

PROGRAM PNIII – BRIDGE GRANT

COD PROIECT: PN-III-P2-2.1-BG-2016-0164

NR. CONTRACT FINANȚARE: 68BG/2016

TITLUL PROIECTULUI: *Sistem electrotermic bazat pe conversia energiilor solară și eoliană*

DURATA PROIECTULUI: 01.10.2016 – 31.03.2018 (18 LUNI)

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC (RST)

ETAPA DE EXECUȚIE NR. I/2016

TITLU ETAPĂ: *Proiectarea modele experimentale GEET și FVT*

CUPRINS

1. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI.....	3
2. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE.....	3
3. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE.....	3
4. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ	3
5. REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL ETAPEI CURENTE	9
6. CONCLUZII.....	9
7. BIBLIOGRAFIE	10

1. OBIECTIVELE GENERALE ALE PROIECTULUI

Proiectul WINDSOL are ca obiectiv general dezvoltarea unui model experimental de laborator a unui sistem inovativ care asigură conversia simultană a energiilor eoliană și solară în electricitate și în căldură. Elementele de bază care asigură conversia energetică sunt reprezentate de către un Generator Eolian Electro-Termic (GEET), respectiv de către un sistem Foto-Voltaic-Termic (FVT) echipat cu elemente de concentrare a radiației solare.

2. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE

Obiectivele principale ale *Etapei I de execuție* a proiectului WINDSOL sunt următoarele:

- proiectarea modelului experimental al GEET,
- proiectarea modelului experimental al sistemului FVT.

3. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE

Conform planului de realizare propus *Etapa I de execuție* a proiectului WINDSOL include două activități specifice și vizează în principal proiectarea soluțiilor tehnice ale modelelor experimentale ale GEET și ale FVT. Din considerente de confidențialitate rezultatele prezentate nu acoperă anumite elemente care pot face obiectul unor depuneri de cereri de brevete de invenție la OSIM prevăzute (conform planului de realizare) în cadrul următoarei etapei de implementare a proiectului.

Activitatea I.1. Proiectarea modelului experimental al GEET. Această activitate efectuată în cadrul proiectului a presupus parcurgerea etapelor următoare:

- Analiză de soluții constructive (generatoare cu magneți permanenți cu flux axial, respectiv radial),
- Elaborare de modele numerice 2D/3D de tip element finit pentru analiză/proiectare,
- Calcul și simulări numerice, respectiv definire soluție tehnică.

Activitatea I.2. Proiectarea modelului experimental al FVT. Această activitate a avut la bază următoarele etape de cercetare:

- Analiză de soluții constructive,
- Calcul de proiectare, respectiv definire soluție tehnică.

4. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ

4.1. Prezentare generală a soluției studiate în cadrul proiectului

Spre deosebire de soluțiile clasice de conversie a *energiei eoliene și solare* în electricitate [1], sistemul *Hibrid Eolian-Foto-Voltaic-Termic (HEFVT)* propus în cadrul proiectului WINDSOL permite conversia acestor energii simultan în electricitate și în căldură, prin cogenerare. Componentele principale ce asigură conversia energetică în cadrul sistemului HEFVT sunt reprezentate de către un *Generator Eolian Electro-Termic (GEET)*, respectiv de către un sistem *Foto-Voltaic-Termic (FVT)*.

GEET propus este echipat cu magneți permanenți și poate fi construit în varianta *cu flux magnetic radial* sau în varianta *cu flux magnetic axial*, acesta fiind capabil să producă simultan electricitate și căldură prin cogenerare. În comparație cu generatoarele electrice clasice folosite în sistemele eoliene, GEET permite o construcție ultra-compactă și un randament energetic superior.

În ceea ce privește panourile FV clasice (soluțiile comerciale) este cunoscut faptul că randamentul acestora este modest, de regulă sub 20%, acesta fiind influențat negativ de creșterea temperaturii. Întrucât cea mai mare parte a radiației solare incidente la nivelul unui panou FV se transformă în căldură, recuperarea și transformarea sa în energie utilă ar permite creșterea randamentului global al sistemului, prin producere simultană de electricitate și căldură. Performanțele unui asemenea sistem de tip *Foto-Voltaic-Termic (FVT)* pot fi îmbunătățite și mai mult prin adăugarea unor oglinzi, dimensionate și orientate adecvat, capabile să concentreze radiația solară pe panoul FVT, puterea utilă totală produsă devenind net superioară panourilor FV clasice.

4.2. Proiectarea GEET. Comparație cu un Generator Electric (GE) clasic

Pentru a evidenția avantajele GEET propus în cadrul proiectului s-a efectuat o analiză comparativă între această soluție și un GE clasic de tip sincron cu magneți permanenți, în varianta *cu flux magnetic radial*, respectiv *cu flux magnetic axial*. Investigația efectuată a avut la bază calcule analitice, respectiv numerice de tip element finit în aproximare 2D și 3D utilizând pachetul de programe FLUX® [2].

4.2.1. Comparație între GEET și GE cu flux magnetic radial. Generatorul cu flux magnetic radial studiat în cadrul proiectului este un Generator Sincron cu Magneți Permanenți (GSMP) cu rotor interior și stator toroidal, fără creștături. Câmpul de excitație al mașinii este produs de magneții permanenți magnetizați alternativ în direcție radială, Fig. 1.

