

AUTOMATIZAREA ACȚIONĂRII ELECTRICE A UNEI INSTALAȚII DE STOCARE A ENERGIEI ÎN AER COMPRIMAT

Claudia BORZEA¹, Adrian SĂVESCU¹, Cristinel HĂRĂGUȚĂ¹, Alexandru GĂZDAC¹,
Răzvan NEDELICU²

¹INCDT COMOTI (Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare Turbomotoare COMOTI)

²S.C. TURBONED S.R.L.

claudia.borzea@comoti.ro

Abstract. Lucrarea prezintă sistemul de automatizare și control al unei instalații de stocare a aerului comprimat pentru generare de energie electrică. Modelul demonstrativ dezvoltat constă dintr-un compresor cu șurub, acționat de un motor asincron trifazat de 110 kW, care pompează aer comprimat într-un vas de stocare; aerul este ulterior eliberat în conducta de aspirație a unui expander cu șurub, al cărui arbore învârtă un generator asincron trifazat de 132 kW legat la rețeaua electrică. Când consumul energetic este redus, iar prețul este scăzut, energia va fi stocată sub formă de aer comprimat. În perioadele de necesitate energetică ridicată, aerul va fi eliberat din rezervor, acționând sistemul expander-generator, care va injecta energie electrică în rețea. Pentru această aplicație, mașinile asincrone oferă avantaje incontestabile în fața altor mașini electrice. Instalația ROCAES, controlată de sistemul automat de comandă, control și achiziție de date, contribuie la obținerea unei surse de energie electrică de rezervă, cu disponibilitate mare și timp de intervenție scurt.

1. INTRODUCERE

Stocarea energiei electrice se referă la un proces de conversie a energiei electrice de la o rețea, într-o altă formă care poate fi stocată, și ulterior reconvertită atunci când este necesar [1]. Instalațiile CAES (Compressed Air Energy Storage), de stocare a energiei sub formă de aer comprimat [2-6], reprezintă o tehnică de conservare a energiei electrice pentru a face față cerințelor de consum în perioadele de vârf. Aceste instalații (Figura 1) sunt gândite ca soluție de rezervă pentru sursele de energie regenerabilă, cum ar fi turbinele eoliene și parcurile fotovoltaice. Limitările majore ale acestora sunt densitatea de putere mică și intermitența, depinzând în mare măsură de situl local și de condițiile de vreme imprevizibile.

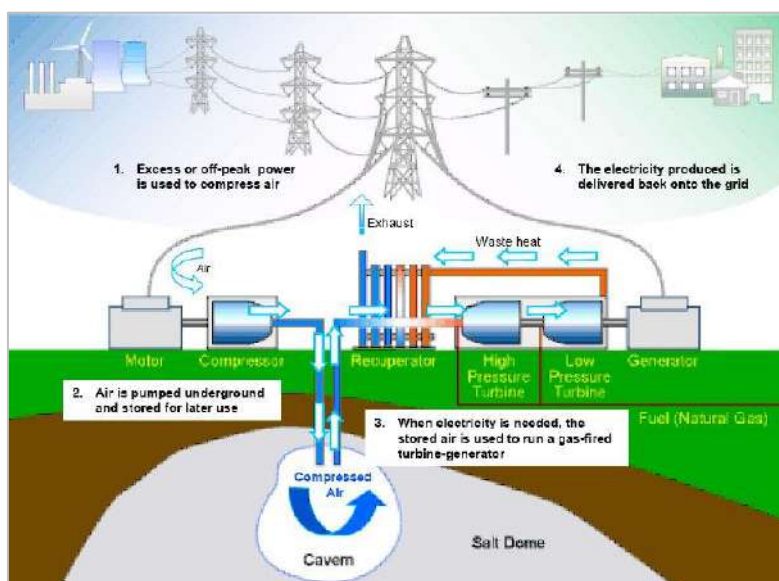


Fig. 1. Schematizarea unei instalații CAES cu stocare în mediu subteran [7]

Instalațiile de mare capacitate cu stocare subterană pot utiliza caverne de sare, rezervoare de petrol sau gaze naturale epuizate, acvifere sau mine de rocă dură abandonate [7]. Echipamentele CAES utilizează compresoare pentru comprimarea aerului într-un rezervor de stocare, ulterior aerul comprimat fiind destins într-un expander (turbină centrifugală/cu șurub) ce antrenează un generator electric care debitează în rețea.

Într-o centrală energetică tip CAES, comprimarea are de obicei loc în perioadele de cerere de electricitate redusă și deci preț redus. Instalațiile de scară mare au o eficiență foarte redusă, fiind viabile comercial numai în regiunile în care prețul energiei electrice variază în mod dramatic. Ciclurile de comprimare și detentă a aerului introduc pierderi prin efecte termice, rezultând o eficiență limitată [8, 9], care poate fi însă îmbunătățită prin introducerea unor sisteme de stocare termică [5, 6]. Construcția acestor instalații este limitată și de topografia terenului, având cerințe speciale în ce privește structura geologică [10].

Lucrarea de față prezintă realizarea unei stații pilot de dimensiuni relativ mici, cu stocare în rezervoare. Instalația ROCAES este prima de acest tip din România, fiind o precursoră în tehnologia de stocare a energiei în aer comprimat.

2. SOLUȚIA CONSTRUCTIVĂ ROCAES

Soluția constructivă a instalației ROCAES (Figura 2) face uz de un compresor cu șurub de 100 kW, antrenat de un motor asincron trifazat de putere mecanică (la arbore) 110 kW, și un expander cu șurub de 132 kW care antrenează arborele unui generator asincron trifazat de putere mecanică 132 kW. Atât motorul cât și generatorul electric sunt legate la rețeaua electrică de frecvență 50 Hz și tensiune 400V, motorul absorbind energie, iar generatorul debitând putere electrică în rețea.

Tehnologia de stocare a energiei în sistem CAES prezentată în această lucrare utilizează un compresor și un expander cu șurub, cu injecție de ulei. Datorită simplității constructive, a fiabilității și a randamentelor bune dezvoltate, aceste echipamente constituie o soluție viabilă pentru aplicația considerată. Pentru obținerea unor randamente mai ridicate se poate considera pe viitor folosirea compresoarelor centrifugale sau cu piston [5, 8].

