

COMPARAREA PERFORMANTELOR ALGORITMILOR DE CĂUTARE A PUNCTULUI DE PUTERE MAXIMĂ A SISTEMELOR FOTOVOLTAICE

Ing. Cristian-Ioan HOARCĂ¹, Șef lucrări dr. ing. Marian-RADUCU²,
Ing. Simona-Maria RĂBOACĂ¹

¹ Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice
și Izotopice – ICIT, Rm. Vâlcea, România

² Universitatea din Pitești, România

REZUMAT. În această lucrare este propusă o comparație între trei algoritmi de căutare a punctului de putere maximă (MPP-Maximum Power Point) pentru un sistem fotovoltaic. Algoritmi utilizați sunt: schema de control avansat ES (aES-advanced Extremum Seeking), schema modificată ES (mES-modified Extremum Seeking), algoritmi care îmbunătățesc performanțele schemei clasice de control ES și algoritmul Perturbă și Observă (P&O). Performanțele îmbunătățite sunt: creșterea vitezei de căutare și acurateței, în procesul de urmărire a punctului de putere maximă. Diferite secvențe de iradiere sunt folosite pentru a testa performanțele celor trei algoritmi. Algoritmul aES este net superior în comparație cu ceilalți algoritmi în eficiență energetică.

Cuvinte cheie: panou fotovoltaic; urmărirea MPP (MPPT), controlul de căutare a extremului (Extremum seeking control); Algoritm Perturbă și Observă; surse hibride de putere;

ABSTRACT. In this paper a comparison between three Maximum Power Point (MPP) tracking algorithms for the photovoltaic (PV) system based on: advanced Extremum Seeking (aES), modified Extremum Seeking (mES) controls, that improves the performances of the classical ES control schemes and Perturb and Observe algorithm (P&O) is proposed. The performances improvements are: higher search speed and accuracy of the MPP tracking process. So, different irradiance sequences are used to test the performances of the three proposed algorithms. Advanced Extremum Seeking control outperforms all algorithms in power efficiency.

Keywords: photovoltaic panel; MPP tracking; extremum seeking control; Perturb and Observe algorithm (P&O); hybrid power source;

1. INTRODUCERE

Pentru a realiza transferul maxim de putere între un generator PV și receptor s-au conceput sisteme MPPT cu urmărirea punctului de putere maximă. Prin interconectarea unui convertor DC-DC între generatorul PV și receptor, se produce o adaptare continuă a sarcinii la generatorul PV [1]. Problema punctului de putere maximă stă în determinarea automată a tensiunii sau curentului de ieșire astfel încât puterea extrasă și puterea furnizată consumatorului să fie maximă [2].

Există mai multe tehnici utilizate în urmărirea punctului de putere maximă. Tehnicile MPPT sunt în mare clasificate în trei grupe [3]:

a) Tehnicile indirecte (off-line), care utilizează datele tehnice ale panourilor fotovoltaice pentru a estima MPP: metoda tensiunii de circuit deschis (OCV – Open circuit voltage method) sau metoda curentului de scurtcircuit (SCC – Short-circuit current method) [4];

b) Tehnicile directe (on-line), care utilizează parametrii mășurați (U, I) în timp real. Aceste metode nu necesită măsurarea temperaturii și intensității radiației solare: algoritmul Perturbă și Observă (P & O) sau algoritmul conductanței incrementale (IC – Incremental conductance algorithm);

c) Alte metode cuprind o combinație a acestor metode sau pe bază de calcule indirecte. Avantajul acestor metode constă în robustețea lor internă [5], viteza mare de căutare [6], dar acuratețea de urmărire este dependentă de modelul folosit pentru celula solară [7].

La metodele bazate pe un algoritm cunoscut pentru urmărirea MPP: algoritmul Perturbă&Observă (P&O) sau algoritmul conductanței incrementale (IC), sunt necesari doi senzori pentru măsurarea tensiunii și curentului [8]. La aceste metode directe bazate pe un algoritm cunoscut se pot produce oscilații în urmărirea MPP [9].

Problema vitezei de urmărire [10], oscilațiilor și robusteții pe vreme înorată poate fi rezolvată utilizând

metode bazate pe calcule numerice[11-12]: metoda rețelelor neuronale artificiale (ANN) și metoda bazată pe controler logic fuzzy (FLC) [14]. În cazul

algoritmului Perturbă&Observă cantitatea anuală de erori este aproximativ 6.6%, dar ea se poate reduce sub 2% utilizând metode bazate pe calcule numerice [15].

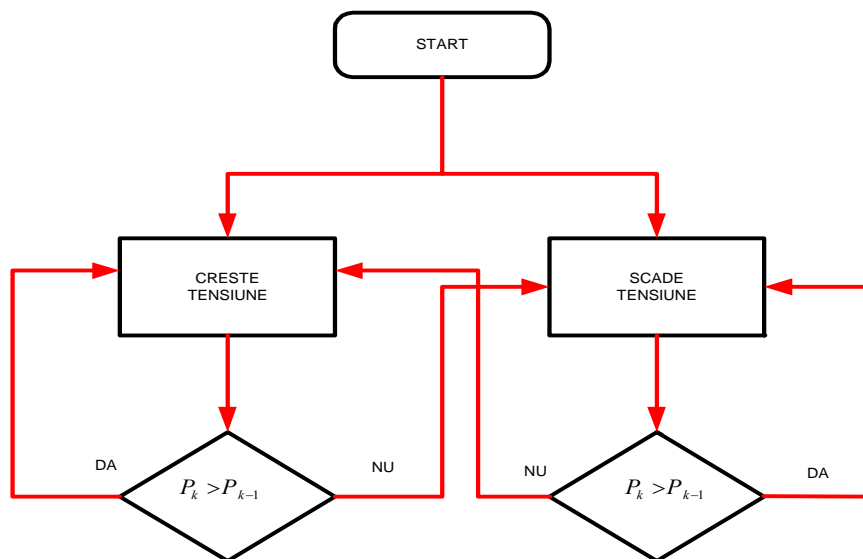


Fig. 1. Schema logică pentru algoritmul Perturbă&Observă.