S-au analizat mai multe configurații statorice fără creștături (miez magnetic de formă toroidală), cu dispunerea înfășurării în întrefier sau în tobă, în Fig. 1 fiind prezentat doar unul din exemplele studiate.

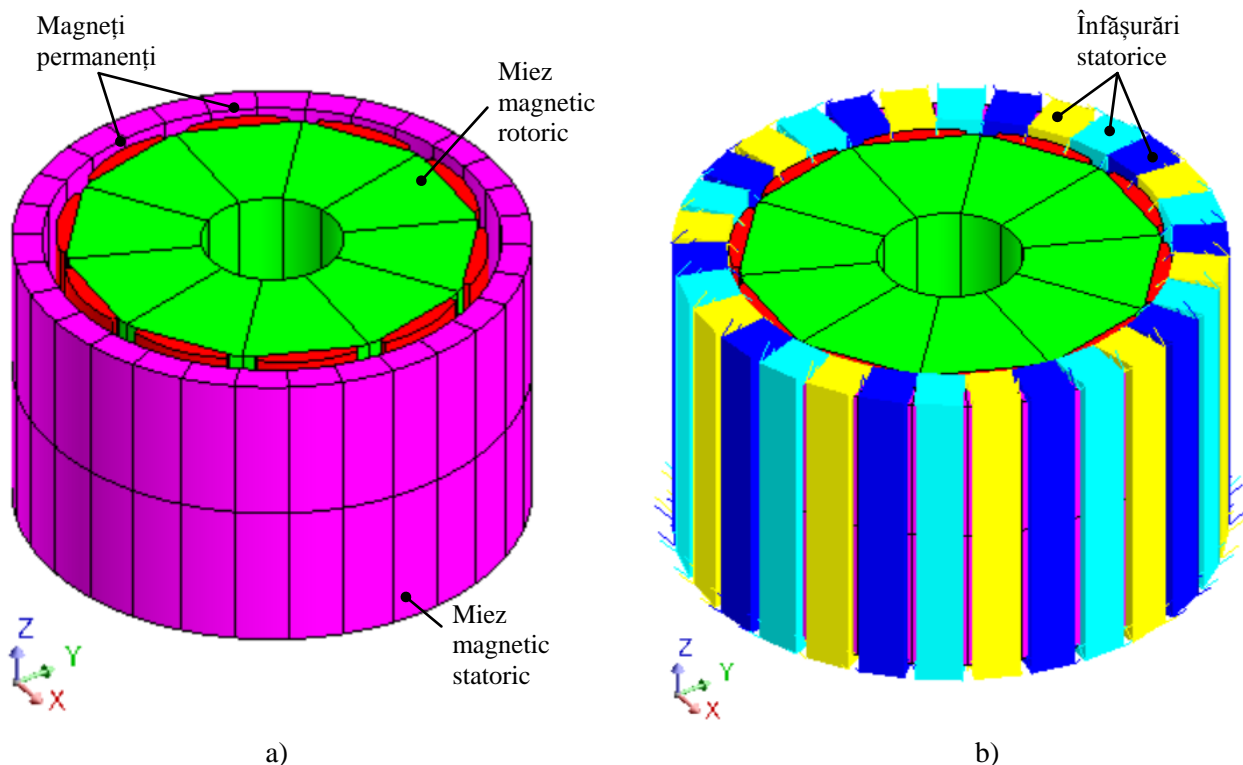
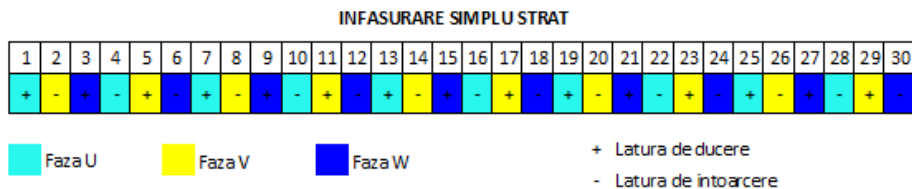


Fig. 1. Vedere 3D a unui GE cu flux radial cu înfășurare în tobă; a) miez statoric fără evidențierea înfășurărilor; b) miez statoric cu evidențierea înfășurărilor.

GE cu flux radial analizat are puterea nominală $S_n = 2,2 \text{ kVA}$, conexiune Y, turația nominală $n_n = 180 \text{ rpm}$, numărul de perechi de poli $2p = 10$. Datele principale de natură geometrică, electrică și magnetică ale mașinii sunt prezentate în Tabelul 1 iar schema înfășurării trifazate statorice, de tip simplu strat, este prezentată în Fig. 2. Înfășurarea adoptată are $2p = 10$ și $Z_2 = 30$ și este caracterizată de un factor de înfășurare unitar ($k_w = 1$) și un conținut foarte redus de armonici ale tensiunii magnetice. Această soluție a fost determinată pe baza unor calcule bazate pe pachetul de programe Koil [3].