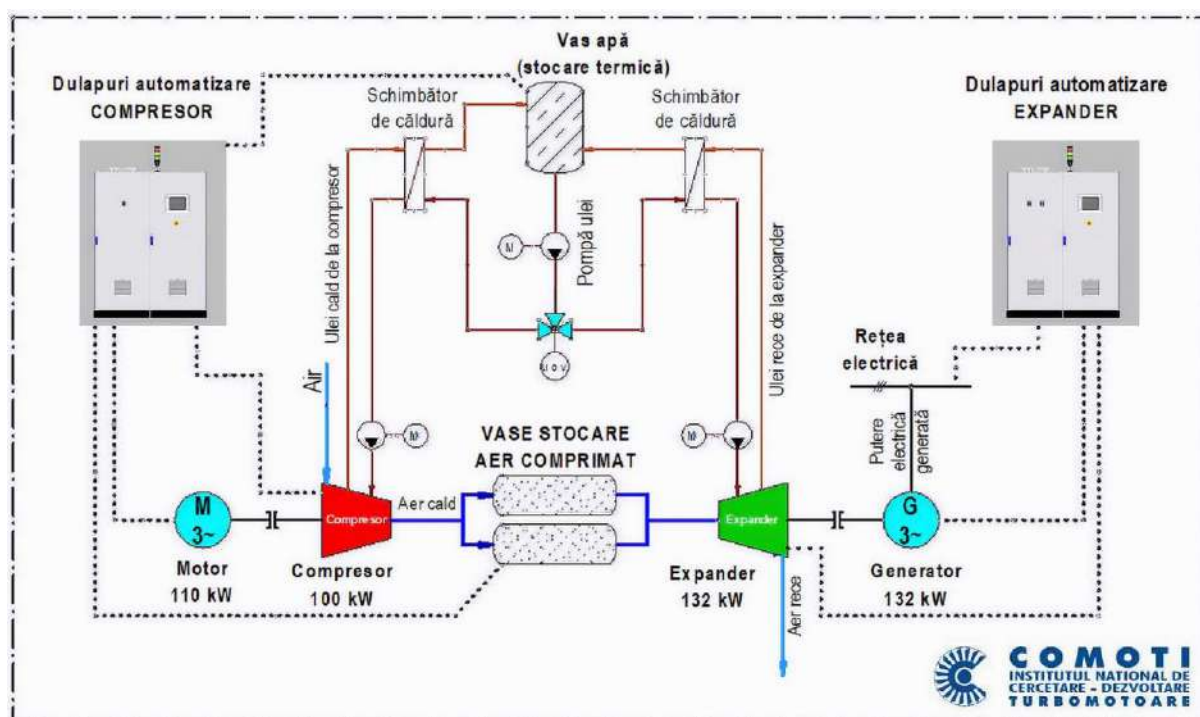


Fig. 2. Schema bloc a instalației ROCAES

Expanderul și compresorul nu funcționează simultan. Datorită acestui fapt, controlul se realizează cu ajutorul a două PLC-uri (automate programabile), unul pentru expander și unul pentru compresor și celelalte elemente ale stației, cum sunt rezervorul de aer comprimat și vasul de stocare a apei pentru condiționarea termică a uleiului (răcire pentru compresor și încălzire pentru expander). Datorită faptului că detenta aerului prin expander conduce la scăderea temperaturii mult sub limita de îngheț, trebuie asigurată o încălzire corespunzătoare a uleiului de ungere la intrare, care va încălzi aerul răcit în interiorul rotoarelor. Puterea obținută la arbore depinde și de asigurarea temperaturii optime.

Când compresorul pompează, se acumulează aer cald în rezervoarele de stocare a aerului comprimat. Uleiul de ungere și răcire care iese din vasul separator al compresorului trece prin sistemul de stocare termică și încălzește agentul termic ce transferă căldură către circuitul de ulei al expanderului. Atât timp cât compresorul pompează, este posibil ca pe lângă stocarea energiei termice să se recircule uleiul din circuitul de ulei al expanderului, obținându-se o condiționare termică (încălzire a uleiului) și o pregătire a echipamentului de detentă a aerului înainte de folosire.

În Figura 3 este prezentat echipamentul de comprimare, format din toate elementele amplasate pe batiu (motor, compresor, vas separator ulei, ventilator răcire compresor, vane și motoarele aferente pentru MOV-uri (*Motor Operated Valve*), traductoare, precum și cutiile de joncțiuni. În partea din spate sunt situate dulapurile electronice de monitorizare și control.



Fig. 3. Instalația de comprimare cu automatizare

Regimurile de funcționare ale expanderului trebuie legate de întreaga instalație ROCAES. Generatorul antrenat de expander va produce energie numai în cazul în care compresorul nu este activ, adică nu pompează aer în rezervoare. Altfel se eludează scopul instalației ROCAES de a produce energie electrică în momentele în care este un deficit de energie disponibilă în rețea (soluție de rezervă pentru centrale eoliene, pentru sisteme fotovoltaice, suplimentări de putere pentru susținerea unor sarcini mari pe termene scurte etc.). În Figura 4 este prezentat echipamentul de detentă cu cele două dulapuri aferente.



Fig. 4. Echipamentul de detentă cu dulapurile SCADA

O lungă durată de timp nu funcționează nici compresorul nici expanderul. Funcționarea instalației este legată de perioadele optime de funcționare: atunci când există un surplus de energie electrică funcționează compresorul, iar când este lipsă de energie funcționează expanderul. Pe perioada de așteptare este de preferat ca rezervoarele de aer comprimat să fie pline, așteptându-se eliberarea aerului prin expander. Dacă vana acționată cu motor electric de dinaintea aspirației este deschisă, se apreciază un timp de maximum 20s până la începerea producerii energiei electrice.

Intrarea în regim de generare se realizează prin deschiderea vanei de reglaj la un anumit unghi, ținând seama de presiunea de stocare instantanee. După setarea inițială pe un anumit palier, se poate începe reglarea fină a puterii injectate la valorile dorite, ținând seama de parametrii limitativi (presiune aspirație, presiune refulare, temperatură aer, temperatură ulei spre refulare expander, putere electrică injectată etc.).

3. ACȚIONAREA ELECTRICĂ ȘI SISTEMUL DE AUTOMATIZARE

2.1. Acționarea cu mașini asincrone trifazate

Acționarea electrică a compresorului se realizează cu un motor asincron trifazat, de putere 110 kW, de tip ASU 315S-4 (UMEB). Pentru acționarea electrică a expanderului a fost aleasă o mașină electrică asincronă trifazată, de putere mecanică 132 kW. Aceasta are rolul de generator electric antrenat de arborele expanderului, care la rândul său produce cuplu datorită aerului comprimat eliberat din rezervor. Puterea mecanică este astfel transformată în putere electrică, ce va fi debitată în rețea. Ambele mașini au construcția cu rotorul în colivie.

