

PROBLEME DE MODELARE ȘI CONDUCERE ALE SISTEMELOR ELECTROENERGETICE SOLARE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Automatică
de către

Ing. Ovidiu GANA

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean
Prof.univ.dr.ing. Mihail Abrudan
Prof.univ.dr.ing. Valentina E. Bălaș

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2019

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

PREFAȚĂ

Lucrarea de față prezintă o sinteză a rezultatelor cercetărilor autorului, interprinse pe parcursul activității desfășurate în cadrul Departamentului de Automatică și Informatică Aplicată al Facultății de Automatică și Calculatoare din cadrul Universității „Politehnica” Timișoara, în vederea obținerii titlului de doctor în domeniul „Ingineria Sistemelor”.

Pe parcursul acestor ani am participat la mai multe conferințe internaționale în domeniul energiilor regenerabile solare. Am cunoscut astfel, și pe această cale, în mod direct specialiști din domeniu, realizările lor, încercând să dezvolt prin cercetările mele, concepte originale, realizări noi cu impact pozitiv la îmbunătățirea sistemelor de conducere, pentru a mări eficiența sistemelor electroenergetice solare.

Doresc să remarc ajutorul de care am beneficiat din partea conducătorului științific, prof. univ. dr. Ing. Octavian Proștean începând cu faza de documentare, elaborarea rapoartelor de cercetare, sistematizarea materialului și pentru sfaturile și observațiile primite, deosebit de constructive și folositoare în ridicarea nivelului științific al prezentei teze de doctorat. Îi aduc pe această cale mulțumiri pentru tot sprijinul științific și moral acordat pe întreaga perioadă de elaborare a tezei.

Aș dori să îi mulțumesc deasemenea domnului Prof.dr.ing Marius Babescu pentru discuțiile purtate și pentru consultața primită.

Mulțumesc deasemenea domnului Doru Dumici pentru sprijinul acordat în realizarea standului, prin punerea la dispoziție a ariei de panouri fotovoltaice și domnului Pacurar Cristian pentru furnizarea unor echipamente \ componente electronice necesare.

Timișoara, 2019

Ing. Ovidiu Gana

Gana, Ovidiu

Probleme de modelare și conducere ale sistemelor electroenergetice solare Teze de doctorat ale UPT, Seria xxxx, Nr. xxxx , Editura Politehnica, 2019, 145 pagini, 132 figuri, 25 tabele.

ISSN:XXXXXXXXXXXXXXXXX

ISBN: XXXXXXXXXXXXXXXXX

Cuvinte cheie: sistem electroenergetic solar, panouri fotovoltaice, putere radiantă solară, modele matematice, strategii de conducere optimă, punct de funcționare maxim.

Rezumat: Cercetările din teză abordează domeniul de mare actualitate al energiei solare, cu particularizare la problematica modelării și conducerii sistemelor cu panouri fotovoltaice. După o analiză critică a sistemelor electroenergetice solare existente, sunt dezvoltate modele matematice originale, utilizabile în strategiile de conducere optimă a sistemelor cu panouri fotovoltaice prin determinarea coordonatelor punctelor de putere maximă.

Este conceput un algoritm de conducere optimă, bazat pe metoda anulării derivatei, care permite aducerea sistemului în zona energetică maximă. Este realizat un stand experimental utilizat pentru identificarea experimentală a modelelor matematice propuse, analizei funcționării optime a panoului fotovoltaic și respectiv a validării rezultatelor.