Tabelul 1. Date principale ale GSMP cu flux radial

Dimensiuni miezuri magnetice		Caracteristici magneți		Caracteristici bobine	
Diametru exterior stator [mm]	300	Înălțime magnet în regiunea centrală [mm]	10,7	Nr. spire pe bobină	31
Diametru interior stator [mm]	275	Lățime magnet [mm]	60	Nr. bobine	10 x 3 (faze)
Lungime axială [mm]	150	Număr magneți perm. magnetizați axial alternat	10	Tip înfășurare	Simplu strat



+ Latura de ducere

- Latura de întoarcere

Fig. 2. Schema de înfășurări adoptată pentru GSMP.

Ținând cont de structura câmpului electromagnetic și de lungimea axială relativ importantă a mașinii, dimensionarea și analiza numerică a acesteia se abordează prin aproximare 2D plan-paralelă.

Analiza numerică de tip element finit 2D efectuată presupune rezolvarea unor probleme de calcul de câmp electromagnetic de regim tranzitoriu, ecuația diferențială cu derivate parțiale caracteristică exprimată în potențial vector \mathbf{A} fiind descrisă mai jos [4]:

$$\text{rot} \left[\left(\frac{1}{\mu} \right) \text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{H}_c \right] = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1)$$

unde μ reprezintă permeabilitatea magnetică, \mathbf{H}_c reprezintă intensitatea câmpului magnetic coercitiv al magneților permanenți și σ este conductivitatea electrică a regiunilor de tip conductor masiv. În cazul de față magneții permanenți sunt de tip NdFeB având

$\mu_{\text{rmp}} = 1,0446$ și $B_r = 1.1$ T, oțelul de uz general considerat are conductivitatea electrică $\sigma = 6,25 \cdot 10^6$ S/m și inducția magnetică la saturație $B_s = 1,9$ T și permeabilitatea magnetică relativă $\mu_r = 500$. Tolele sunt de tip M600-50A.

Pentru calculul câmpului magnetic rezultat la funcționarea în sarcină, este necesară cuplarea modelului de câmp cu un model de circuit, Fig. 3.

Calculule complexe de calcul de câmp electromagnetic au permis dimensionarea mașinilor și estimarea performanțelor acestora. În Fig. 4 se prezintă domeniul de calcul de câmp și harta inducției magnetice, respectiv spectrul liniilor de câmp magnetic pentru o anumită configurație studiată de GE.

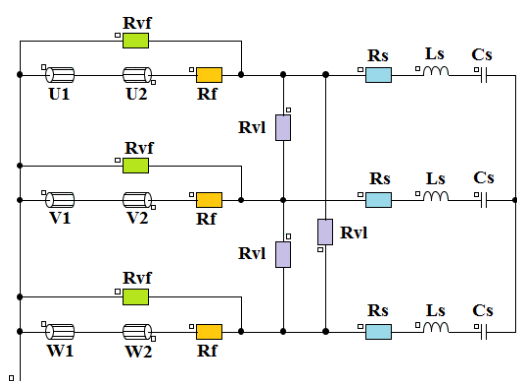


Fig. 3. Modelul de circuit asociat modelului de câmp al GSMP.

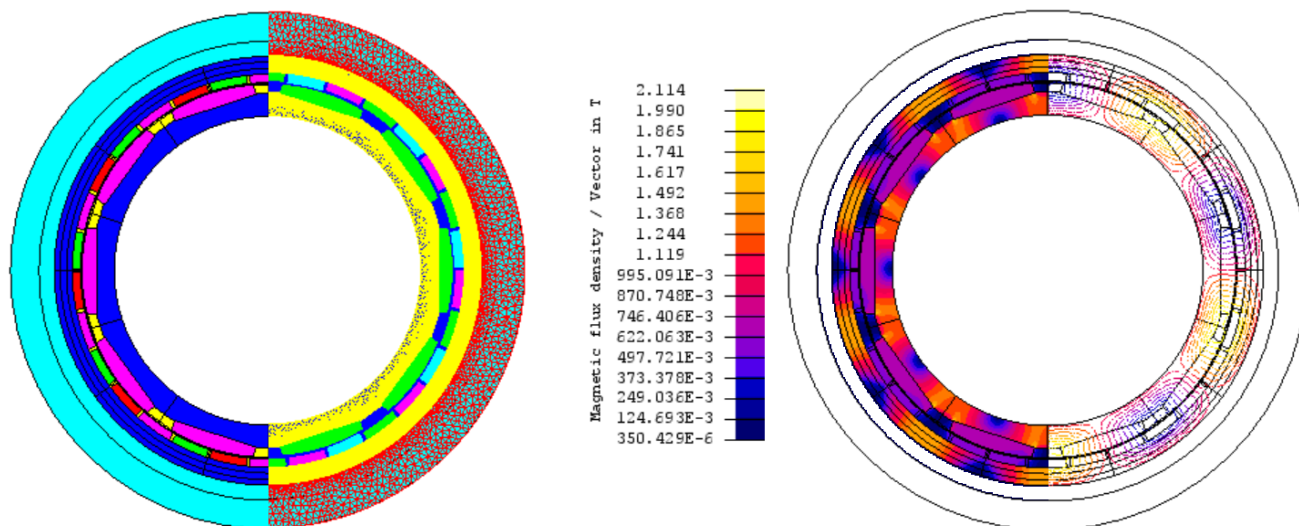


Fig. 4. Domeniul de calcul 2D al GE, harta inducției magnetice și liniile de câmp.