Lucrarea este organizată în felul următor. Partea a doua prezintă schema logică și principiul de căutare utilizat pentru algoritmul Perturbă&Observă. Partea a treia prezintă schemele de control ES. După o scurtă prezentare a schemelor clasice ES, sunt prezentate și analizate schemele de control aES și mES. În partea a patra sunt prezentate performanțele pentru un modul PV la iradiere constantă și rezultatele simulării între aES, mES și algoritmul P&O la iradiere treaptă, profil de iradiere variabil, profil de iradiere pentru o zi. În ultima parte sunt prezentate concluziile.

2. ALGORITMUL PERTURBĂ ȘI OBSERVĂ (P&O)

Este unul din cei mai utilizați algoritmi de urmărire. În figura 1 se prezintă schema logică a algoritmului P&O. Determinarea punctului de putere maximă MPP se face prin încercări succesive modificând tensiunea la bornele generatorului și prin compararea puterii livrate la un moment dat cu puterea de la pasul anterior [14]. Procesul continuă până când:

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Algoritmul P&O poate conduce la oscilații în jurul MPP, iar în cazul variației rapide a intensității radiației solare urmărirea MPP se poate face chiar într-o direcție greșită [15].

3. TEHNICI DE CONTROL ES

Controlul ES este o metodă de optimizare în timp real utilizată pentru a crește viteza de căutare și precizia de urmărire, indicatori de performanță pentru găsirea MPP la panourile PV în diferite condiții de funcționare a acestora. Metodele de urmărire a MPP folosesc pași de iterație mici, fixi sau variabili în funcție de indicatorii de performanță. Pentru pași de iterație mici se obține o precizie mai mare în găsirea MPP, în schimb viteza de căutare este mai mică și invers [16]. Precizia de urmărire sau acuratețea schemelor de control ES atinge valoarea de 99.99% [17]. Precizia de urmărire (tracking accuracy) este definită ca $100 \cdot \frac{P_{PV}}{P_{MPP}}$, unde P_{MPP} este puterea maximă a panoului PV iar P_{PV} este puterea medie obținută din panoul PV, folosind un sistem de urmărire MPP [18].

Dacă un sistem fotovoltaic este conectat la rețea printr-un invertor, atunci fenomenul de comutație la aceste dispozitive de putere trebuie să genereze o tensiune de ieșire sinusoidală sau aproape sinusoidală care este sincronizată cu tensiunea de rețea și trebuie să aibă aceeași mărime pentru primele două armonici ($H1, H2$). În puterea de ieșire P_{PV} a unui sistem fotovoltaic apar două tipuri de unde: o undă de frecvență joasă (LF) cu armonici conținând multiplii de frecvența rețelei și o altă undă de înaltă frecvență (HF) cu armonici conținând multiplii de frecvenței de comutare [16].

Tehnicile MPPT se clasifică în linii mari în trei grupe:

a) Controlul clasic ES este numit și controlul ES de ordinul întâi (hoES) fiind bazat pe o schemă

COMPARAREA PERFORMANTELOR ALGORITMILOR

scalară, fără folosirea blocurilor de filtrare, bloc trece sus (HPF) și trece jos (LPF) [18]. În figura 2 este prezentată schema controlului ES de ordinul întâi.

b) Schema modificată ES (mES) utilizează filtrul trece bandă (BPF = HPF+LPF) în loc de o

conexiune serie HPF și LPF folosite de controlul ES de ordinul întâi (hoES) [19]. În Figura nr.3 este prezentată schema de control modificată ES (mES

c) Schema de control avansat ES (aES), prezintă în plus față de (mES) amplificarea amplitudinii semnalului sinusoidal cu magnitudinea H1.

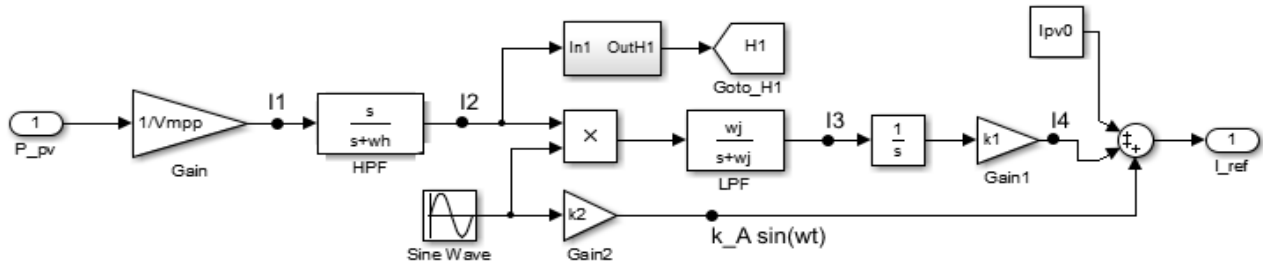


Fig. 2. Schema controlului ES de ordinul întâi (hoES)(13).