Mașina electrică a expanderului funcționează inițial în regim de motor asincron (lansat prin softstarter) până la turația de mers în gol ($\frac{dn}{dt} = 0$), urmând ca aceasta să fie antrenată de aerul comprimat eliberat, controlat, din unitatea de stocare. La depășirea turației de sincronism, mașina asincronă intră automat în regim de generator electric, care va debita o putere electrică de până la ~138 kVA. Alegerea mașinilor asincrone simplifică în mod considerabil cuplarea la rețea, pentru că nu au nevoie de manevre de sincronizare cu frecvența rețelei.

Motorul asincron trifazat primește energie electrică de la rețeaua de curent alternativ prin conectarea statorului la aceasta, energie pe care o convertește în energie mecanică furnizată la axul rotorului. Atunci când rotorul mașinii asincrone este antrenat mecanic peste turația de sincronism – în cazul acestui proiect de arborele expanderului învârtit de aerul comprimat eliberat din rezervor, rotorul va avea o turație mai mare, trăgând după el câmpul magnetic al statorului și devenind inductor. Astfel câmpul magnetic învârtitor inductor și rotorul nu pot fi niciodată în sincronism, iar mașina va intra în regim de generator (Figura 5).

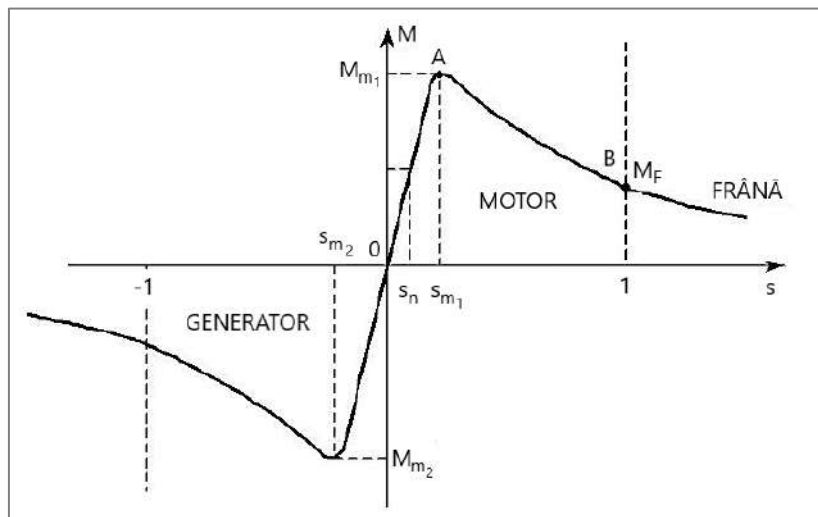


Fig. 5. Variația cuplului funcție de alunecare [11]

Mașina electrică ASU 315M-4 (UMEB) aleasă are o putere activă (la ax) de 132 kW. La o mașină electrică asincronă folosită pe post de generator apare în plus și o componentă reactivă a puterii (de magnetizare) relativ mare pe care mașina trebuie să o ia de la rețea. Mașina face un schimb permanent de putere reactivă rețeaua electrică. Pentru a nu încărca rețeaua, a fost prevăzută o baterie de condensatoare de 50 kVAr care asigură puterea reactivă necesară.

Puterea electrică debitată de generator crește odată cu creșterea puterii mașinii primare. Pentru aplicația considerată, mașinile asincrone oferă avantaje incontestabile:

- Simplitate constructivă și siguranță mare în exploatare;
- Performanțe tehnice ridicate (cuplu mare de pornire de până la $2xM_n$, capacitate de încărcare dinamică mare – cuplu nominal de până la $3xM_n$; randament ridicat – mașinile asincrone ASU 315S-2 și ASU 315M-2 au $\eta = 94,5\%$);
- Stabilitate în funcționare, exploatare, manevrare și întreținere simplă;
- Alimentare direct de la rețeaua trifazată de curent alternativ;
- Se pretează unei operări total automatizate: pornire – încărcare – funcționare pe rețea, fără a fi necesară intervenția operatorului uman.

Există și o serie de dezavantaje:

- În configurație curentă poate funcționa numai pe o rețea conectată la sistemul național, neputând funcționa pe o rețea izolată;
- Pentru funcționarea ca generator este necesară o putere reactivă, preluată de la rețea sau de la o sursă de energie reactivă (baterii de condensatoare, compensatoare sincrone), în timpul funcționării existând un schimb continuu, oscilant, între mașină și rețea. Acest schimb de putere reactivă încarcă rețeaua cu componenta reactivă a curentului, fiind necesară dimensionarea corespunzătoare a secțiunii conductoarelor rețelei și mărind energia disipată prin efect Joule în acestea;
- Șoc mare de curent la pornire.
- Randamentul mașinii asincrone este de regulă mai mic decât al mașinii sincrone.

Cu toate acestea, pentru instalația ROCAES, mașinile asincrone fac diferența prin faptul că trec automat în regim de generator, cuplându-se la rețeaua electrică fără manevre suplimentare, prin software-ul de monitorizare și control programat în PLC. Datorită faptului că nu este necesară varierea turației, mașinile sunt acționate prin softstartere, ce asigură cuplul de pornire ridicat, reducerea șocurilor și turație constantă în funcționare.

2.2. Sistemul de automatizare

Scopul sistemului SCADA, reprezentat de dulapurile de forță (control) și automatizare (monitorizare și achiziție de date), este de a monitoriza în permanență parametrii de funcționare ai proceselor electrice, mecanice și termice, asigurând reglarea și menținerea acestora în limitele stabilite, pentru a asigura operarea în condiții optime, în siguranță.

Incinta în care sunt amplasate dulapurile de automatizare este destinată protejării acestora împotriva evenimentelor meteorologice, precum și a asigurării mediului optim de funcționare a echipamentelor electrice și electronice componente.