În Fig. 5 se prezintă formele de undă ale tensiunilor la bornele statorice la mers în gol, respectiv cuplul electromagnetic pentru GE și pentru GEET. Se observă că formele de undă ale t.e.m. de linie sunt aproximativ identice pentru cele două mașini, însă riplurile cuplului electromagnetic sunt mult mai reduse (neglijabile) în cazul GEET față de GE.

În Fig. 6 se prezintă caracteristicile externe ale GE și GEET, respectiv caracteristicile puterilor funcție de curentul de sarcină (P_{el} – putere electrică, P_{th} – putere termică, P_{total} - putere totală, $P_{total} = P_{el} + P_{th}$). Prin analiza rezultatelor se observă alura mai descrescătoare a caracteristicii externe a GEET în raport cu cea a GE.

Trebuie menționat faptul că volumul părții active a GEET pentru o putere totală aproximativ egală cu cea a GE este mai mic cu circa 28 %.

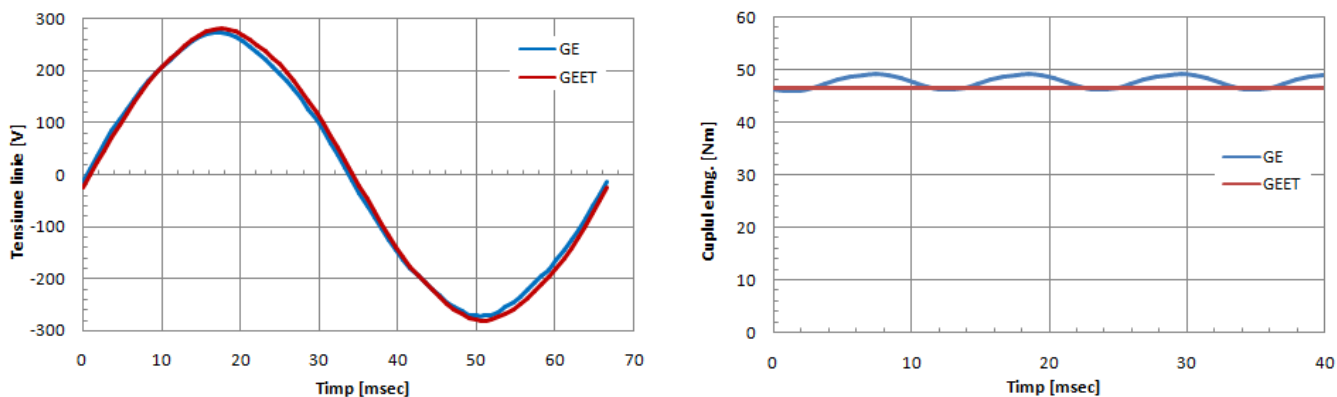


Fig. 5. Formele de undă ale t.e.m. de linie la mers în gol și cuplul electromagnetic al GE și GEET.

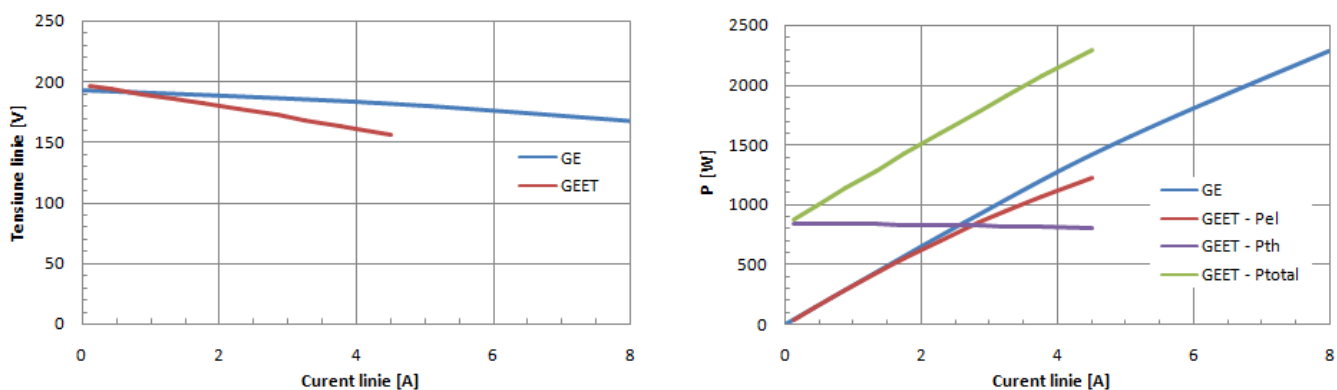


Fig. 6. Caracteristica externă a GE și GEET și curba puterilor funcție de nivelul de încărcare.

4.2.2. Comparație între GEET și GE cu flux magnetic axial. Mașinile electrice cu flux magnetic axial prezintă anumite avantaje specifice în raport cu alte soluții existente precum: construcție modulară, densitate mare de cuplu pe unitatea de volum, răcire bună etc. [5]-[6].