3.1. Schema de control modificată ES (MES)

Controlul ES este o tehnică care folosește un semnal sinusoidal de mică amplitudine în calitate de oscilator de forma $k_A \sin(\omega t)$, k_A fiind amplitudinea de oscilație ($k_A = A/k_2$), A este amplitudinea semnalului sinusoidal, k_2 – constanta de amplificare a semnalului sinusoidal, ω – frecvența unghiulară și t timpul. Amplitudinea de oscilație este constantă în cazul schemei de control mES, $k_2 = Ak_2$. Dacă ω este ales corespunzător pentru dinamica procesului, atunci estimarea gradientului bazată pe schema de control cu amplitudine constantă asigură oscilații susținute în vecinătatea MPP [16]. Ambele scheme de control mES cât și hoES asigură aceleași etape de prelucrare a semnalului și pot fi considerate ca echivalente în cazul în care aceleași frecvențe de tăiere sunt stabilite pentru filtre. Dacă frecvența de tăiere pentru LPF, ω_1 , este aleasă mai mare decât (de obicei $\omega_1 = \alpha_1 \omega$, $3 < \alpha_1 < 6$) în schema pentru hoES (unde $\omega_1 = \alpha_1 \omega$, $0 < \alpha_1 < 1$), atunci durata oscilației este îmbunătățită în bucla de control a schemei mES, deoarece sunt prelucrate primele cinci armonici ale puterii PV rezultând o viteză de căutare mai mare [19].

Dacă ambii parametrii de control ES: câștigul în buclă închisă (k_1) și amplitudinea de oscilație (k_A)

sunt aleși în funcție de sistemul PV se obține o viteză mare de urmărire și o precizie de urmărire bună a MPP. Exceptând controlul aES, la celălalte două tehnici ES (mES și hoES) trebuie realizat un compromis între indicatorii de performanță, deoarece amplitudinea de oscilație controlează viteza de urmărire și acuratețea [16,20].

Parametrii folosiți în schema mESC: frecvența de tăiere a filtrului LPF ($f_b = 5,5 f_d = 550$ Hz), pasul ($A = \Delta I = 0,1$ A, $f_d = 1/T_s = 100$ Hz, $I_{ref}(0) = 0,1$ A), câștigul în buclă ($k_1 = 4f_d = 400$ Hz), amplitudinea semnalului sinusoidal ($k_2 = 0,1$), frecvența de tăiere a filtrului BPF ($f_a = 0,1f_d = 10$ Hz).

3.2. Schema de control avansat ES (AES)

În Figura nr. 4 se prezintă schema aES bazată pe filtrul trece bandă (BPF). În principiu toate schemele de control ES (hoES, mES și aES) au aceleași ecuații de funcționare [18]:

$$P_{PV} = P_{PV}(I_{PV}), \quad i_1 = I_{PV}/V_{MPP} \quad (1)$$

$$i_{HPF} = -\omega_1 i_{HPF} + \omega_1 i_1, \quad i_2 = i_1 - i_{HPF}$$

$$i_{BPF} = -\omega_1 i_{BPF} + \omega_1 i_2, \quad i_3 = i_{BPF} A \sin(\omega t) \quad (2)$$

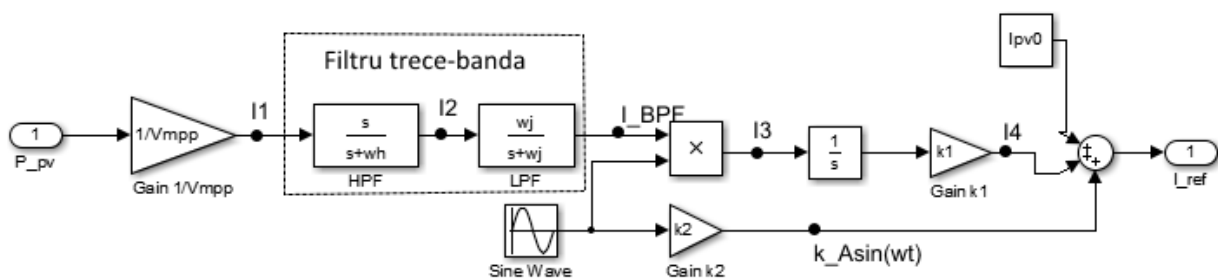


Fig. 3. Schema de control modificată ES (mES) (20).

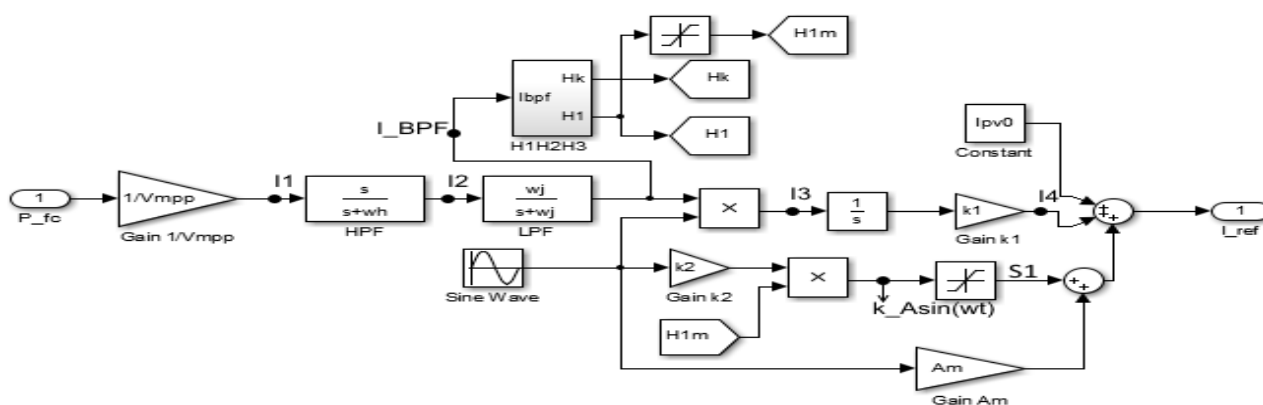
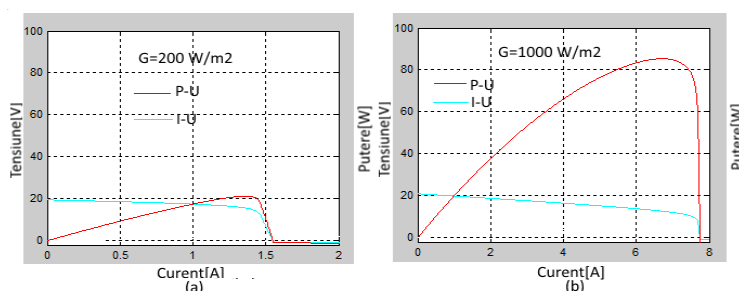


Fig.. 4. Schema de control avansat ES (aES)(13).


