RAPORT ŞTIINŢIFIC ŞI TEHNIC

PENTRU ETAPA 4 – 2015 A PROIECTULUI PCCA NR. 29 / 2012

'Innovative wind energy conversion micro-system with direct-driven electric generator for residential uses' ('Microsistem inovativ de conversie a energiei eoliene pentru aplicații rezidențiale utilizând generator electric cu acționare directă – INNOWECS)

Coordonator CO – Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (UTC-N) Partener P1 – SC BMEnergy SRL

> Prof.dr.ing. Mircea M. RĂDULESCU Director de proiect, CO – UTC-N

> > Dr.ing. Ştefan BREBAN Resp. proiect P1 – BMEnergy

- Noiembrie 2015 -

RAPORT ŞTIINŢIFIC ŞI TEHNIC PENTRU ETAPA 4 – 2015 A PROIECTULUI PCCA NR. 29 / 2012

În conformitate cu obiectivele și activitățile de cercetare corespunzătoare etapei 4 – 2015 a proiectului PCCA 'INNOWECS', echipa de cercetare a coordonatorului CO – UTC-N și a partenerului P1 – BMEnergy la proiect a realizat (i) dezvoltarea unei topologii de generator electric cu performanțe mai ridicate și cost de fabricație mai scăzut; (ii) dezvoltarea și testarea experimentală a microcentralei eoliene de uz rezidențial cu componentele aferente.

Structura microaerogeneratorului este alcătuită din două rotoare-disc exterioare cu magneți permanenți de ferită încastrați între polii rotorici și magnetizați circumferențial și dintr-un stator-disc interior fără miez de fier și cu înfășurare trifazată concentrată (Fig. 1).



Fig. 1. Microaerogenerator sincron cu flux axial, având două rotoare-disc exterioare cu magneți de ferită și un stator-disc interior, fără fier, cu înfășurare trifazată concentrată plană.

Microaerogeneratorul posedă două semicarcase, realizate din aliaj de aluminiu, prin turnare și asamblate împreună prin intermediul șuruburilor și piulițelor 2. Pentru realizarea arborelui 14, organ intens solicitat, atât static, cât și dinamic, la funcționarea microturbinei eoliene, s-a optat pentru oțel laminat la cald. Cele două rotoare-disc 13 ale microaerogeneratorului sunt fixate pe arbore cu ajutorul penelor 5, 6 și asigurate axial cu bucșa 9 și piulița și șaiba 12. Bucșa 8 se utilizează pentru delimitarea întrefierului dintre statorul 7 și cele două rotoare. Ansamblul mobil al microaerogeneratorului se susține pe rulmenții radiali-axiali cu role conice 11 și 15. Statorul, plasat între cele două rotoare, conține o înfășurare trifazată concentrată cu bobine plane, fără miez de fier și cu secțiune axială trapezoidală, corespunzătoare suprafeței polilor magnetici rotorici pe partea întrefierului. Suportul exterior al statorului este realizat prin turnare din material nemagnetic (rășină epoxidică) pentru consolidarea bobinelor înfășurării (Fig. 2). Bobinele sunt realizate din conductor de cupru cu diametrul de 0,8 mm și secțiunea de 0,398 mm². Fiecare dintre aceste bobine are 120 de spire și o rezistență de 3,8 Ω , cu o lungime de aproximativ 54 m. Rezultă un total de 972 m de conductor electric, cu o greutate totală, fără izolație, de aproximativ 3250 g (Fig. 3).



Fig. 2. Procesul de turnare a suportului nemagnetic (rășină epoxidică) pentru consolidarea înfășurării statorice trifazate, concentrate, plane.



Fig. 3. Secvență din realizarea topologiei statorului-disc cu fixarea înfășurării sale trifazate în suport de aluminiu.

Rotoarele microaerogeneratorului electric sunt realizate constă într-o structură alternantă de piese metalice și magneți de ferită. Datorită faptului că prin interiorul polilor rotorici, fluxul magnetic se închide atât pe direcție axială, în zona magneților de ferită, cât și pe direcție radială, în zona dinspre întrefier a polilor, realizarea acestora din tole este imposibilă. În plus, s-a ținut cont de faptul că în interiorul rotorului variația inducției este mică, fiind influențată de poziția relativă a acestuia față de bobinele statorice, fără penalizarea unor pierderi în fier semnificative. Caracteristica de magnetizare a materialului utilizat pentru realizarea polilor rotorici este prezentată în Fig. 4.



Fig. 4. Caracteristica de magnetizare a materialului feromagnetic utilizat în realizarea polilor rotorici.

În scopul obținerii unei densități mari de flux magnetic în întrefier, pentru cazul considerat al magneților de ferită, topologia rotorică s-a modificat, astfel încât magneții de formă paralelipipedică sunt încastrați radial în miezul rotorului și intercalați de polii magnetici ai acestuia (Fig. 5).