CUPRINS

Notății, abrevieri, acronime	7
Lista de tabele.....	9
Lista de figuri.....	10
1.INTRODUCERE.....	13
1.1 Oportunitatea și obiectivele lucrării.	13
1.2 Conținutul lucrării	14
2. ACTUALITATEA CERCETĂRILOR PRIVIND CONVERSIA ENERGIE ISOLARE.....	16
2.1. Stadiul actual și perspectiva utilizării energiei solare pe plan mondial și în România.	16
2.2. Efectul fotovoltaic.....	22
2.3. Stadiul actual al cercetărilor privind conversia energiei solare în energie electrică.....	24
2.4 Concluzii.	28
3. MODELAREA PANOURILOR FOTOVOLTAICE.....	29
3.1. Problematika modelării panourilor fotovoltaice.....	29
3.2. Modelul matematic al panoului fotovoltaic: MM-PV.....	31
3.3. Determinarea experimentală a caracteristicilor externe.....	35
3.4. Identificarea parametrilor MM-PV.....	37
3.4.1. Identificarea parametrilor modelului matematic MM-PV la temperatura T constantă.....	37
3.4.2. Modele matematice simplificate, MM-PVS1 și MM-PVS2, pentru cazul temperaturii T constante.....	40
3.4.2.1 MM-PVS1, studii de caz.....	40
3.4.2.1 MM-PVS2, studii de caz.....	44
3.5. Concluzii.....	50
4. PROBLEME ALE CONDUCERII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE CU PANOURI FOTOVOLTAICE.....	51
4.1. Preliminarii.....	51
4.2. Considerații generale.....	52
4.3. Panou fotovoltaic debitând pe o rezistență de sarcină constantă (PV+R)...53	
4.4. Panou fotovoltaic debitând pe un acumulator electric (PV+AE).....55	
4.5. Panou fotovoltaic debitând pe un convertor DC-DC conectat la un acumulator electric (PV+ (DC-DC) + AE).....	60
4.6. Analiza funcționării panoului fotovoltaic PV în zona MPP..... 62	
4.6.1. Analiza comparativă a funcționării sistemului PV+(DC-DC)+AE la modificarea sarcinii, folosind metoda micilor perturbații (MP) respectiv metoda anulării derivatei puterii (ADP).....	62
4.6.2. Analiza comportării sistemului fotovoltaic (SPV) la modificarea rezistenței de sarcină, în funcție de diferența de putere (ΔP), pentru diferite valori ale constantei K_p	71
4.6.2.1 Analiza comportării SPV la mărirea rezistenței de sarcină.....	77
4.6.3 Modificarea rezistenței de sarcină pentru a realiza o maximizare a puterii debitate.....	80
4.7. Sisteme de conducere bazate pe metoda ADP cu mărimi de referință corespunzătoare MPP.....	93

4.7.1. Sistem de conducere cu I_{OPTIM} și U_{OPTIM} mărimi de referință.....	93
4.7.2. Structură de conducere cu I_{OPTIM} mărime de referință.	97
4.8. Concluzii.....	102
5. STAND PENTRU VERIFICĂRI EXPERIMENTALE.....	103
5.1. Considerații preliminare.....	103
5.2. Panourile fotovoltaice PV.....	103
5.3. Standul experimental.....	105
5.3.1 Controlerul prototip.....	107
5.4. Reostatul inteligent.....	110
6. REZULTATE EXPERIMENTALE.....	113
6.1. Analiza comparativă a rezultatelor considerând pași de observare diferiți.	114
6.2. Analiza comparativă a rezultatelor utilizând valori fixe și distincte pentru rezistența de sarcină.	120
6.3. Identificarea modelului matematic MM-PV.....	125
6.3.1 Determinarea caracteristicilor externe ale PV.	125
6.3.2 Identificarea modelului matematic MM-PV, la temperatura T constantă.	127
6.4. Concluzii.....	130
7. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	131
7.1. Concluzii finale.....	131
7.2. Contribuții personale.	132
7.3. Perspective de dezvoltare.	133
BIBLIOGRAFIE.....	134

NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME

ADP = metoda anulării derivatei puterii
a, b, c, d, f, g = parametri pentru modelul MM-PV ADP
AE = acumulator electric
AGC=controlul automat al puterii generate (Automated Generation Control)
ANRE = Agenția Națională de Reglementare în domeniul Energiei
ARCE= Agenția Română pentru Conservarea Energiei
BC = bloc de calcul
CE = caracteristică externă
CEE= centrală electrică eoliană
DC-DC = Convertor curent continuu - curent continuu
E = radiație solară
GSMP = generator sincron cu magneți permanenți
h = constanta lui Planck
hv= energia fotonului
i= moment de timp
 $I_{OPTIM} = I^*$ = curentul corespunzător punctului de funcționare maxim
 I_{REAL} = curentul real măsurat la bornele sarcinii
 I_{SC} = curent de scurtcircuit
 $K_{1,2}$ = constantă a regulatorului proportional
Kp = constanta de proporționalitate utilizată în cadrul metodei micilor perturbații
MM = model matematic
MM-PV = model matematic al panoului fotovoltaic
MM-PVS1 = model matematic al panoului fotovoltaic simplificat 1
MM-PVS2 = model matematic al panoului fotovoltaic simplificat 2
MP = metoda micilor perturbații (perturbă și observă)
MPP = punct de funcționare maxim (Maximum Power Points)
 P_{MAX} = putere solară maximă
 P_{MIN} = putere solară minimă
 P_{OPTIM} = puterea corespunzătoare punctului de putere maximă $P_{OPTIM} = U_{OPTIM} * I_{OPTIM}$
 P_S = putere solară radiantă
P = regulator proportional
 $P = P_{REAL}$ = putere debitată (utilă) la o anumită rezistență de sarcină
 P_S = putere solară radiantă unde :
 P_{SMAX} = putere solară maximă
 P_{SMIN} = putere solară minimă
PV = panou fotovoltaic
PVA = panou fotovoltaic auxiliar
PWM = modulare cu impulsuri (Pulse with modulation)
r = rezistență electrică internă a AE
 $R = R_{REAL}$ = rezistență electrică a sarcinii
 R_{OPTIM} = rezistența corespunzătoare punctului de funcționare maxim
S = suprafața panoului fotovoltaic
SES = sistem electroenergetic solar
SER = sistem energetic regenerabil
SC = super condensator
SOC = Stare de încărcare a AE (State of charge)
SPV = Sistem fotovoltaic sau Sistem Electroenergetic Solar (SES)
t= moment de timp