 Fig.. 5. Caracteristicile I-U și P-U pentru $G = 200 \text{ W/m}^2$ (a) și $G = 1000 \text{ W/m}^2$ (b).

$$i_{HPF} = -\omega_h i_{HPF} + \omega_h i_1, i_2 = i_1 - i_{HPF}$$

$$i_3 = \omega_l i_3 + \omega_l i_2 A \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$i_4 = k_1 i_3 \quad (4)$$

$$i_{PV} \cong i_{ref},$$

$$i_{ref} = i_4 + k_A \sin(\omega t), k_A = A k_2 H_1 \quad (5)$$

Ecuțiile (1), (4) și (5) reprezintă caracteristica statică P-I, integratorul, controlerul MPP bazat pe curentul de referință iar ecuațiile (2) și (3) reprezintă procesarea semnalului în schema de control aES, schemă bazată pe BPF și conexiunea serie HPF și LPF [16].

Notății folosite :

- k_1 este câștigul în buclă;
- H_1 este magnitudinea primei armonici a puterii PV ;
- $\omega_l = \alpha_l \omega, 0 < \alpha_l < 6$, este frecvența de tăiere LPF;
- $\omega_h = \alpha_h \omega, 0 < \alpha_h < 1$, este frecvența de tăiere HPF;
- A și ω sunt amplitudinea și frecvența semnalului oscilator;
- i_1, i_2 și i_3 sunt semnalele după blocurile HPF și LPF (Figura nr.2 și ecuațiile (1) și (3));
- i_{HPF} variabilă intermediară legată de funcționarea HPF;
- i_{BPF} semnalul de ieșire din BPF;

- i_4 este semnalul care estimează parametrul necunoscut;

- V_{MPP} este tensiunea la MPP;

În cazul schemei de control aESC amplitudinea de oscilație este variabilă în timp cu H_1 ($k_A = A k_2 H_1$, unde H_1 este magnitudinea primei armonici a puterii PV) și astfel amplitudinea de oscilație scade la zero după ce MPP este prins. Valoarea câștigului în buclă închisă poate fi setată mai sus pentru a obține o viteză mare de urmărire în timpul regimului tranzitoriu [16].

Parametrii folosiți în schema aESC: în afară de parametrii comuni pentru toți cei trei algoritmi ($A = \Delta I = 0,1 \text{ A}$, $f_d = 1/T_s = 100 \text{ Hz}$, $I_{ref}(0) = 0.1 \text{ A}$) și parametrii comuni cu mESC ($k_1 = 4f_d$, frecvența de tăiere pentru BPF $f_a = 0,1 f_d$, $f_b = 5,5 f_d$), schema de control a ESC poate folosi o amplitudine de oscilație mare ($A_m = 0.01$) pentru a căuta repede punctul de putere maximă, A_m -amplitudinea de oscilație.

4. PANOUL PV

Tensiunea generată de o celulă fotovoltaică este mai mică de 0.6 V și nu este suficientă pentru aplicații practice. Pentru a obține o tensiune mai mare, celulele PV sunt conectate în serie pentru a obține un panou PV [21]. Modulul PV utilizat în simulare (SX60) [22] este construit din 34 celule conectate în serie. Panoul PV are următorii parametri: tensiunea de circuit deschis ($V_{oc} = 21 \text{ V}$), curentul

COMPARAREA PERFORMANTELOR ALGORITMILOR

de scurtcircuit ($I_{SC} = 7.8A$), curentul la MPP ($I_{MPP} = 6.72A$), tensiunea la MPP ($V_{MPP} = 12.7V$). Acești parametri sunt măsurați în următoarele condiții standard: intensitatea radiației solare ($G_{STC} = 1000 W/m^2$), indicele de masă al aerului ($AM = 1.5$) și temperatura ($T_{STC} = 25^{\circ}C$).

Caracteristicile $I-U$ și $P-U$ pentru $G = 200W/m^2$ și $G = 1000 W/m^2$ la $T = 25^{\circ}C$, sunt arătate în figura 5.

În tabelul 1 și tabelul 2 se prezintă valorile pentru MPP la $G = 200 W/m^2$ și $G = 1000 W/m^2$.

Tabelul 1. Valorile măsurate la MPP pentru $G = 200 W/m^2$

I_{MPP}	Curent la MPP	1.37A
V_{MPP}	Tensiune la MPP	15.55V
P_{MPP}	Putere la MPP	21.2W

Tabelul 2. Valorile măsurate la MPP pentru $G = 1000 W/m^2$

I_{MPP}	Curent la MPP	6.8A
V_{MPP}	Tensiune la MPP	12.5V
P_{MPP}	Putere la MPP	85.2W

Caracteristica $I-U$ pentru un panou PV este dată de ecuația:

$$I_{PV} = K_{IC} \cdot G - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right]$$

unde V_{PV} reprezintă tensiunea celulei solare, I_{PV} – curentul celulei solare, R_s – rezistența serie a celulei solare, $K_{IC} = \frac{I_{SC}}{G_R} (G_R = 1000W/m^2)$ – câștigul de iradiere la curentul de scurtcircuit, G – valoarea instantanee a radiației solare, I_{01} – curentul de saturație invers, n – factorul sau coeficientul de idealitate, $V_T = N_S kT/q$ – tensiunea echivalentă termic, k – constanta lui Boltzmann, q – sarcina electronului, T – temperatura absolută, R_p – rezistența paralel a celulei [5,23].