Containerul (6000 mm x 2400 mm x 2700 mm) este prevăzut cu două uși de acces cu sticlă în partea superioară și grilă de aerisire în partea inferioară, și cu o fereastră 2000 mm x 1400 mm pentru supravegherea vizuală a instalației din camera de comandă (Figura 6). Pentru protecția împotriva electrocutărilor prin atingeri indirecte, toate elementele metalice ale aparatelor electrice care în mod normal nu sunt sub tensiune dar care pot ajunge accidental sub tensiune datorită unor defecte de izolație, vor fi legate la instalația de împământare.

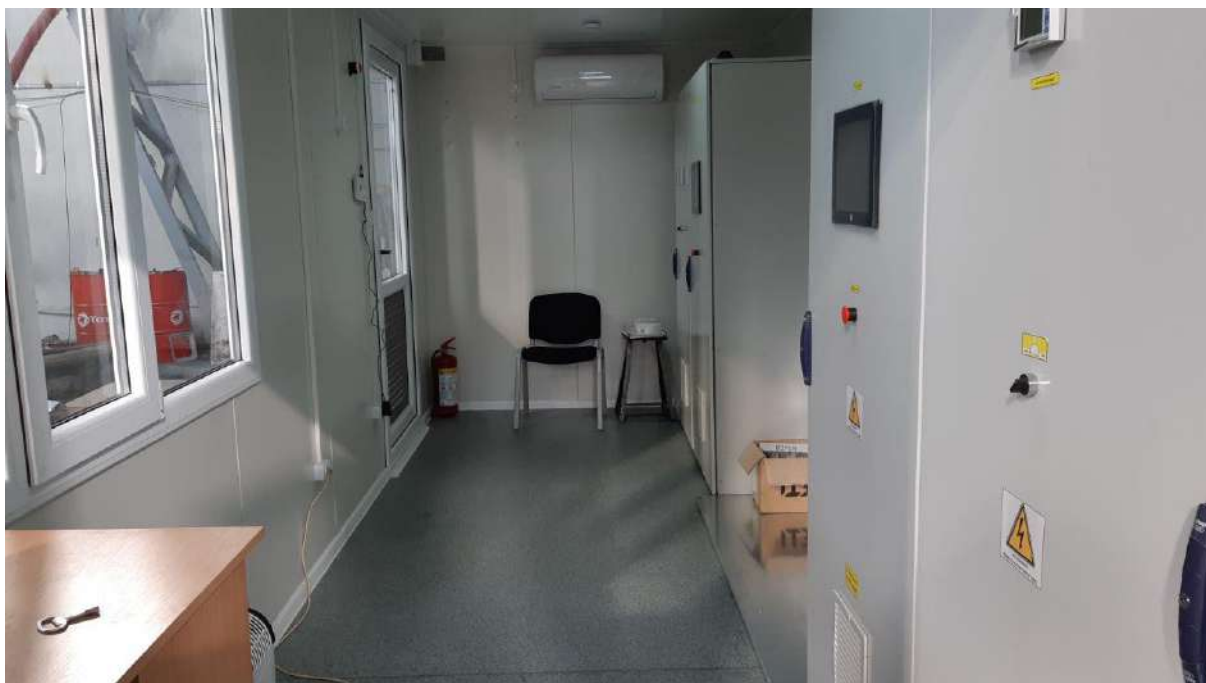


Fig. 6. Dulapurile SCADA amplasate în camera de comandă a stației ROCAES

Camera de comandă este prevăzută cu echipament de prevenire incendiu și două stingătoare de incendiu. Centrala de detecție fum este constituită din doi senzori de fum și dispozitiv semnalizare optică și acustică.

Instalația electrică interioară include:

- unitate aer condiționat 9000 BTU, cu alimentare monofazată la 230Vca;
- tablou siguranțe automate (protecție diferențială 30mA), monofazat 230Vca;
- prize PT Schuko, monofazate, 230Vca (4 buc.);
- întrerupător lămpi;
- iluminat interior: corpuri de iluminat cu tub neon 2 x 18W (2 buc.);

- lampă semnalizare de urgență, (2 buc.);
- covor cauciuc electroizolant 6000 mm x 1000 mm x 6 mm.

Pe cele două instalații, de comprimare și de detentă a aerului, sunt montate traductoare (de semnal analogic, 4..20mA, respectiv cu semnal de prag), care vor supraveghea parametrii vitali funcționării în siguranță atât a ansamblului expander cât și a ansamblului compresor. Din câmp, semnalele electrice sunt transmise prin cabluri și conductoare specifice la cutii de joncțiuni, de unde ajung la echipamentele corespunzătoare din dulapurile de automatizare și forță cabluri de semnalizare și comandă, cu mai multe conductoare. Aceste cabluri sunt caracteristice fiecărui tip de semnal (analogic, digital, semnal de forță).

Pentru indicarea locală a mărimilor, sunt montate termometre și manometre. Pentru mărimile importante ce trebuie transmise la PLC (temperaturi, presiuni aer/ulei, debit de aer, feedback unghi deschidere vane electropneumatice etc.), sunt montate termorezistențe PT100 și traductoare de presiune pentru aer și ulei, fiind de asemenea prevăzut un tronson de măsurare a debitului de aer. Debitul este calculat cu ajutorul relației (1) stabilite în programul PLC realizat în software-ul dedicat Proficy Machine Edition, pe baza valorilor presiunii diferențiale pe diafragma de măsurare (Δp), a valorii unei presiuni măsurate la o anumită distanță după ieșirea din diafragmă (p_{abs}), realizându-se o corecție pe baza unei temperaturi măsurate în imediata proximitate a diafragmei.

$$q_V = c \cdot \frac{\sqrt{p_{abs} \cdot \Delta p \text{ [N/m}^2\text{]}}}{T \text{ [K]}} \quad (1)$$

unde: q_V [m³/s] – debitul volumic; c – constanta debitului determinată de forma traductorului și secțiunea conductei (calculată de proiectantul părții mecanice); p_{abs} [N/m²] – presiunea absolută măsurată la o anumită distanță după ieșirea din diafragmă; $\Delta p = (p_1 - p_2)$ – presiunea diferențială (p_1, p_2 – presiunile la intrarea, respectiv ieșirea din diafragmă); T [K] – temperatura după ieșirea din tronsonul de măsurare a debitului.

Automatele programabile sau PLC-urile (Programmable Logic Controller) sunt aparate electronice care controlează regimurile de funcționare ale mașinilor și proceselor. PLC-ul recepționează semnale prin intermediul intrărilor sale, le prelucrează după un program și apoi transmite semnale la ieșirile sale. Rolul acestor aparate este de a transmite semnalul (tensiunea) de comandă la bornele unui element de execuție (releu, actuator) în funcție de comenzile din program. Prin software-ul implementat, se pot comanda programatic intrările și ieșirile, se pot măsura timpi și efectua operații de calcul.