T = temperatura panoului
TV = turbină de vânt
 $U^* = U_{OPTIM}$ = Valoare pentru tensiune corespunzătoare MPP
 U_{AE} = tensiunea acumulatorului electric
 U_{CC} = tensiune de curent continuu
 U_0 = tensiune în gol
 $U_{opt}, I_{opt}, P_{opt}, R_{opt}$ = valori măsurate utilizând metoda anulării derivatei puterii
 $U_{mp}, I_{mp}, P_{mp}, R_{mp}$ = valori măsurate utilizând metoda micilor comparații
 α = unghi de conducție a elementelor de comutație
 ν = frecvența de oscilație a fotonului
 η = randament
W = energie captată de PV

LISTA DE TABELE

Tabelul 2.1	Rezervele globale de resurse energetice
Tabelul 2.2	Distribuția potențialului energetic solar din România
Tabelul 4.1	Energiile obținute pentru diverse rezistențe de sarcină
Tabelul 4.2	Dependența puterii de rezistența de sarcină la $K_p = -0.91512$
Tabelul 4.3	Dependența puterii de rezistența de sarcină la $K_p = -0.1512$
Tabelul 4.4	Dependența puterii de rezistența de sarcină inițială la $K_p = -0.1512$
Tabelul 4.5	Puterile, tensiunile și curenții pentru $K_p = 0.1$, $K_p = 0.3$ și $K_p = 0.6$
Tabelul 4.6	Valorile reale și de optim, pentru momentele de timp $t = 1600$ [s], $t = 1700$ [s] și $t = 1800$ [s] la $K_p = 0.6$
Tabelul 4.7	Puterile, tensiunile și curenții la variația lui t în intervalul $t = [2000 \div 2400]$ [s]
Tabelul 4.8	Puterile, tensiunile și curenții în cazul 1
Tabelul 4.9	Puterile, tensiunile și curenții optimi în cazul 2
Tabelul 4.10	Evoluția în timp a puterii și a rezistenței reale
Tabelul 4.11	Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL} = 9.1$ [Ω]
Tabelul 4.12	Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL} = 9.3$ [Ω]
Tabelul 4.13	Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL} = 9.7$ [Ω]
Tabelul 4.14	Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL} = 9.9$ [Ω]
Tabelul 4.15	Rezultatele obținute cu rezistențe de sarcină modificate după I_{OPTIM}
Tabelul 5.1	Specificații de catalog ale panoului de tip Schott Poly5
Tabelul 6.1	Puterile, tensiunile și curenții măsurați pentru un pas de 100 secunde
Tabelul 6.2	Puterile, tensiunile și curenții măsurați din 50 în 50 secunde
Tabelul 6.3	Mărimile optime la PV măsurate din 5 în 5 secunde
Tabelul 6.4	Puterile, tensiunile și curenții la $R_1 = 9.1$ [Ω]
Tabelul 6.5	Puterile, tensiunile și curenții la $R_2 = 9.3$ [Ω]
Tabelul 6.6	Puterile, tensiunile și curenții la $R_3 = 9.7$ [Ω]
Tabelul 6.7	Puterile, tensiunile și curenții la $R_4 = 9.9$ [Ω]