5. REZULTATE

Sunt testate performanțele a trei algoritmi aESC, mESC și P&O, pentru diferite profiluri de iradiere (figura 6).

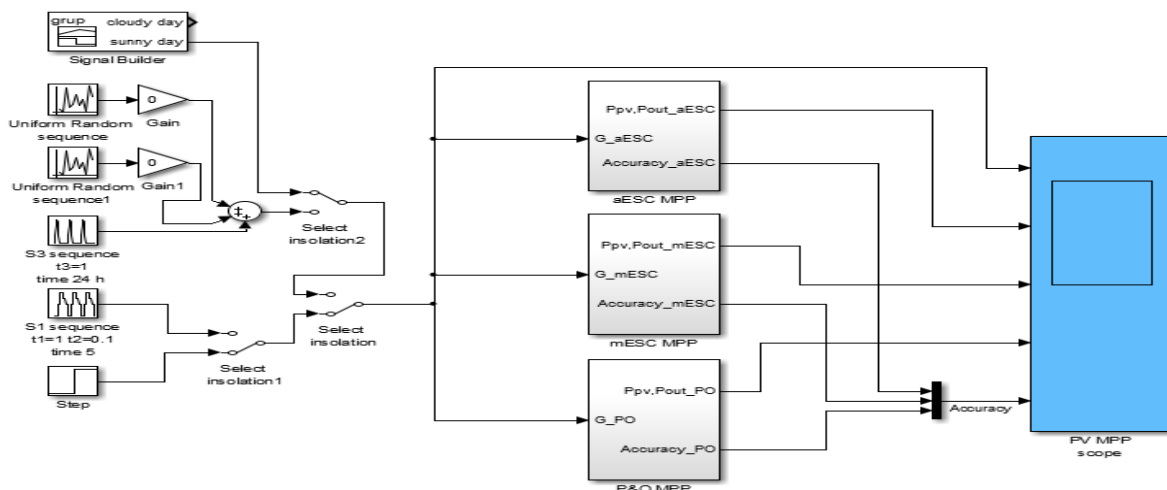


Fig. 6. Diagrama de comparare a performanțelor celor trei algoritmi: aESC, mESC și P&O.

5.1. Iradiere treaptă

În această secțiune sunt prezentate rezultatele simulării pentru nivel de iradiere ($G = 500 W/m^2$) și pas ($A = \Delta I = 0.1 A$, figura 7).

Rezultatele în urma simulării sunt:

- viteza de urmărire este aproximativ egală pentru aESC și mESC ($200W/m^2$), pentru algoritmul P&O viteza este mult mai mică (sub $200 W/m^2$). Observație: viteza de căutare dP/dt (w/s) este egală cu panta curbei $P(t)$.

- cu privire la oscilații: algoritmul P&O și mESC au oscilații mari în comparație cu aESC. Pentru a reduce oscilațiile se poate micșora pasul ($A = \Delta I = 0.01A$, figura 8).

- acuratețea pentru toți cei trei algoritmi este aproximativ egală cu 98%.

Figura 8 arată următoarele rezultate:

- se observă o reducere a vitezei de căutare la mESC.

- acuratețea este aproape de valoarea unu, evident viteza de căutare crește dacă crește pasul.

- aESC are avantajul unei amplitudini de oscilație controlată de H1, care scade la zero după ce MPP este prins. Acest lucru înseamnă o viteză de căutare mare (pantă aproape de 90°) și o oscilație mică în apropiere de MPP, dată de A_m care se poate reduce la $A_m = 0.001$. Rolul lui A_m este să înceapă căutarea dacă procesul nu este perturbat de sarcină.

SOLUȚII PENTRU UN ORAȘ INTELIGENT

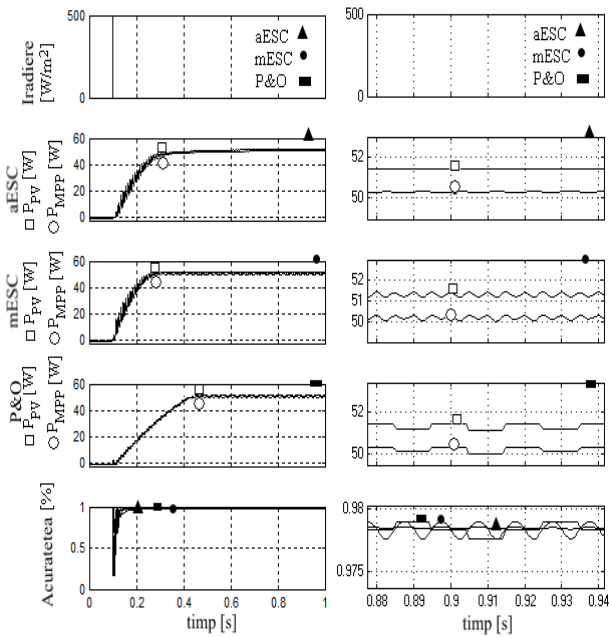


Fig. 7. Rezultatele simulării pentru nivelul de iradiere ($G = 500 \text{ W/m}^2$) și pas $A = \Delta I = 0,1A$ (cu mărire în partea dreaptă).

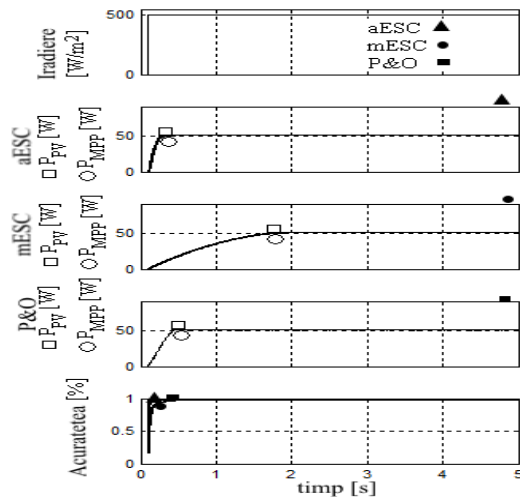


Fig. 8. Rezultatele simulării pentru nivelul de iradiere ($G = 500 \text{ W/m}^2$) și pas $A\Delta I = 0,01A$.