Fig. 5. Topologia rotoarelor-disc ale microaerogeneratorului .

Magneții rotorici de ferită, cu magnetizare circumferențială alternantă NS–SN–NS pe fiecare din cele două rotoare-disc, prezintă o caracteristică de demagnetizare liniară (Fig. 6).



Fig. 6. Caracteristica de demagnetizare liniară a magneților de ferită rotorici.

Cele două rotoare sunt aliniate unul față de celălalt, astfel încât un magnet cu magnetizare circumferențială NS, de pe unul din rotoare, corespunde unui magnet cu magnetizare circumferențială SN de pe celălalt rotor, și reciproc.

Polii rotorici și magneții de ferită sunt fixați prin turnare, respectiv, prin lipire, pe un suport nemagnetic din aluminiu, care are și rolul de a permite fixarea rotorului pe arborele microaerogeneratorului.

Topologia rotoarelor-disc permite concentrarea fluxului magnetic în polii magnetici rotorici, cu următoarele avantaje :

 densitatea fluxului în polii magnetici rotorici este mai mare decât în magneți, astfel încât se pot utiliza magneți de ferită (mai ieftini) cu inducție magnetică remanentă inferioară;

 pentru creșterea densității fluxului magnetic în întrefier, se poate considera și lungimea axială a generatorului, nu doar cea radială;

este posibilă o fixare mai simplă şi sigură a magneților de ferită.

Arborele rotoric, organ intens solicitat, atât static, cât și dinamic, la funcționarea microturbinei eoliene, este realizat din oțel laminat la cald, având lungimea de 50 cm, pentru a permite montarea întregului ansamblu format din stator, rotoare și semicarcase (Fig. 7).

În scopul limitării puterii, prin scoaterea rotorului turbinei din direcția acțiunii vântului, s-a propus de catre partenerul la proiect P1 - SC BMEnergy un nou tip de dispozitiv electromecanic, care a fost simulat de echipa coordonatorului UTC-N al



Fig. 7. Arborele rotoric al microaerogeneratorului, realizat din oțel laminat la cald.

proiectului. Dispozitivul constituie un mecanism de protecție cu acționare electromecanică (recomandat pentru turbinele eoliene cu putere mai mică de 30 kW), destinat scoaterii din vânt, în situația când viteza vântului depășește limita de siguranță. În Fig. 8, se prezintă ansamblul mecanismului de scoatere din vânt pe verticală, alcătuit din: 1) ansamblu suport-bobină; 2) placă superioară; 3) placă inferioară; 4) rulment; 5) ansamblu ax-magnet; 6) rulment; 7) arc de torsiune; 8) bucșă fixare arc; 9) ansamblu braț actionare; 10) știft blocare; 11) ansamblu bucșă blocare; 12) inel Seeger; 13) șurub cu cap înecat; 16) știft filetat; 17) știft fixare arc.



Fig. 8. Ansamblul mecanismului (dispozitivului electromecanic) de scoatere din vânt.

Principiul de funcționare al dispozitivului este următorul: cât timp turbina eoliană funcționează sub tensiunea electrică maximă a microaerogeneratorului, bobinele sunt nealimentate, iar arcul de torsiune 7 pretensionat menține aripa cozii turbinei într-un plan paralel cu direcția de curgere a masei de aer. Odată depășită tensiunea electrică maximă a microaerogeneratorului, se alimentează bobinele dispozitivului electromecanic, iar ansamblul ax de rotație - magnet permanent va roti la 90 de grade aripa cozii turbinei, permițând scoaterea acesteia din vânt.

În scopul dezvoltării și testării experimentale a microcentralei eoliene de uz rezidențial cu componentele aferente, pe de o parte, s-a utilizat programul JMAG-Designer de analiză numerică de câmp magnetic tridimensional prin metoda elementelor finite, luându-se în considerare simetria microaerogeneratorului pentru reducerea timpului de calcul, iar pe de altă parte s-a realizat standul experimental de laborator, în care mișcarea produsă de palele turbinei de vânt este considerată liniară, fiind emulată cu ajutorul unui motor de curent continuu (Fig. 9).

Pe lângă microaerogeneratorul electric, standul experimental conține emulatorul de turbină (motorul de curent continuu), traductorul de viteză și cel de moment de cuplu de forțe electromagnetice (Fig. 10). Au fost utilizate două programe pentru testare: SIMULINK modelează sistemul (Fig.11) utilizând diagrame-bloc de comandă, iar dSPACE înregistrează modificările, care apar asupra variabilelor în timp real, cu ajutorul cărora se poate realiza controlul aerogeneratorului. Aceasta presupune, odată cu instalarea programului dSPACE, crearea unei biblioteci specifice de blocuri în MATLAB/SIMULINK.



Fig. 9. Standul de testare experimentală a microcentralei eoliene bazate pe microaerogeneratorul sincron cu magneți permanenți și flux axial.