Generatorul cu flux magnetic axial studiat în cadrul proiectului este un Generator Sincron cu Magneți Permanenți (GSMP) cu două rotoare exterioare și un stator interior toroidal, fără crestături. Câmpul de excitație al mașinii este produs de magneții permanenți rotorici magnetizați alternativ în direcție axială, Fig. 7.

GE cu flux axial analizat are puterea nominală $S_n = 2,2$ kVA, conexiune Y, turația nominală $n_n = 180$ rpm, numărul de perechi de poli $2p = 10$. Datele principale de natură geometrică, electrică și magnetică ale mașinii sunt prezentate în Tabelul 2.

Tabelul 2. Date principale ale GSMP cu flux axial

Dimensiuni miezuri magnetice		Caracteristici magneți		Caracteristici bobine	
Diametru exterior stator [mm]	400	Înălțime magnet [mm]	8	Nr. bobine (3 faze)	3 x 10 = 30 bob.
Diametru interior stator [mm]	240	Număr magneți	10	Nr. spire pe bobină	78
Înălțime miez stator [mm]	40	Direcție magnetizare	Axial alternată	Tip înfășurare	Simple strat

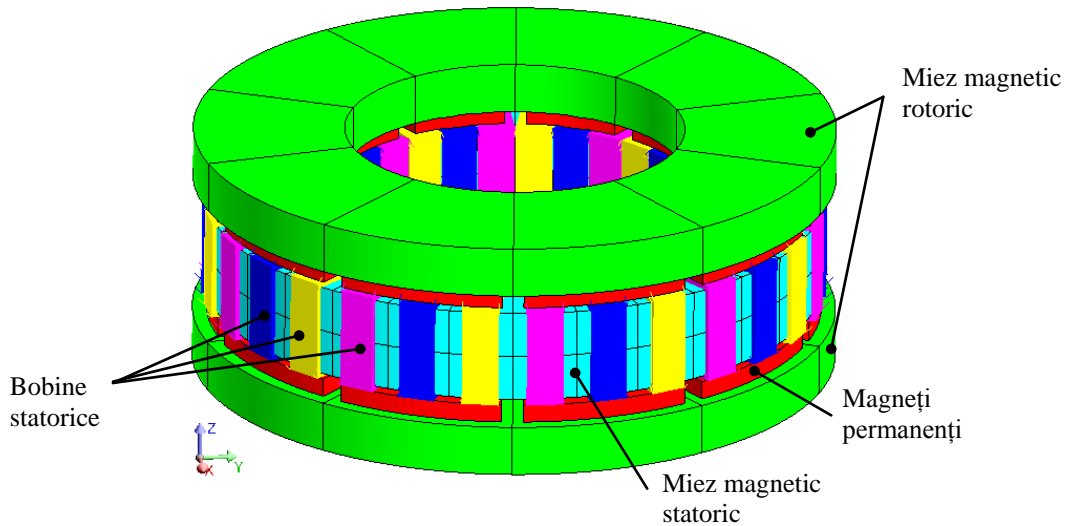


Fig. 7. Vedere 3D a GE cu flux axial.

Cercetările efectuate au avut la bază calcule analitice și simulări numerice de tip element finit 3D. Modelul de calcul de câmp a fost cuplat cu un model de circuit similar cu cel din Fig. 3.

În urma simulărilor numerice s-au obținut rezultate numerice atât la funcționarea în gol cât și la funcționarea în sarcină a GE. Domeniul de calcul 3D și rețeaua de discretizare utilizată în analiza numerică sunt indicate în Fig. 8 a) iar în Fig. 8 b) este prezentată distribuția inducției magnetice în miezurile magnetice și în magneții permanenți la mers în gol.

