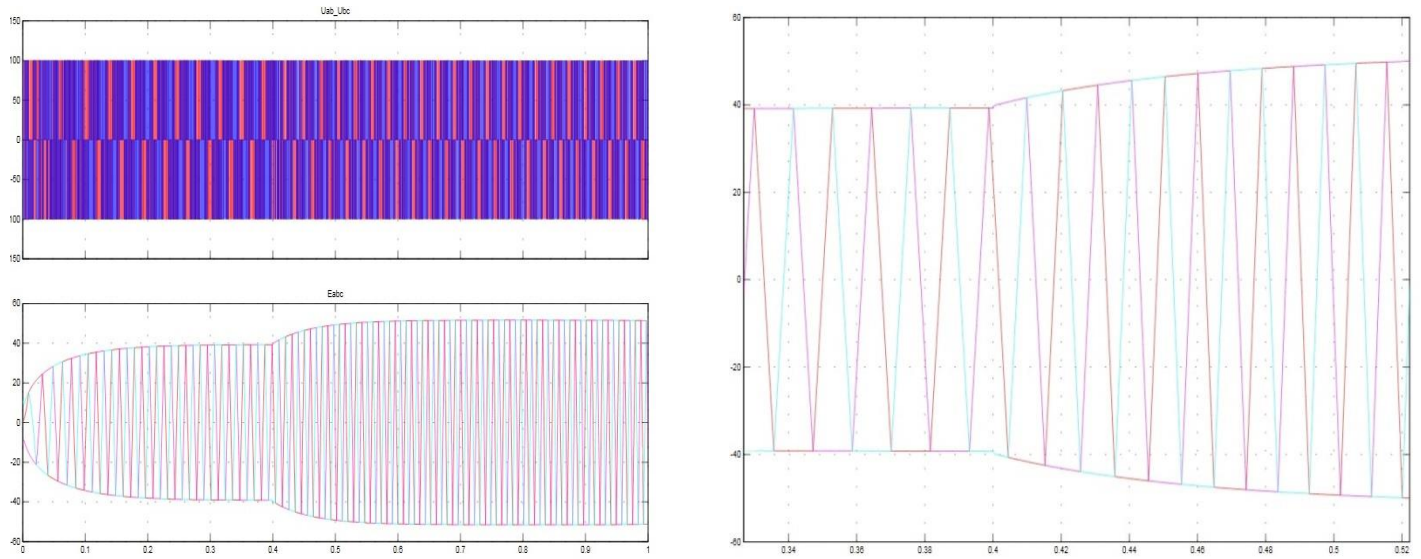
a) Controlul puterii



b) Curenții de fază generați de μ AGMPAE



c) Cuplul electromagnetic (sus) și viteza (jos) μ AGMPAE



d) Tensiunile de linie (stanga sus) si t.e.m. ale μ AGMPAE

Fig. 8 Rezultatele de simulare a microsistemului eolian

Concluzii

Acest raport de cercetare explică modul de funcționare al μ AGMPAE trifazat într-un microsistem eolian și prezintă rezultatele de simulare în Matlab/Simulink a microsistemului cu controlul puterii extrase și al curenților μ AGMPAE. În baza rezultatelor de simulare, se poate afirma că microsistemul eolian cu μ AGMPAE este stabil și funcțional.

În continuarea cercetării, se va studia și implementa un algoritm de detecție indirectă ('sensorless') a poziției rotorului μ AGMPAE, precum și optimizarea energetică a microsistemului eolian.

Bibliografie selectivă

- [1] Hyung-Woo Lee, Tae-Hyung Kim, Ehsani, M., „*Practical control for improving power density and efficiency of the BLDC generator*”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 20, No. 1, pp. 192-199.
- [2] Iepure Ioan Liviu, “*Sensorless control of PM brushless DC motor drives*”, PhD Thesis, Politechnical University of Timisoara, Romania.
- [3] N. Milivojevic et al., “*Theory and implementation of a simple digital control strategy for brushless DC generators*”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 26 (2011), No. 11, pp. 3345-3356.
- [4] Byoung-Kuk Lee, Mehrdad Ehsani, „*Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives*”, Electric Power Components and Systems, Volume 31, Issue 9, 2003.
- [5] I. Boldea, “*Variable speed generators*”, CRC Press, Boca Raton, USA, 2006, Ch. 10 – Permanent-magnet synchronous generator systems.
- [6] I. Boldea, “*Control of electric generators*”, Proc. 29th Annual IEEE Conference of Industrial Electronics Society – IECON 2003, Vol. 1, pp. 972–980.