PLC-ul are rolul de a monitoriza în mod continuu starea echipamentelor și de a lua decizii pe baza unui program personalizat. Procesele pot fi îmbunătățite considerabil cu acest tip de control. Totuși, cel mai important beneficiu în utilizarea unui PLC este posibilitatea de a modifica și replica funcționarea sau procesul în timp ce se desfășoară achiziția de date și comunicarea parametrilor și a informațiilor esențiale. Un alt avantaj constă în faptul că este modular, adică se pot configura și monta tipurile de dispozitive de Intrări și Ieșiri care se pretează cel mai bine aplicației.

PLC-urile GE Fanuc VersaMax (Figura 7b, partea de sus a dulapului din dreapta) interfațează cu operatorul printr-un ecran tactil (Figura 7a dulapul de automatizare din partea dreaptă) pe care sunt afișate ecranele cu parametrii procesului și informațiile necesare, și de la care se pot da comenzi și se pot seta valori de prag.



Fig. 7. Dulapurile de automatizare ale expanderului: a) cu ușile închise și b) echipamentele interioare

Pentru analiza parametrilor energiei electrice, au fost prevăzute analizoare de rețea cu afișaj digital, două la expander și unul la compresor. În cazul expanderului, se măsoară atât puterea electrică consumată/generată de mașina asincronă, cât și puterea absorbită/debitată în rețea. Analizorul de putere Carlo Gavazzi poate afișa informațiile din Figura 8 de mai jos.

Phase variables	System variables	Three-phase power factor
Instantaneous effective voltage $V_{IN} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (V_{INi})^2}$	Equivalent three-phase voltage $V_{\Sigma} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \cdot \sqrt{3}$	$\cos \varphi_{\Sigma} = \frac{W_{\Sigma}}{VA_{\Sigma}} \quad (\text{TPF})$
Instantaneous active power $W_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (V_{INi}) \cdot (A_i)$	Voltage asymmetry $ASY_{LL} = \frac{(V_{LLmax} - V_{LLmin})}{V_{LL \Sigma}}$	Energy metering $k \text{ var hi} = \int_{t_1}^{t_2} Qi(t) dt \cong \Delta t \sum_{n_1}^{n_2} Qnj$
Instantaneous power factor $\cos \varphi_1 = \frac{W_1}{VA_1}$	$ASY_{LN} = \frac{(V_{LNmax} - V_{LNmin})}{V_{LN \Sigma}}$	$kWhi = \int_{t_1}^{t_2} Pi(t) dt \cong \Delta t \sum_{n_1}^{n_2} Pnj$
Instantaneous effective current $A_i = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (A_i)^2}$	Three-phase reactive power $\text{var}_{\Sigma} = (\text{var}_1 + \text{var}_2 + \text{var}_3)$	Where: i= considered phase (L1, L2 or L3) P= active power; Q= reactive power; t ₁ , t ₂ =starting and ending time points of consumption recording; n= time unit Δt= time interval between two successive power consumptions; n ₁ , n ₂ = starting and ending discrete time points of consumption recording
Instantaneous apparent power $VA_1 = V_{IN} \cdot A_1$	Three-phase active power $W_{\Sigma} = W_1 + W_2 + W_3$	
Instantaneous reactive power $\text{var}_1 = \sqrt{(VA_1)^2 - (W_1)^2}$	Three-phase apparent power $VA_{\Sigma} = \sqrt{W_{\Sigma}^2 + \text{var}_{\Sigma}^2}$	
	Total harmonic distortion $THD_N = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N X_n ^2}}{ X_1 }$	

Fig. 8. Parametri ce pot fi afișați de analizorul de rețea [12]

Pentru a măsura parametrii electrici, datorită faptului că tensiunea și curentul electric au valori mari, au fost prevăzute transformatoare de curent pe fiecare fază, ce transformă curentul primar într-un curent secundar de 5A. Analizorul are integrată funcția de transformare a curentului de ieșire (de valoare 5A) în semnal unificat 4-20 mA care să poată fi achiziționat de PLC. Astfel, nu mai este necesară folosirea unui adaptor de curent suplimentar.

4. PROBE DE FUNCȚIONARE

Funcționarea sistemului expander-generator a fost testată conectând aspirația expanderului la un compresor de înaltă presiune (CHP – *Compressor of High Pressure*) de putere 250 kW, cu care se pot obține presiuni de până la 40 bar absolut (4 MPa). CHP-ul a asigurat o presiune de 12-14 bar, aerul furnizat la aspirația expanderului având o presiune de ~4 bar. Mașina electrică a expanderului a fost pornită ca motor prin softstarter și cu vana de aspirație deschisă. Pornirea instalației expanderului trebuie făcută numai cu aspirația deschisă către sursa de aer comprimat. Dacă nu este asigurată o presiune suficientă a aerului la aspirație, se poate crea vid în timpul detentei din expander, inducând vibrații mari (șocuri) în echipament atunci când vidul creat la refulare întâlnește presiunea atmosferică mai mare din exterior.

Un prim set de teste de funcționare au fost realizate fără a asigura încălzirea prealabilă a uleiului/aerului. Puterea debitată în rețea W_r este mai mică decât puterea generată W_g deoarece puterea generată trebuie să asigure și puterea necesară pentru motorul de 4 kW de acționare a pompei de ulei, precum și alimentarea consumatorilor electrici din dulapuri.

Prin creșterea debitului, a fost înregistrată o putere maximă generată de 49,7 kW, puterea debitată în rețea fiind de 48,4 kW, după cum se poate vedea pe graficul din Figura 9. Un vârf de 36,2 kW al puterii absorbite din rețea se înregistrează în momentul în care motorul atinge turația nominală. Un alt vârf de putere 36,3 kW consumată din rețea are loc la oprirea sistemului expander-generator datorită tăierii bruște a aerului pe aspirația expanderului. La instalația completă ROCAES, cu aerul comprimat eliberat din vasul de stocare, acest lucru nu se va întâmpla deoarece presiunea va scădea gradual pe măsură ce se golește rezervorul.