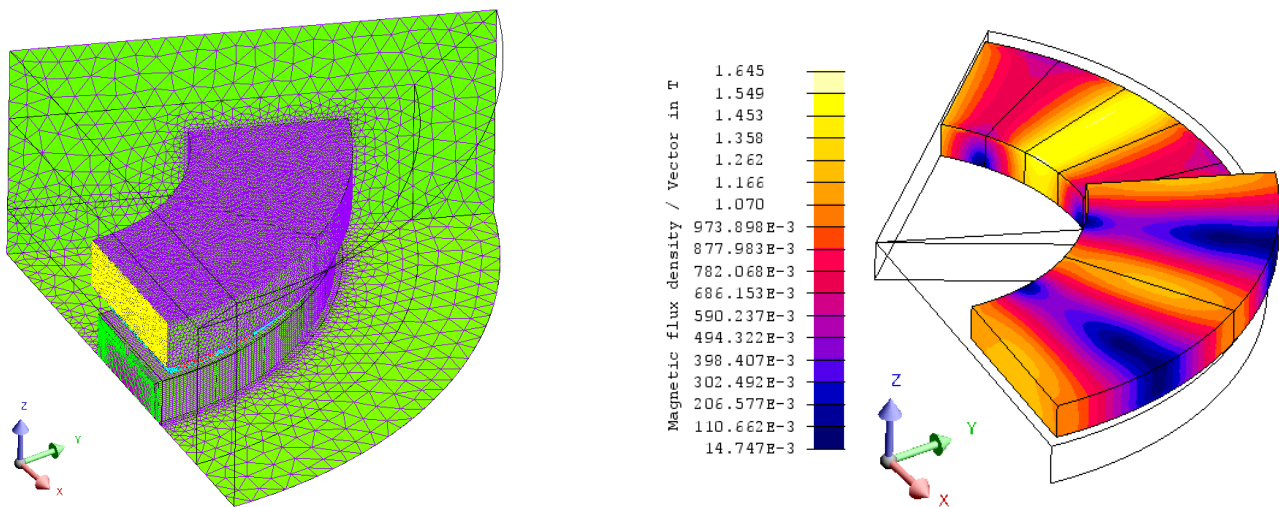


Fig. 8. Domeniul de calcul 3D, rețeaua de discretizare și harta inducției magnetice în regiunile magnetice ale GE la funcționare în gol.

În Fig. 9 se prezintă variația în timp a t.e.m. de linie la mers în gol, respectiv variația cuplului electromagnetic la funcționare în sarcină atât pentru GE, cât și pentru GEET. Se observă că t.e.m. este mai apropiată de o undă sinusoidală în cazul GEET față de cazul GE. Riplurile cuplului electromagnetic sunt mult mai reduse în cazul GEET față de GE.

În Fig. 10 se prezintă caracteristica externă și curba puterilor (P_{el} – putere electrică, P_{th} – putere termică, $P_{total} = P_{el} + P_{th}$) funcție de curentul de sarcină al GE, respectiv GEET. Se observă că panta de scădere a tensiunii la borne funcție de curentul de sarcină este aproximativ egală în cazul celor două mașini. Se remarcă de asemenea că atât puterile electrice cât și cea termică prezintă o variație aproximativ liniară.

Trebuie menționat faptul că pentru aproximativ aceeași putere totală utilă GEET are un volum cu circa 37% mai redus decât GE.

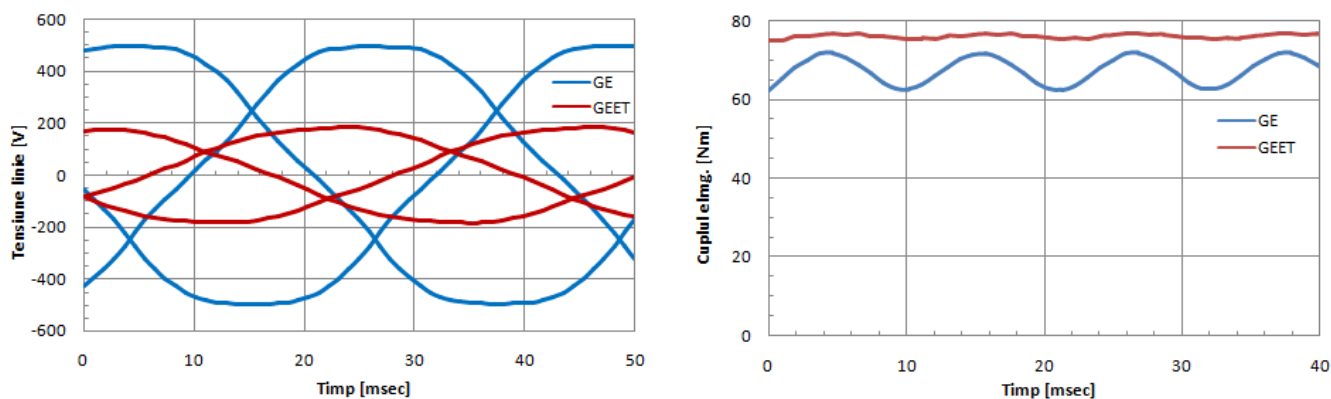


Fig. 9. Variația în timp a tensiunilor de linie la mers în gol și a cuplului electromagnetic al GE și GEET în sarcină.

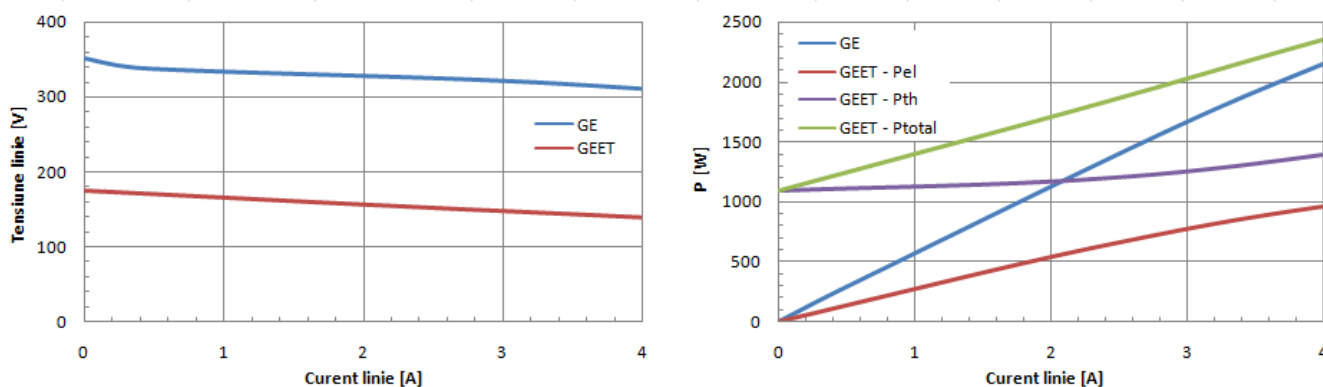


Fig. 10. Caracteristica externă și caracteristicile puterilor funcție de curentul de linie în sarcină rezistivă.