LISTA DE FIGURI

- Fig. 2.1 Energia solară disponibilă anual raportată la zăcămintele fosile și la consumul global anual
- Fig. 2.2 Efectul fotoelectric
- Fig. 2.3 Parcursul electronului fotoelectric
- Fig. 2.4 Deplasarea punctelor de funcționare pe caracteristica externă a PV
- Fig. 2.5 Sistemul:(PV + (DC-DC) + AE)
- Fig. 2.6 Caracteristicile externe $U=f(I)$
- Fig. 3.1 Caracteristici ale panoului fotovoltaic (PV)
- Fig. 3.1.a Caracteristici $U = f(I)$
- Fig. 3.1.b Caracteristicile puterii $P(I)$ și tensiunii $U(I)$
- Fig. 3.2 Caracteristici externe experimentale
- Fig. 3.3 Punctul de putere maximă P_{OPTIM}
- Fig. 3.4 Comparație între caracteristica modelată și caracteristica experimentală
- Fig. 3.5 Schema de montaj
- Fig. 3.6 Determinarea experimentală a caracteristicilor externe
- Fig. 3.7 Caracteristica externă modelată ($P_S=1000[W]$)
- Fig. 3.8 Caracteristicile externe modelate la $T=(273.15+25)K$
- Fig. 3.9 Dependența lui P_{OPTIM} și R_{OPTIM} de P_S
- Fig. 3.10 Dependența lui U_{OPTIM} și I_{OPTIM} de P_S
- Fig. 3.11 Caracteristicile externe experimentale pentru PV având $S=0.5[m^2]$
- Fig. 3.12 Caracteristica externă experimentală
- Fig. 3.13 Caracteristicile externe modelate cu MM-PVS2
- Fig. 3.14 Caracteristica externă și caracteristica puterii la $P_S=883[W/m^2]$
- Fig. 3.15 Variația sinusoidală a puterii radiante solare
- Fig. 3.16 Deplasarea punctului de funcționare
- Fig. 3.17 Variația curentului I_{OPTIM}
- Fig. 3.18 Dependența curentului optim de P_S
- Fig. 3.19 Variația tensiunii optime U_{OPTIM}
- Fig. 3.20 Variația rezistenței optime R_{OPTIM}
- Fig. 4.1 Sistem de reglare a PV pentru funcționarea în MPP
- Fig. 4.2 Caracteristicile externe la un PV de tip Schott Polly 5
- Fig. 4.3 Panou fotovoltaic debitând pe rezistența de sarcină R
- Fig. 4.4 Panou fotovoltaic debitând pe un acumulator electric
- Fig. 4.5 Punctele de funcționare în cazul PV+AE
- Fig. 4.6 Schemă electrică PV+AE
- Fig. 4.7 Caracteristicile externe pentru diverse puteri radiante
- Fig. 4.8 Metoda micilor perturbații
- Fig. 4.9 Deplasarea punctului de funcționare
- Fig. 4.10 Punctele de funcționare la $K_p=-0.1512$
- Fig. 4.11 Variația rezistenței de sarcină
- Fig. 4.12 Variația puterii captate
- Fig. 4.13 Caracteristicile externe la $t=0$ și $100[s]$
- Fig. 4.14 Sistem fotovoltaic cu AE și convertor DC-DC de tip BOOST
- Fig. 4.15 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.16 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței
- Fig. 4.17 Variațiile valorilor optime și reale a puterii
- Fig. 4.18 Deplasarea punctelor de funcționare
- Fig. 4.19 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.20 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței

- Fig. 4.21 Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii
- Fig. 4.22 Variațiile valorilor optime și reale ale puterii
- Fig. 4.23 Deplasarea punctelor de funcționare
- Fig. 4.24 Structură de conducere a unui sistem fotovoltaic cu rezistență de sarcină și convertor DC-DC BUCK
- Fig. 4.25 Schema de implementare a algoritmului de conducere
- Fig. 4.26 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.27 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței
- Fig. 4.28 Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii
- Fig. 4.29 Variațiile valorilor optime și reale ale puterii
- Fig. 4.30 Variațiile puterilor în timp
- Fig. 4.31 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.32 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței
- Fig. 4.33 Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii
- Fig. 4.34 Variațiile valorilor optime și reale ale puterii
- Fig. 4.35 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.36 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței
- Fig. 4.37 Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii
- Fig. 4.38 Variațiile valorilor optime și reale ale puterii
- Fig. 4.39 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.40 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței
- Fig. 4.41 Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii
- Fig. 4.42 Variațiile valorilor optime și reale ale puterii
- Fig. 4.43 Variațiile valorilor optime și reale ale curentului
- Fig. 4.44 Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței
- Fig. 4.45 Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii
- Fig. 4.46 Variațiile valorilor optime și reale ale puterii
- Fig. 4.47 Caracteristica externă a PV
- Fig. 4.48 Structură de conducere cu U_{OPTIM} și I_{OPTIM} mărimi de referință
- Fig. 4.49 Deplasarea punctului de funcționare
- Fig. 4.50 Dependența curentului optim de puterea radiantă
- Fig. 4.51 Dependența rezistenței optime de puterea radiantă
- Fig. 4.52 Sistem de conducere cu I_{OPTIM} mărime de referință
- Fig. 4.53 Evoluția puterilor în timp
- Fig. 4.54 Evoluția rezistențelor în timp
- Fig. 4.55 Evoluția curenților în timp
- Fig. 4.56 Evoluția tensiunilor în timp
- Fig. 5.1 Schema bloc de principiu a standului experimental
- Fig. 5.2 Caracteristicile externe ale panoului PV Schott Polly
- Fig. 5.3 Ansamblu de panouri folosit în cadrul standului experimental
- Fig. 5.4 Structura metalică de susținere și rotație a ariei de panouri
- Fig. 5.5 Elementele componente ale standului experimental
- Fig. 5.6 Amplasarea echipamenteleor de măsură și control în cadrul standului experimental
- Fig. 5.7 Schema bloc a standului experimental
- Fig. 5.8 Schema bloc de conexiuni (simplificată) pentru controler
- Fig. 5.9 Partea de forță a controlerului
- Fig. 5.10 Partea de comandă a controlerului
- Fig. 5.11 Schema bloc a reostatului inteligent, programabil
- Fig. 5.12 Layout-ul plăcii de comandă (controlerul) reostatului
- Fig. 5.13 Partea de comandă a reostatului