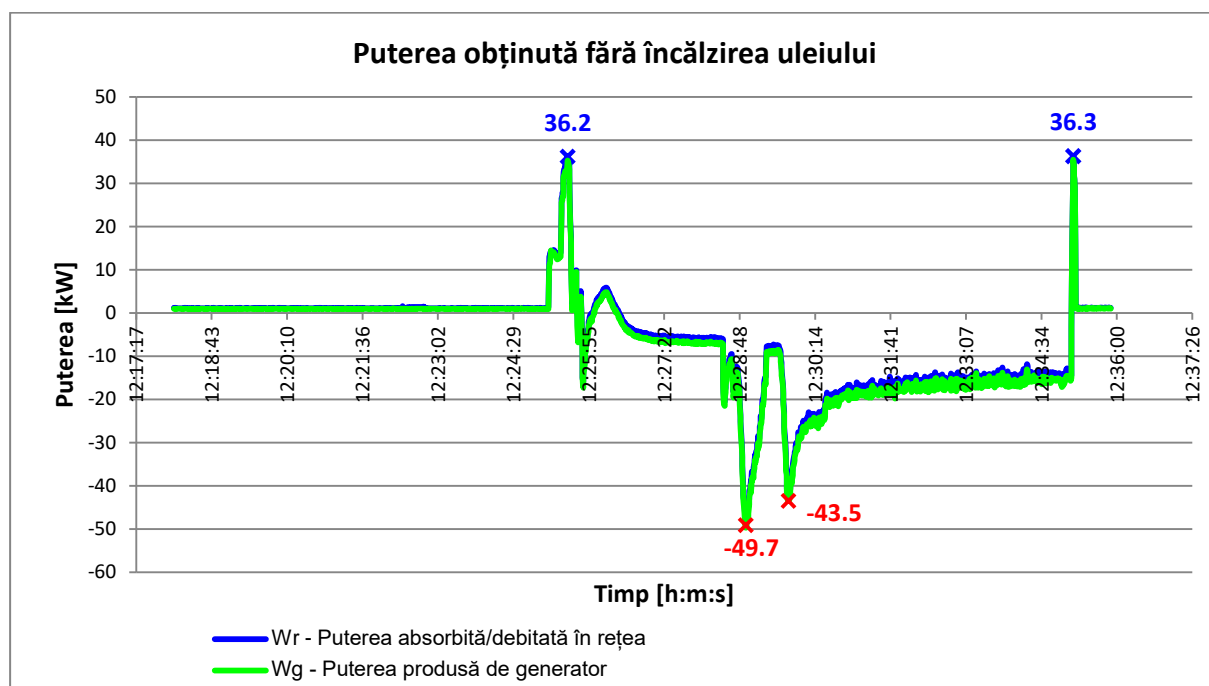


Fig. 9. Graficul puterilor înregistrate în timpul primelor probe de funcționare

Analizând graficul puterii (Figura 9) și graficul temperaturilor (Figura 10), se observă că în momentul atingerii puterii maxime, temperatura aerului la refulare scade dramatic, până în jurul valorii de -14°C . Sistemul expander-generator a funcționat circa 20 minute. În condiții de funcționare normală a instalației, trebuie asigurată încălzirea aerului și uleiului care intră în expander, întrucât puterea maximă generată este limitată de temperatură.

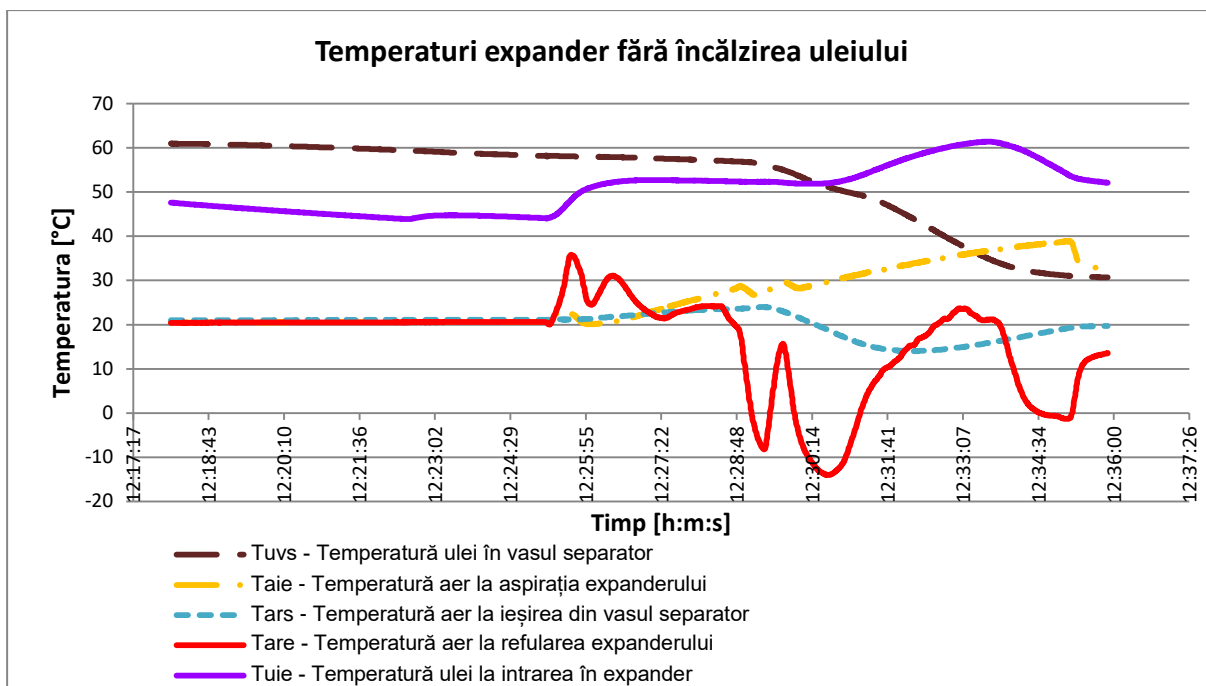


Fig. 10. Temperaturile înregistrate în timpul primelor probe de funcționare

Pentru cel de-al doilea set de teste, a fost încălzit uleiul de ungere al expanderului cu ajutorul unei rezistențe, performanțele obținute fiind îmbunătățite în mod considerabil. Pe graficul din Figura 11 se poate observa un vârf de putere generată de 66,1 kW, cu menținerea constantă la ~42 kW pe un anumit interval de timp.