Fig. 10. Componente hardware ale standului de testare experimentală a microcentralei eoliene bazate pe microaerogeneratorul sincron cu magneți permanenți și flux axial.

Pentru testarea și analiza performanțelor aerogeneratorului în timp real s-a utilizat o platformă de simulare de tip *Hardware-in-the-Loop* (HIL) cu un sistem de control cu putere de calcul mare și posibilități multiple de interfațare realizate cu placa dSPACE DS1104. Software-ul asociat plăcii este *ControlDesk*, un mediu ce asigură toate facilitățile de gestiune a resurselor hardware, achiziție de date și realizarea de interfețe grafice pentru utilizator.

Formele de undă ale intensității curentului electric debitat de microaerogenerator și tensiunii electrice furnizate, precum și momentul cuplului de forțe electromagnetice au fost înregistrate cu ajutorul unui osciloscop digital METRIX, al unui traductor de moment de cuplu de forțe și al unui sistem de achiziții de date, constând din placă dSPACE și un calculator, au fost, apoi, prelucrate în mediul MATLAB/SIMULINK, iar în final, au fost comparate cu simulările realizate în mediul de calcul numeric de câmp magnetic JMAG Designer (Fig. 12).

Modelul de simulare a fost completat cu o strategie MPPT de extragere a maximului de putere din vânt (Fig. 13), realizată prin controlul convertorului electronic (redresorului) de mașină (aerogenerator) prin două regulatoare PI de curent electric al aerogeneratorului și un al treilea regulator PI cu buclă *anti-windup* pentru viteza turbinei eoliene (Fig. 14). Un control analog a fost implementat pentru convertorul electronic (invertorul) de rețea, prin două regulatoare PI de curent electric al aerogeneratorului și un al treilea regulator PI al tensiunii electrice din circuitul intermediar de c.c. (Fig. 15).



Fig. 11. Modelul de simulare al microcentralei eoliene în mediul MATLAB/ SIMULINK.



Fig. 12. Rezultate comparative pe stand de testare experimentală și prin simulare numerică în JMAG-Designer, pentru (a) intensitatea curentului electric debitat, (b) tensiunea electrică furnizată și (c) momentul cuplului de forțe electromagnetice ale aerogeneratorului din microcentrala eoliană.



Fig. 13. Modelul de simulare al strategiei MPPT de extragere a maximului de putere din vânt.



Fig. 14. Modelul de simulare al controlului convertorului (redresorului) de maşină (aerogenerator) din structura microcentralei eoliene.



Fig. 15. Modelul de simulare al controlului convertorului (invertorului) de rețea din structura microcentralei eoliene.

În Fig. 16, este reprezentat momentul cuplului de forțe electromagnetice la arborele comun al turbinei eoliene și aerogeneratorului, mărime de intrare în schema de control a convertorului electronic (redresorului) de mașină (microaerogenerator).



Fig. 16. Variația momentului cuplului de forțe electromagnetice la arborele comun al turbinei eoliene și microaerogeneratorului.

În Fig. 17, sunt prezentate rezultatele de simulare pentru puterile electrice activă și reactivă furnizate de microaerogenerator, controlat prin strategie MPPT. Se poate observa, că : (a) puterea turbinei eoliene și puterea activă a aerogeneratorului sunt suficient de apropiate; (b) un flux redus de putere reactivă este debitat de aerogenerator în circuitul intermediar de c.c., acesta putând fi, însă, compensat printr-o buclă suplimentară de control al convertorului electronic (redresorului) de mașină (aerogenerator).



Fig. 17. Variațiile puterii turbinei eoliene și ale puterii electrice active și reactive ale microaerogeneratorului, controlat prin strategie MPPT.

Bibliografia lucrărilor științifice publicate în 2015

[1] M. Chirca, S. Breban, C.A. Oprea, M.M. Radulescu, Comparative design analysis of ferrite-permanent-magnet micro-wind turbine generators, *Proc. 2015 International ACEMP – OPTIM – ELECTROMOTION Joint Conference*, 2-4 September 2015, Side, Turkey, 6 pp. (*included in IEEE Xplore database*).

[2] M. Ruba, M.M. Radulescu, Analysis of a grid-connected wind energy conversion system based on complex simulation program, *Proc. 10th IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies – EVER 2015*, 29 March – 2 April 2015, Monte-Carlo, Monaco, 6 pp. (*included in IEEE Xplore database*).

[3] Andreea Adriana Laczko (Zaharia), V. Zaharia, M.M. Radulescu, S. Brisset, Modeling and simulation of a brushless DC permanent-magnet generator-based wind energy conversion system, *Proc. 10th IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies – EVER 2015*, 29 March – 2 April 2015, Monte-Carlo, Monaco, 7 pp. (*included in IEEE Xplore database*).