Pe baza analizelor și calculelor efectuate, s-a decis ca modelul experimental al GEET ce urmează a realizat în cadrul proiectului să fie de tip cu flux magnetic radial și rotor interior, cu înfășurări dispuse în întrefier. Detaliile privind construcția modelului experimental vor fi stabilite în următoarea etapă de realizare a proiectului pe baza unor analize suplimentare ce vor ține cont de multiple aspecte precum fiabilitate, tehnologie de realizare, constrângeri referitoare la materialele utilizate, etc.

4.3. Proiectarea sistemului FVT. Comparație cu un sistem FV clasic

Elementul principal al sistemului FVT propus este reprezentat de panoul FV echipat cu sistem de stabilizare și de colectare a energiei termice [7], [8], respectiv cu elemente de concentrare a radiației solare. Prin adăugarea acestor elemente se poate obține un sistem de conversie a energiei solare în energie electrică și termică cu randament mult superior panourilor FV clasice. Energia termică obținută prin răcirea panoului FV poate fi recuperată și folosită în scop industrial sau rezidențial. Astfel se estimează că sistemul FVT propus va produce o energie totală (termică și electrică) de cel puțin 3 ori mai mare decât un sistem FV clasic.

Pentru definirea unghiului de înclinare al panoului, respectiv pentru dimensionarea și poziționarea elementelor de concentrare a radiației solare s-au luat în considerare date medii multianuale privind poziția și radiația solară oferite de NASA [9].

Pe baza calculelor efectuate utilizând reprezentarea schematică din Fig. 11, s-au determinat mai mulți parametri, respectiv relații de calcul privind poziția panoului FV, unghiul optim de înclinare a oglinzilor, respectiv raporturile geometrice optime dintre lățimea oglinzilor și cea a panoului FV, Fig. 12.

În urma analizelor efectuate, se observă în graficul din Fig. 12 că soluțiile caracterizate de lățimi minime ale oglinzilor în raport cu lățimea panoului FV presupun anumite unghiri preferențiale de înclinare a oglinzilor dintre care se poate alege varianta finală ce urmează a fi implementată experimental.

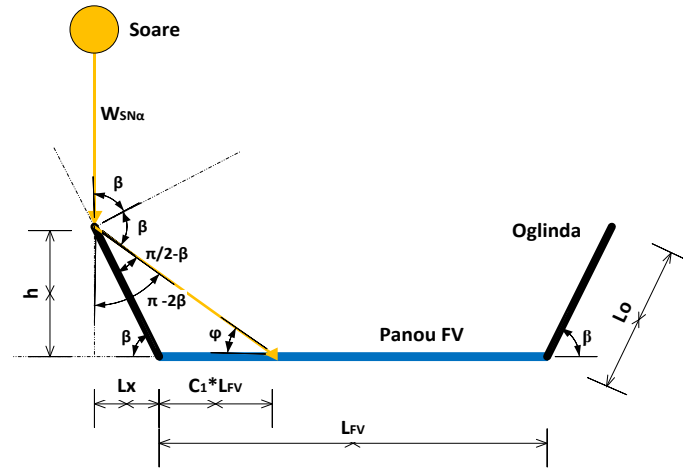


Fig. 11. Panou FV cu elemente de concentrare plane (oglinzi).

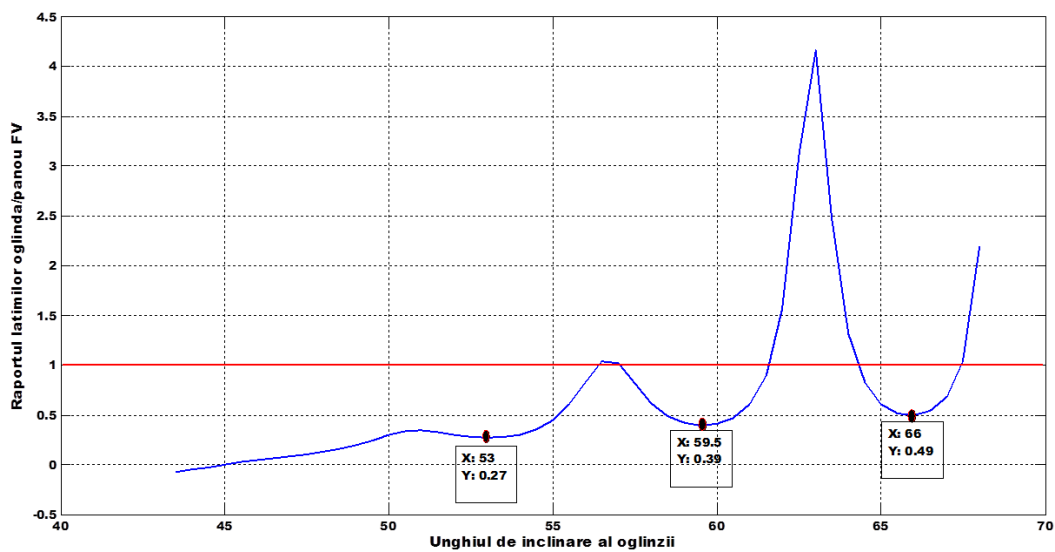


Fig. 12. Raportul dintre lățimea oglinzii și a panoului FV în funcție de unghiul de înclinare a oglinzii.