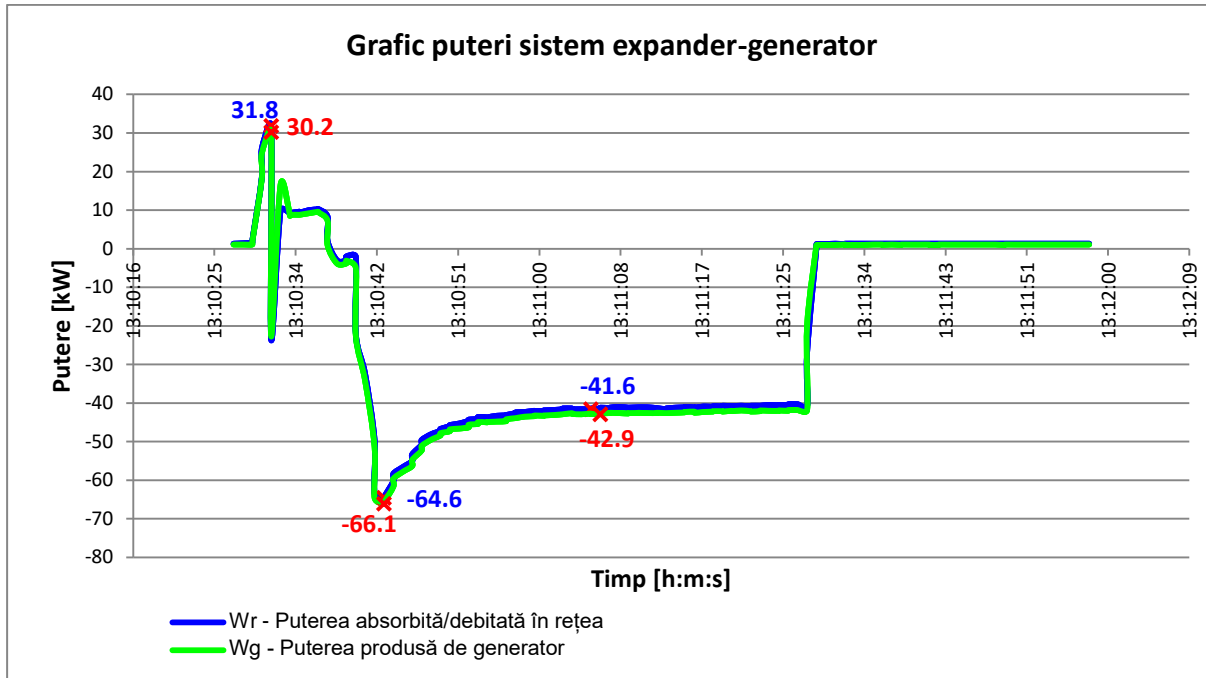


Fig. 11. Graficul puterilor înregistrate în timpul funcționării cu uleiul încălzit continuu

Probele pe stand s-au efectuat pe o durată de timp relativ mică. Pe graficul de mai sus, se observă că intrarea în regim de generator a mașinii electrice a expanderului s-a realizat în aproximativ 10s, iar stabilizarea după alte ~15s (~25s de la pornirea în regim de motor).

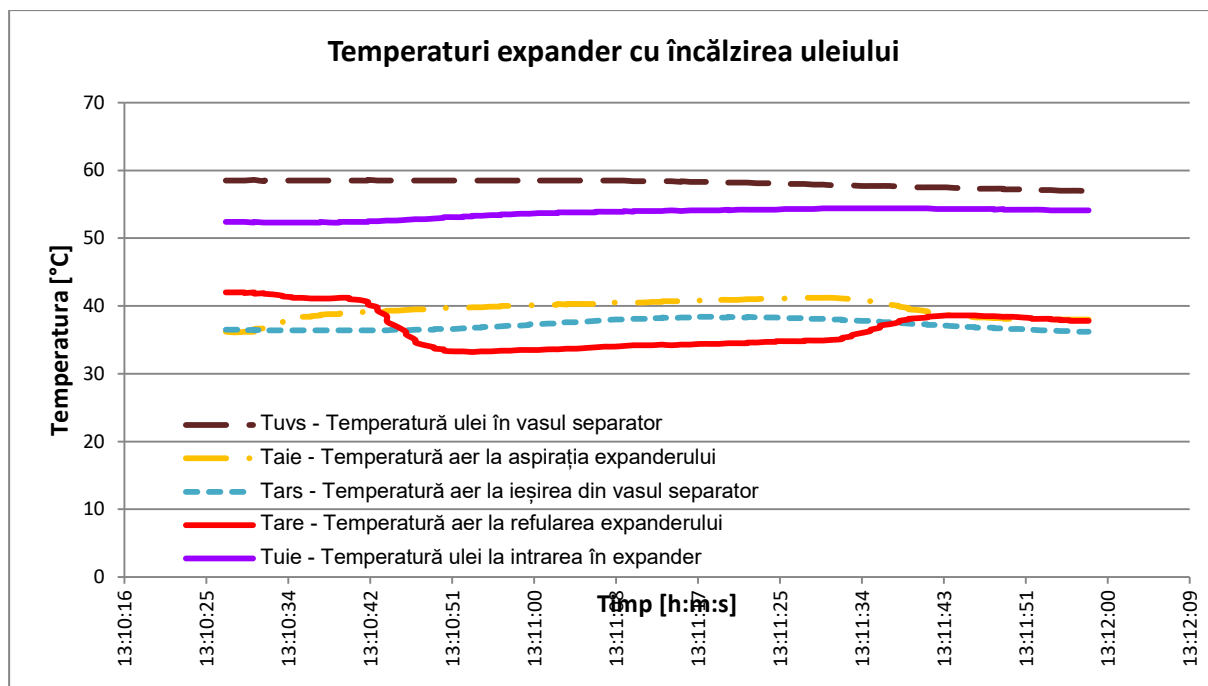


Fig. 12. Temperaturile înregistrate în timpul în timpul funcționării cu încălzire ulei

Corelând graficul puterilor (Figura 11) cu graficul al temperaturilor (Figura 12), se observă că menținerea puterii la o valoare mare și relativ constantă are loc datorită încălzirii uleiului cu menținerea unei valori a temperaturii acestuia la intrarea în expander în jur de 55°C. Acest lucru are o influență directă asupra aerului din expander, temperatura la aspirație fiind stabilă în jurul valorii de 40°C. Se observă că temperatura aerului la refulare nu mai descrește dramatic, ci se menține pe un anumit interval de timp la 32-35°C. Puterea maximă ce poate fi generată este limitată de temperaturile echipamentului de detentă. La temperaturi negative pe o durată mai mare de timp, scade calitatea uleiului, putându-se deteriora cele două rotoare ale expanderului cu șurub. De asemenea, se pot forma ace de gheață datorită umidității relative a aerului, existând riscul ca expanderul să se gripeze.