- Fig. 5.14 Partea de forță a reostatului inteligent (rezistor, motor pas cu pas și driver motor).
- Fig. 6.1 Sistem de reglare a PV pentru funcționarea în zona MPP
- Fig. 6.2 Variațiile în timp pentru curentul I_{opt} , I_{mp} pentru $t=[100-2000][s]$
- Fig. 6.3 Variațiile în timp pentru rezistență R_{opt} , R_{mp} pentru $t=[100-2000][s]$
- Fig. 6.4 Variațiile în timp pentru puterea P_{opt} , P_{mp} pentru $t=[100-2000][s]$
- Fig. 6.5 Variațiile în timp pentru puterea I_{opt} , I_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$
- Fig. 6.6 Variațiile în timp pentru puterea R_{opt} , R_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$
- Fig. 6.7 Variațiile în timp pentru puterea U_{opt} , U_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$
- Fig. 6.8 Variațiile în timp pentru puterea P_{opt} , P_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$
- Fig. 6.9 Deplasarea punctului de funcționare
- Fig. 6.10 Variațiile în timp pentru puterea I_{opt} , I_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$
- Fig. 6.11 Variațiile în timp pentru puterea R_{opt} , R_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$
- Fig. 6.12 Variațiile în timp pentru puterea U_{opt} , U_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$
- Fig. 6.13 Variațiile în timp pentru puterea P_{opt} , P_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$
- Fig. 6.14 Evoluțiile puterii P_{opt} , P_{mp} în timp
- Fig. 6.15 Variațiile în timp ale curentului I_{opt} și I la $R_1=9.1[\Omega]$
- Fig. 6.16 Variațiile în timp ale rezistenței R_{opt} și R_1 la $R_1=9.1[\Omega]$
- Fig. 6.17 Variațiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_1=9.1[\Omega]$
- Fig. 6.18 Variațiile în timp ale puterii P_{opt} și P la $R_1=9.1[\Omega]$
- Fig. 6.19 Variațiile în timp ale curentului I_{opt} și I la $R_2=9.3[\Omega]$
- Fig. 6.20 Variațiile în timp ale rezistenței R_{opt} și R_1 la $R_2=9.3[\Omega]$
- Fig. 6.21 Variațiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_2=9.3[\Omega]$
- Fig. 6.22 Variațiile în timp ale puterii P_{opt} și P la $R_2=9.3[\Omega]$
- Fig. 6.23 Variațiile în timp ale curentului I_{opt} și I la $R_3=9.7[\Omega]$
- Fig. 6.24 Variațiile în timp ale rezistenței R_{opt} și R_1 la $R_3=9.7[\Omega]$
- Fig. 6.25 Variațiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_3=9.7[\Omega]$
- Fig. 6.26 Variațiile în timp ale puterii P_{opt} și P la $R_3=9.7[\Omega]$
- Fig. 6.27 Variațiile în timp ale curentului I_{opt} și I la $R_4=9.9[\Omega]$
- Fig. 6.28 Variațiile în timp ale rezistenței R_{opt} și R_1 la $R_4=9.9[\Omega]$
- Fig. 6.29 Variațiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_4=9.9[\Omega]$
- Fig. 6.30 Variațiile în timp ale puterii P_{opt} și P la $R_4=9.9[\Omega]$
- Fig. 6.31 Schema de montaj
- Fig. 6.32 Punctele de funcționare obținute experimental
- Fig. 6.33 Caracteristica externă modelată experimental
- Fig. 6.34 Caracteristica externă modelată a MM-PV identificat

1. INTRODUCERE

1.1. Oportunitatea și obiectivele lucrării

În lucrarea de față se abordează un domeniu deosebit de actual al energiei resurselor regenerabile și anume sistemele de conversie a energiei solare în energie electrică, a sistemelor fotovoltaice (SPV). În contextul actual al crizei energetice mondiale, pe de o parte și al gradului de poluare alarmant al planetei pe de alta parte, problematica analizării unor surse regenerabile de energie, în special al celei solare, în vederea producerii de energie electrică nepoluantă este deosebit de oportună și necesară [Ale 2013, Any 2013, Bir 2017]. Desigur, apar o serie de probleme ridicate de fluctuația energiei, în sensul că, energia solară poate varia de la valoarea maximă 1KW/m^2 (cer senin), până la valori foarte mici [Anu 2013, Arb 2009, Yaw 2018, Zha 2017, Zon 2017].