Rezultatele obținute în cadrul acestei etape reprezintă baza de plecare pentru construirea modelului experimental al sistemului FVT, activitate prevăzută în următoarea etapă de realizare a proiectului WINDSOL. Pentru realizarea practică se va ține cont și de alte aspecte și constrângeri specifice legate de fiabilitate, tehnologie de fabricație, geometria panourilor FV, elemente tehnico-economice, etc.

5. REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL ETAPEI CURENTE

Obiectivele propuse în planul de realizare a proiectului pentru etapa curentă au fost atinse integral. În urma cercetărilor întreprinse s-au definit și proiectat soluțiile tehnice de principiu ale GEET, respectiv ale sistemului FVT. Elementele tehnice de detaliu vor fi definitivate în următoarea etapă de implementare a proiectului întrucât aceste informații trebuie să țină cont și de alte criterii și constrângeri precum cele de natură tehnologică, de fiabilitate, de natură tehnico-economică, etc.

6. CONCLUZII

În cadrul *Etapei de execuție Nr. 1/2016* a proiectului WINDSOL (*Contract Nr. 68BG/2016*) au fost prevăzute două activități tehnico-științifice toate fiind realizate integral. Activitățile de cercetare efectuate în cadrul etapei curente au vizat în principal proiectarea soluțiilor tehnice ale modelelor experimentale ale GEET și ale FVT.

Activitatea I.1 a avut ca obiectiv *proiectarea modelului experimental al GEET*. S-au analizat mai multe soluții constructive de GEET atât cu flux magnetic radial, cât și cu flux axial, respectiv s-a efectuat o comparație cu GE clasice și s-au estimat performanțele specifice prin calcule analitice și modele numerice de tip element finit 2D și 3D. Analizele efectuate au evidențiat faptul că soluția propusă de GEET permite o construcție mai compactă în raport cu GE clasice, volumul părții active a GEET fiind mai redus cu cel puțin 28 %. S-au identificat mai multe soluții fezabile de GEET, cea mai atractivă fiind reprezentată de construcția cu flux magnetic radial și rotor interior.

Activitatea I.2 a urmărit *proiectarea modelului experimental al FVT*. În cadrul acestei activități s-au efectuat analize numerice și s-au identificat relațiile de calcul în vederea determinării poziției panoului FV, unghiul optim de înclinare a oglinzilor, respectiv raporturile geometrice optime dintre lățimea oglinzilor și cea a panoului FV.

Întrucât o parte din rezultatele de cercetare obținute în cadrul acestei etape conțin elemente inovative care încă nu sunt protejate din punct de vedere al proprietății intelectuale, acest raport tehnic nu face dezvăluiri detaliate a acestor elemente sensibile. Elaborarea documentației pentru depunerea cererilor de brevet reprezintă o activitate prevăzută în următoarea etapă de implementare a proiectului WINDSOL.

7. BIBLIOGRAFIE

- [1] T. Tudorache; D. Kisck; B. Rădulescu; M. Popescu: *Design and implementation of an autonomous Wind/PV/Diesel/Battery power system*, Proc. of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012), pp. 987 - 992.
- [2] CEDRAT: "User guide Flux® 12 Volume 3", 2015.
- [3] Luigi Alberti: "Koil, a tool to design the winding of rotating electric machinery", Version 1.1.0, October 2012: <http://koil.sourceforge.net>.
- [4] Tudorache T. and Melcescu L.: *PMSGs Solutions for Gearless Wind Conversion Systems with Battery Storage*, Proceedings of ICREPQ 2013, paper no. 479, Spain.
- [5] F. Marignetti, R. Di Stefano, Y. Coia: *Analysis of Axial Flux PM Machines Including Stator and Rotor Core Losses*, Proc. of the 34th IEEE Annual Conference of Industrial Electronics, IECON 2008, pp. 2035 - 2040, 2008.
- [6] Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani: *A Survey on Axial Flux Induction Motors*, Przegląd Elektrotechniczny, pp. 300-305, R. 88, No. 2, 2012.
- [7] Rohan S. Kulkarni, Sudarshan L. Chavan, Dhananjay B. Talange: *A green house electricity and heat generation: Solar PV/thermal panel-review*, Proc. of International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC 2015), pp. 680 - 682.
- [8] Shirish S. Konjare, R. B. Chadge, R. L. Shrivastava, Vinod Kumar: *Efficiency Improvement of PV module by way of Effective Cooling – A Review*, Proc. of International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC 2015), pp. 1008 - 1011.
- [9] <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

Data: 05.12.2016