5. CONCLUZII

Instalația ROCAES, controlată de sistemul de reglare, comandă și control, contribuie la obținerea unei surse de energie electrică de rezervă, respectiv de vârf printr-un echipament robust cu timp de intervenție scurt, disponibilitate mare și putere adecvată. PLC-ul asigură funcționarea în siguranță și în bune condiții, controlează vanele cu comandă electronică, și monitorizează parametrii de lucru importanți (presiuni, temperaturi aer/ulei, feedback unghi deschidere vane electropneumatice etc.). La depășirea limitelor stabilite în lista de parametri, se emit avertizări sau alarme. Dacă unul din parametri ajunge la o valoare ce iese din domeniul prescris încât poate pune în pericol buna funcționare a instalației, are loc oprirea forțată, de urgență, prin comanda automată de la PLC.

În timpul probelor de funcționare s-a constatat buna operare echipamentelor de comprimare și de detentă a aerului, respectiv compresor și expander cu șurub cu acționare electrică cu mașini asincrone trifazate. Acest fapt se datorează în cea mare măsură bunei funcționări a părții electrice și de automatizare cu sistemul de comandă, reglare și control cu PLC, cu monitorizare permanentă a parametrilor importanți.

Până la momentul actual au fost efectuate probe de funcționare cu principalele echipamente componente ale instalației de stocare aer comprimat. Proiectul este în desfășurare, urmând să se finalizeze prin punerea în funcțiune a ansamblului complet ROCAES.

Cercetările ulterioare punerii în funcțiune vor urmări îmbunătățirea randamentului instalației prin minimizarea pierderilor. De asemenea, se are în vedere măsurarea și analizarea unui spectru de vibrații. Acest lucru are ca scop evitarea frecvențelor de rezonanță și găsirea unor puncte optime pentru amplasarea unor transductoare piezoelectrice pentru recoltarea energiei din vibrații, în vederea alimentării unor senzori wireless autonomi și creșterea eficienței energetice a acestora. Pentru acest lucru, în aceste puncte trebuie măsurată temperatura și frecvența exactă datorită faptului că frecvența fundamentală a transductoarelor piezoelectrice va trebui ajustată astfel încât să intre în rezonanță cu frecvența echipamentului (sursa de vibrații), pentru obținerea răspunsului electric de vârf.

Activitatea de cercetare prezentată în această lucrare este finanțată de Programul Operațional Competitivitate 2014-2020, Axa prioritară 1: Cercetare, dezvoltare tehnologică și inovare (CDI) în sprijinul competitivității economice și dezvoltării afacerilor, Contract POC 79 / 08.09.2016, desfășurat cu sprijinul Ministerului Fondurilor Europene și condus de dr. ing. Mircea Dan Ionescu. Transferul tehnologic este realizat de către INCDT COMOTI.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Haisheng Chen, Xinjing Zhang, Jinchao Liu, Chunqing Tan, "Compressed Air Energy Storage", *Energy Storage - Technologies and Applications*, 2013, DOI:10.5772/52221.
- [2]. Cong Guo, Yujie Xu, Xinjing Zhang, Huan Guo, Xuezhi Zhou, Chang Liu, Wei Qin, Wen Li, Binlin Dou, Haisheng Chen, "Performance Analysis of Compressed Air Energy Storage Systems Considering Dynamic Characteristics of Compressed Air Storage", *Energy* 135 (2017): pp. 876-888, DOI:10.1016/j.energy.2017.06.145.
- [3]. Laijun Chen, Tianwen Zheng, Shengwei Mei, Xiaodai Xue, Binhui Liu, Qiang Lu, "Review and Prospect of Compressed Air Energy Storage System", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 4, no. 4 (2016): 529-541, DOI:10.1007/s40565-016-0240-5.
- [4]. Claudia Borzea, Iulian Vlăducă, Dan Ionescu, Valentin Petrescu, Filip Niculescu, Cristian Nechifor, Gabriel Vătășelu, Mihai Hanek, "Compressed Air Energy Storage Installation for Renewable Energy Generation", *E3S Web of Conferences* 112 (2019): 02010, DOI:10.1051/e3sconf/201911202010.
- [5]. Ghady Dib, Philippe Haberschill, Romuald Rullière, Quentin Perroit, Simon Davies, Rémi Revellin, "Thermodynamic Simulation of a Micro Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for Building Application", *Applied Energy* 260 (2020): 114248, DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114248.
- [6]. Mohamad Cheayb, Sébastien Poncet, Mylène Marin-Gallego, Mohand Tazerout, "Parametric Optimisation of a Trigenenerative Small Scale Compressed Air Energy Storage System", *Proceedings* 23, no. 1 (2019): 5. DOI:10.3390/proceedings2019023005.
- [7]. "CAES Overview", APEX CAES, 2019, <http://www.apexcaes.com/caes> [Accesat 30.10.2019].
- [8]. Teng Ren, Weiqing Xu, Yidong Cai, Xiaoshuang Wang, Minghan Li, "Experiments on Air Compression with an Isothermal Piston for Energy Storage", *Energies* 12, no. 19 (2019): p. 3730, DOI:10.3390/en12193730.
- [9]. Mohsen Saadat, Anirudh Srivatsa, Perry Y. Li, Terrence Simon, "Air Compression Performance Improvement via Trajectory Optimization: Experimental Validation", *ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference*, 2016, DOI:10.1115/dscc2016-9825.
- [10]. Ningbo Wang, Chongqing Kang, Dongming Ren, *Large-Scale Wind Power Grid Integration - Technological and Regulatory Issues* (Elsevier, 2015), pp. 211-232.
- [11]. Claudia Martiș, "Mașini Electrice Curs 7: Mașina Asincronă (de Inducție)", Departamentul de Mașini și Acționări Electrice, Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 2013.
- [12]. Carlo Gavazzi, *Energy Management Smart Modular Power Analyzer Type WM30 96*, pdf, 2019, <https://www.gavazzionline.com/pdf/WM3096DSENG.pdf> [Accesat 07.11.2019]