5.2. Profil de iradiere variabil

Profilul de iradiere este definit astfel: primul vector $[0 \ 1*t_1 \ 1*t_1+t_2 \ 2*t_1 \ 2*t_1+t_2 \ 3*t_1 \ 3*t_1+t_2 \ 4*t_1 \ 4*t_1+t_2 \ 5*t_1]$ și al doilea vector $[200 \ 200 \ 600 \ 600 \ 1000 \ 1000 \ 800 \ 800 \ 600 \ 600]$. Unde primul vector este o secvență de timp ($t_1 = 1$, t_2 vor define pantele) și al doilea vector este secvența de iradiere.

Figura 9 arată următoarele rezultate (pentru $t_2 = 0,5$):

- toți algoritmi vor funcționa aproape la fel, acuratețea este mai bună pentru aESC la o valoare mare a iradierii ($G > 500 \text{ W/m}^2$).
- algoritmul P&O are o oscilație mare la o valoare redusă a iradierii ($G < 300 \text{ W/m}^2$) deoarece

folosește un increment ΔI care este comparabil cu I_{MPP} . Dacă se reduce ΔI , rezultă reducerea vitezei de urmărire. Așadar algoritmul P&O nu poate urmări punctul de putere maximă dacă apar pante prea mari (t_2 mic) ale profilului de iradiere datorită schimbărilor rapide de vreme (nori pe cer).

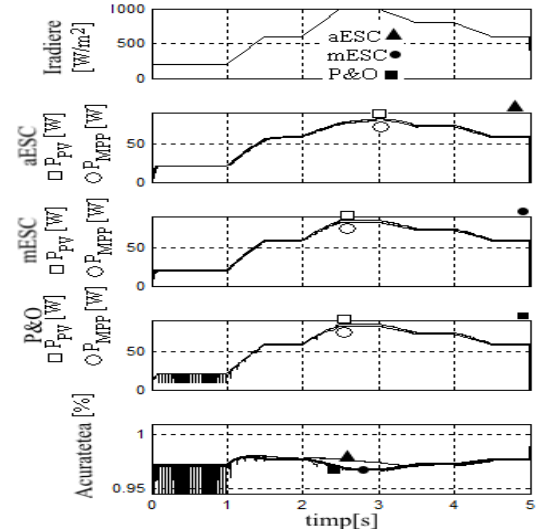


Fig. 9. Diagrama de simulare pentru profil de iradiere variabil ($t_2 = 0,5$).

În figura 10 sunt prezentate rezultatele pentru $t_2 = 0,1$:

- se observă pierderea controlului de urmărire al punctului de putere maximă pentru algoritmul P&O.

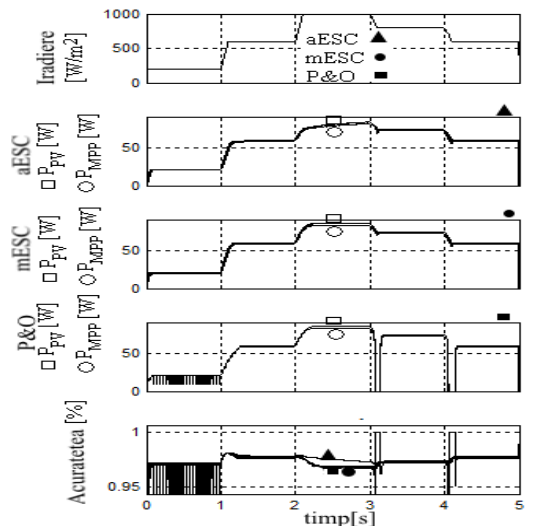


Fig. 10. Diagrama de simulare pentru profil de iradiere variabil ($t_2 = 0,1$).

În figura 11 se stabilește $t_2 = 0,01$. Se constată pierderea controlului de urmărire al punctului de putere maximă pentru toți algoritmi (aESC, mESC, P&O), dar amplitudinea de oscilație pentru aESC poate fi crescută fără a avea efect asupra creșterii oscilației.

COMPARAREA PERFORMANȚELOR ALGORITMILOR

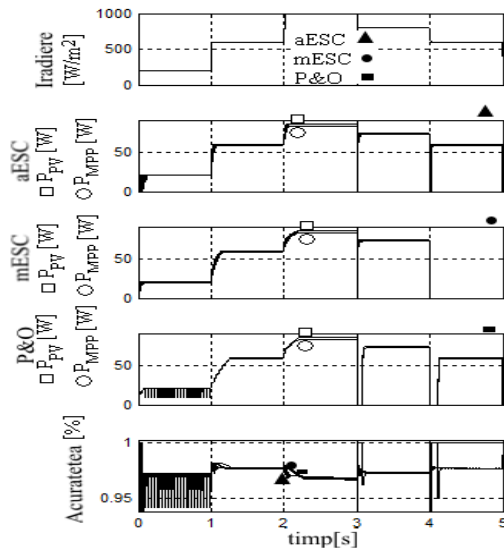


Fig. 11. Diagrama de simulare pentru profil de iradiere variabil ($t_2 = 0.01$).

5.3. Profil de iradiere pentru o zi

În figura 12 sunt prezentate simulările pentru un profil de iradiere, concluziile sunt:

- aceeași oscilație pentru mESC și P&O (mărire acuratețe).
- acuratețea de urmărire (aproximativ 96.8%) aceeași pentru toți algoritmi, puțin mai mare pentru aESC la iradiere mare.