Oportunitatea lucrării rezultă din preocupările actuale pe scară largă privind resursele regenerabile solare în scopul obținerii de energie electrică „verde”. Dezvoltarea sistemelor electroenergetice solare a fost posibilă pe de o parte ca urmare a salturilor tehnologice în domeniul electronicii, electronicii de putere, a materialelor, a noilor descoperiri în fizică, a evoluției sistemelor și strategiilor de conducere, iar pe de altă parte a politicilor europene, naționale și zonale de atragere a energiilor regenerabile în obținerea de energie electrică.

În sistemele energetice actuale mondiale, producerea energiei electrice din resurse regenerabile este de mare interes, mai ales că pe de o parte rezervele mondiale de combustibili clasici: petrol, carbune, gaze, sunt pe cale de epuizare datorită consumului din ce în ce mai mare (se dublează din 10 în 10 ani) iar pe de altă parte preocupările legate de protecția mediului au devenit o prioritate mondială.

În România, având în vedere potențialul solar, oportunitatea lucrării este pe deplin justificată din punct de vedere economic, tehnic și în special ecologic.

Obiectivul de bază al lucrării constă în conceperea și analiza funcțională a unui sistem de conducere astfel încât energia solară captată să fie maximă. Se consideră în acest sens o putere radiantă solară variabilă în timp în funcție de condițiile meteo. Prin urmare valoarea puterii electrice debitate de panoul fotovoltaic (PV) trebuie să fie în strânsă corelare cu valoarea puterii radiante solare, pentru a se putea realiza o funcționare în punctele de putere maximă.

În acest sens principalele obiective propuse în lucrarea de față sunt:

- Dezvoltarea, identificarea și validarea unor modele matematice pentru panourile fotovoltaice utilizate în conducerea SPV.
- Dezvoltarea unor structuri de conducere în vederea obținerii de energie electrică maximă (urmărirea punctului de putere maximă) în condiții meteo variabile în timp.

1.2 Conținutul lucrării

Conținutul lucrării este realizat pe parcursul a 7 capitole, 143 pagini, cu o listă de 156 titluri bibliografice dintre care 11 aparțin autorului.

În primul capitol sunt prezentate oportunitatea preocupărilor abordate, precum și principalele obiective ale lucrării.

Capitolul doi este consacrat analizei critice a sistemelor electroenergetice solare existente, prezentate în literatura de specialitate, conturându-se stadiul actual al cercetărilor privind conversia energiei solare precum și perspectivele utilizării ei atât pe plan național cât și pe plan internațional.

Capitolul trei tratează problematica modelării matematice a panourilor fotovoltaice (PV) ca principale componente ale sistemelor electroenergetice solare. Este dezvoltat un model matematic original MM-PV bazat pe funcția "cos" care să permită conducerea optimală a sistemelor energetice solare prin determinarea coordonatelor punctelor de putere maximă (MPP).

Sunt propuse deasemenea, pentru situațiile în care nu este necesar un model mai complex, două modele matematice simplificate MM-PVS1 și MM-PVS2 pentru cazul temperaturii T constante.

Modelele au fost concepute astfel încât să urmărească cât mai fidel caracteristica externă a panoului fotovoltaic prin identificarea unor parametrii definitorii.

Determinarea coordonatelor punctelor de putere electrică maximă (P_{OPTIM}) s-a realizat pentru diferite variații ale puterii radiante solare (insolație) (P_S).

În cadrul capitolului patru cercetările au fost orientate preponderent pe problemele principale care stau la baza conducerii sistemelor electroenergetice cu panouri fotovoltaice.

În cadrul capitolului se analizează funcționarea sistemului cu panouri fotovoltaice considerându-se câteva configurații specifice și anume: panou fotovoltaic debitând pe o rezistență de sarcină constantă (PV+R), panou fotovoltaic debitând direct pe un acumulator electric (PV+ AE), având sarcina neadaptată respectiv adaptată la caracteristica externă a PV, respectiv panou fotovoltaic debitând pe un convertor electric (PV+ (DC-DC) +AE), realizându-se o comparație între energiile captate.

Este efectuată o analiză comparativă a sistemului (PV+ (DC-DC) +AE) la modificarea sarcinii, utilizând metoda micilor perturbații (MP), respectiv metoda anulării derivatei puterii (ADP). Se analizează deasemenea comportarea sistemului fotovoltaic la modificarea rezistenței de sarcină în funcție de diferența de putere (ΔP) pentru diferite valori ale constantei K_p .

Este conceput un algoritm de conducere optimal pentru a duce sistemul în zona energetică maximă.

S-au determinat și analizat variațiile mărimilor semnificative ale sistemului fotovoltaic (SPV) prin adaptarea rezistenței de sarcină la valoarea puterii debitate astfel încât acesta să se apropie de MPP.

S-au considerat și analizat sisteme de conducere bazate pe metoda ADP, considerând ca mărimi de referință I_{OPTIM} și U_{OPTIM} , respectiv I_{OPTIM} .

Capitolul cinci este dedicat prezentării standului realizat, destinat identificării matematice a modelelor matematice propuse, analizei funcționării optime a PV, respectiv validării rezultatelor, având în componență o arie de șase panouri fotovoltaice (PV)(cinci conectate între ele în paralel +un panou fotovoltaic auxiliar de același tip), conectate la un modul convertor DC-DC care are ca sarcină un reostat inteligent.

Este proiectat și realizat un controler cu rolul de a prelucra și procesa în timp real datele achiziționate, pentru a comanda convertorul DC-DC astfel încât acesta să poată furniza la ieșire un maxim de putere (funcționare în MPP).

Reostatul inteligent realizat este un reostat de putere, comandat de un motor pas cu pas pentru a se putea modifica rezistența reostatului după o caracteristică dată.

În capitolul șase sunt prezentate o parte a măsurătorilor efectuate, considerate semnificative.

Au fost realizate analize comparative pentru două scenarii distincte: analiza comparativă a rezultatelor considerând pași de observare diferiți, precum și a rezultatelor obținute utilizând valori fixe și distincte pentru rezistența de sarcină.

Au fost determinate experimental caracteristicile externe ale PV.

S-a efectuat o identificare experimentală a modelului matematic al PV la temperatura T constantă.

În capitolul final al lucrării (Capitolul 7), sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile personale și posibilele direcții de cercetare ulterioară.

2. ACTUALITATEA CERCETĂRILOR PRIVIND CONVERSIA ENERGIEI SOLARE

2.1. Stadiul actual și perspectiva utilizării energiei solare pe plan mondial și în România

Evoluția consumului de energie electrică în timp demonstrează faptul că fără atragerea unor surse de energii regenerabile nu mai este posibilă realizarea creșterii economice ca până în prezent. În principal se are în vedere energia solară într-un sistem electroenergetic integrat, ce se poate implementa cu tehnologiile actuale în multe aplicații. Deoarece în general energiile regenerabile, preponderent la sistemele solare și eoliene, sunt dependente de condițiile meteo, care sunt aleatorii, se impune folosirea unui sistem de stocare pentru a exista o disponibilitate pe tot parcursul timpului.

Studiul literaturii de specialitate conduce la concluzia că în majoritatea lucrărilor se preconizează captarea unei energii maxime de la soare [Ale 2010, Ale 2013-1, Awa 2017, Zak 2017, Zhi 2017], punându-se problema funcționării cu SPV la putere maximă.

Principalele tipuri de surse de energie

În etapa actuală omenirea beneficiază, în principal, de trei categorii de surse de energie bazate pe:

- arderea combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze);
- fisiunea nucleară;
- captarea și conversia energiilor regenerabile (energia solară, energia vântului, energia potențială a apelor, energia geotermală etc.).

Aceste trei categorii de surse se deosebesc considerabil prin:

- capacitatea lor de a produce energie în condițiile și în perioadele de timp solicitate;
- prețul energiei produse;
- gravitatea impactului asupra mediului ambiant.

a) Combustibilii fosili pe parcursul ultimelor două secole au servit drept bază a energiei moderne, constituind suportul energetic al industrializării și al progresului tehnico-științific înregistrat în perioada menționată. Astăzi, încă o mare parte din cererea globală de energie e satisfăcută prin utilizarea combustibililor fosili [Aza 2008, Ben 2013, Cat2013, Dav 2010].

Valoarea calorică mare, posibilitatea stocării în cantitățile necesare pentru utilizare, la locul și în timpul preconizat, constituie avantajele de bază care au determinat folosirea atât de masivă a acestui tip de combustibil.

Există însă numeroase dezavantaje caracteristice pentru aceste resurse energetice, printre care două, cu cele mai grave consecințe:

- volumul limitat al rezervelor explorabile de combustibili fosili [Ben 2013, Dav 2010, Dra 2010];
- impactul puternic asupra mediului ambiant, trecut sub tăcere într-un trecut nu prea îndepărtat. Este pusă sub semnul întrebării chiar posibilitatea existenței într-un viitor apropiat a energiei bazate pe arderea combustibililor fosili.