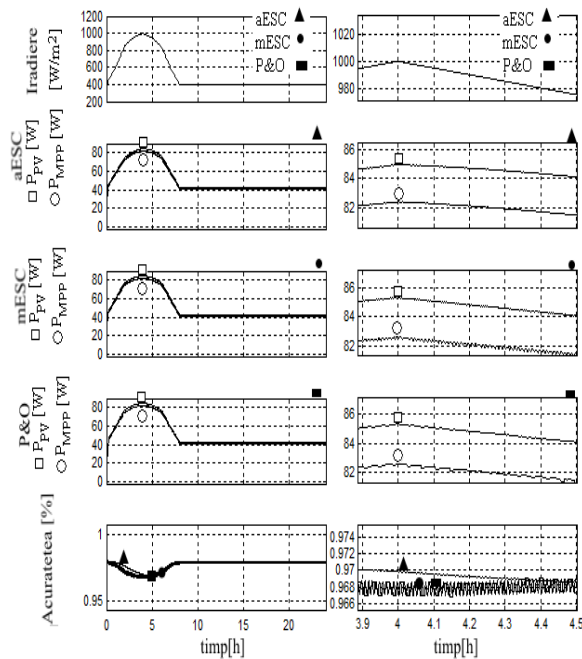


Fig. 12. Diagrama de simulare pentru un profil de iradiere (cu mărire în partea dreaptă).

Se include în blocul „signal builder” din figura 6 un profil real (o zi însorită și o zi noroasă) pentru a fi prelucrate.

Simulările pentru o zi însorită sunt prezentate în figura 13:

- algoritmul P&O prezintă oscilații la valoare redusă a iradierii ($G < 200 W/m^2$) în comparație cu aESC. Oscilațiile pentru mESC la valoare redusă a iradierii sunt reduse în comparație cu oscilațiile P&O.
- acuratețea pentru toți algoritmi la valoare mare a iradierii ($G = 1000 W/m^2$) este aproximativ egală cu 96.5%. Acuratețea este mai bună pentru aESC la valoare mare a iradierii ($G : 500 W/m^2$).

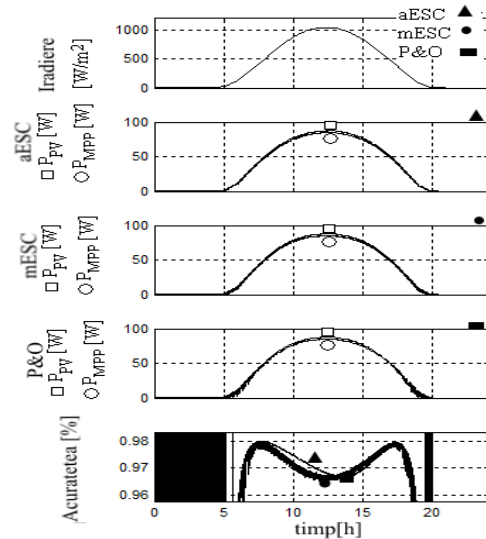


Fig. 13. Diagrama de simulare pentru o zi însorită.

În figura 14 sunt prezentate simulările pentru o zi noroasă:

- algoritmul P&O prezintă oscilații mari la valoare redusă a iradierii, P&O nu poate urmări punctul de putere maximă în timpul schimbărilor rapide de vreme (nori pe cer).
- acuratețea este mai bună pentru aESC la iradiere mare, dar algoritmul P&O prezintă oscilații în timpul schimbărilor rapide de vreme.

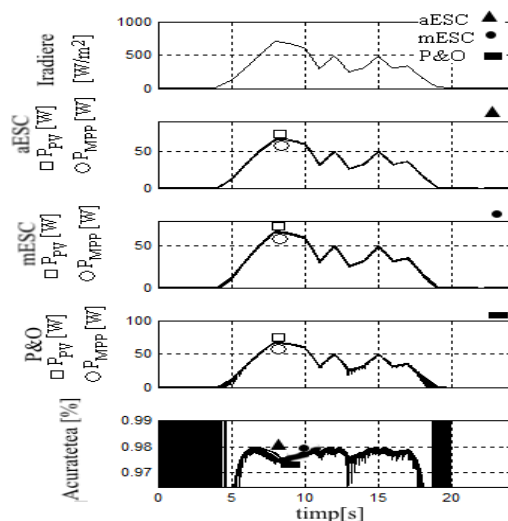


Fig. 14. Diagrama de simulare pentru o zi noroasă.

6. CONCLUZII

În această lucrare se propune o analiză comparativă privind performanțele a trei algoritmi MPP: aESC, mESC și P&O.

S-au testat algoritmi aESC, mESC și P&O pentru un panou PV la intensitatea radiației solare constantă ($G = 500 \text{ W/m}^2$) și pasul ($\Delta I = 0.1 \text{ A}$). S-au obținut performanțe bune pentru toți cei trei algoritmi: viteză de urmărire și acuratețe, oscilații reduse pentru aESC, dar mărite pentru mESC și P&O. Prin micșorarea pasului la ($\Delta I = 0.01 \text{ A}$) se reduc oscilațiile, crește precizia de urmărire, dar scade viteza de căutare.

S-au testat dinamic performanțele la profil de iradiere variabil pentru ($t_1 = 1 \text{ s}$; $t_2 = 0,5 \text{ s}$; $t_2 = 0,1 \text{ s}$; $t_2 = 0,01 \text{ s}$; $t_3 = 1 \text{ s}$). S-a constat: acuratețea este mai bună pentru aESC la profil de iradiere mare ($G > 500 \text{ W/m}^2$) iar algoritmul P&O are oscilații mari la profil de iradiere mic ($G < 300 \text{ W/m}^2$). Prin reducerea lui t_2 se pierde controlul de urmărire pentru algoritmul P&O, reducând și mai mult t_2 se pierde controlul de urmărire pentru toți cei trei algoritmi. Au fost testate performanțele pentru un profil real, o zi cu soare și o zi noroasă.

Rezultatele simulării arată rezultate bune pentru tehnicile MPP bazate pe controlul ES. S-a demonstrat că controlul aESC este superior controlului mESC și algoritmului P&O, obținându-se o acuratețe mare în găsirea punctului de putere maximă. Controlul aESC prezintă următoarele performanțe: o oscilație neglijabilă a puterii după ce punctul de putere maximă este prins și robustețe internă, performanțe care sunt ideale în cazul schimbărilor rapide de vreme (nori pe cer).

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bizon N., Oproescu M., *Convertoare de Putere utilizate in Sistemele de Generare a Energiei, Universitatea din Pitesti*. Pitesti 2007, ISBN 978-973-690-644-2.
- [2] Reinoso R., Carlos Sanchez., Milone Diego., Buitrago Roman., *Simulation of photovoltaic centrals with dynamic shading*. Appl. Energy January 2013,103(2), 278-289.
- [3] Ishaque Kashif., Salam Zainal., *A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition*. IEEE Trans Energy Convers 2013,19(1),457-468.
- [4] Salas V., Olias E., Barrado A., Lázaro A., *Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems*. Sol Energ Mat Sol C 2006,90(11),1555-78.
- [5] Liu F., Duan S, Liu F., Liu B., Kang Y., *A variable step size INC MPPT method for PV systems*. IEEE T Ind Electron 2008,55(7),2622-8.
- [6] Jiang J-J., Wang J-C., Kuo K-C., Su Y-L., Shieh J-C., Chou J-J., *Analysis of the junction temperature and thermal characteristics of photovoltaic modules under various operation conditions*. Energy 2012,44(1),292-301.
- [7] Wang J-C., Su Y-L., Shieh J-C., Jiang J-A., *High-accuracy maximum power point estimation for photovoltaic arrays*. Sol Energ Mat Sol C 2011;95:843-51.
- [8] Enrique JM, Andujar JM, Bohorquez MA. *A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications*. Sol Energy 2010;84(1):79-89.
- [9] Reisi Ali Reza, Moradi Mohamed Hassan., *Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review*. IEEE Trans Energy Convers 2013,18, 433-443.
- [10] Liao C-C., *Genetic k-means algorithm based RBF network for photovoltaic MPP prediction*. Energy 2010,35(2),529-36.
- [11] Chen LR, Tsai CH, Lin YL, Lai YS., *A biological swarm chasing algorithm for tracking the PV maximum power point*. IEEE T Energy Conver 2010,25(2),484-93.
- [12] Kadri R, Andrei H, Gaubert J-P, Ivanovici T, Champenois G, Andrei., *Modeling of the photovoltaic cell circuit parameters for optimum connection model and real-time emulator with partial shadow conditions*. Energy 2012,42(1),57-67.
- [13] Karlis AD, Kottas TL, Boutalis YS., *A novel maximum power point tracking method for PV systems using fuzzy cognitive networks (FCN)*. Electr Pow Syst Res 2007,77(3-4),315-27.
- [14] Bhatnagar Pallavee, R. Nema., *Maximum power point tracking control techniques state of the art in Photovoltaic application*. IEEE Trans. Energy Convers 2013, 23,224-241.
- [15] Caluianu I., *Increasing energy productivity of photovoltaic panels, PhD thesis (Creșterea productivității energetice a panourilor fotovoltaice, Teză de doctorat)*, București, 2011.
- [16] N. Bizon., *Energy harvesting from the PV Hybrid Power Source*. Energy 2013,52(1),297-307.
- [17] Almonacid F, Rus C, Pérez-Higueras P, Hontoria L., *Calculation of the energy provided by a PV generator. Comparative study: conventional methods vs. artificial neural networks*. Energy 2011,36(1),375-84.
- [18] Akyuz E, Coskun C, Oktay Z, Dincer I., *A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency*. Energy 2012,44(1),1059-66.
- [19] Bizon N., *On tracking robustness in adaptive extremum seeking control of the fuel cell power plants*. Appl Energy 2010,87(10),3115-30.
- [20] Bizon N., *Energy harvesting from the FC stack that operates using the MPP tracking based on modified extremum seeking control*. Appl Energy 2013,104,326-336.
- [21] Gutierrez Orozco, Scarpeta Ramirez, Spagnuolo G, Paja Ramos., *A technique for mismatched PV array simulation*. IEEE Trans Energy Convers 2013,55,417-427.
- [22] Ishaque K, Salam Z., *A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model*. Sol Energy 2011,85,2217-27.
- [23] ESRAM T, Chapman PL., *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*. IEEE T Energy Conver 2007,22(2),439-49.

Despre autori

Ing. Cristian-Ioan HOARCĂ

Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice si Izotopice – ICIT, Rm. Valcea, Romania

Este inginer electromecanic la Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice si Izotopice ICIT Rm. Valcea, Romania, implicat în participarea la testele care au loc în Instalația Nucleară Pliot de la Ramnicu Valcea. Activitatea sa de cercetare a fost realizată în domeniul panourilor fotovoltaice, calculul și proiectarea schimbătoarelor de căldură

Șef lucrări dr. ing. Marian-RADUCU

Universitatea din Pitești, Pitești, România

Absolvent al Institutul Politehnic Bucuresti, Facultatea de Electronica și Telecomunicații, specializarea Electronică și Telecomunicații, este șef de lucrări la Universitatea din Pitești, implicat în activitatea de predare, realizare proiecte naționale și internaționale.

Ing. Simona-Maria RĂBOACĂ

Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice si Izotopice – ICIT, Rm. Valcea, România

Este inginer automatist la Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice si Izotopice ICIT Rm. Valcea, Romania, implicată în testarea și monitorizarea masină electric, testare rețea Smart Grid. Activitatea sa de cercetare a fost realizată în domeniul energetic privind sistemele hibride.