Tabelul 2.1 prezintă estimarea consumului anual de resurse pe plan mondial, și previziunea de epuizare a acestora (exprimată în G) [Mah 2017, Mur 2017, Pha 2017, Tah 2017, Wie 2014].

Tabelul 2.1.
Rezervele globale de resurse energetice

Tipul de resurse	Rezerve naturale* [Gt]	Producție mondială [Gt]	Rezerve [ani] [Gt]
Petrol	140	3,45	40
Gaze naturale	135	2,2	64
Cărbune****	984205	2,2	155
Uraniu**	40->2000	0,34	60->2500****

* economic explorabile;

** în funcție de tehnologia utilizată ;

*** pornind de la un consum de 0,65 [Gt];

**** milioane tone.

b) Energia nucleară

Era energiei nucleare începe în anii `70 ai secolului XX. Cunoaște o dezvoltare spectaculoasă și mult promițătoare în anii '80, cucerind, la sfârșitul anilor '90 electroenergetica celor mai dezvoltate țări europene, a Statelor Unite ale Americii și Canadei.

c) Sursele regenerabile sunt sursele care se regenerează pe măsură ce sunt consumate.

Cele mai importante surse regenerabile de energie (SER) sunt [Moh 2017, Par 2015, Tib 2012, Tri 2011, Vis 2008]:

- energia vântului (eoliană);
- energia soarelui;
- energia hidraulică a râurilor;
- energia fluxurilor-refluxurilor și a valurilor mării;
- energia geotermală;
- energia biomasei.

Criteriile principale care determină perspectivele exploataării surselor de energie regenerabile sunt [Moh 2014, Mon 2014, Mos 2013, Pak 2016, Sen 2014, Suk 2013]:

- răspândirea relativ uniformă pe întregul glob și accesul la utilizarea lor al majorității țărilor lumii;
- aflarea lor în apropierea locului de consum și, ca urmare, lipsa necesității de a transporta energia la distanțe mari;
- accesul populației atât la producerea, cât și la folosirea energiei;
- majoritatea surselor de energie regenerabile sunt nonpoluante.

Aceste avantaje importante au determinat țările industrializate, dar și multe state în curs de dezvoltare, să edifice treptat un sistem energetic nou, care să ia în calcul și sursele de energie regenerabile.

Dezavantajele care au reținut un timp îndelungat implementarea pe scară largă a acestora sunt:

- energia regenerabilă este dispersată, ceea ce determină costuri mari ale instalațiilor de producere și transport a energiei finale destinate pentru consum;
- neuniformitate de distribuție în timp;
- posibilitățile de stocare dificile, de formare a rezervelor pe termen lung.

În ultimii ani sursele de energie regenerabile pentru alimentarea cu energie electrică au primit o atenție considerabilă ca urmare a preocupărilor globale asociate cu penuria de energie la nivel mondial [Ima 2017, Isl 2012, Jav 2014, Jul 2010, Kiv 2012, Mas 2003, Miq 2012]. În contextul unei expansiuni rapide a pieței pentru energie distribuită, un interes major este reprezentat de sistemele de energie solară. În general, majoritatea comunităților izolate în lume sunt alimentate cu energie electrică produsă de generatoare diesel, care nu sunt avantajoase din cauza consumului de carburant, de preț și poluare. În scopul de a reduce costurile consumului de energie, investigarea surselor regenerabile de energie reprezintă o alternativă atractivă [Elm 2014, Fra 2008, Gan 2010, Gan 2010-1, Gan 2011, Gan 2011-1, Gan 2012, Gan 2012-1, Gan 2012-2, Gan 2012-3, Gan 2012-4, Gan 2012-5, Gan 2014, Huy 2013]. În acest caz, necesitatea de depozitare a energiei devine și mai importantă, în special în ceea ce privește costurile mari cu energia în timpul perioadei de sarcină maximă [Chi 2013, Cho 2009, Chr 2013].

Datorită fluctuațiilor de putere cauzate de factorii meteo, energia solară se modifică semnificativ chiar și pe intervale de timp de ordinul orelor, ceea ce face necesar să se implementeze în locațiile respective sisteme de stocare a energiei, care să poată oferi consumatorilor energia necesară la valorile și momentele de timp impuse de aceștia [Rat 2015, Riz 2008, Rok 2016].

Astfel, sistemele electroenergetice cu panouri fotovoltaice pot oferi o soluție completă la o funcționare insulară [Ben 2013-1, Den 2006, Dha 2013].

Sistemele de stocare trebuie să preia fluctuațiile de putere ce apar datorită variațiilor nivelului de radiații solare. Se transferă astfel, în sistemul electroenergetic național (SEN), o putere constantă pe un anumit interval de timp, fapt deosebit de important în ceea ce privește stabilitatea dinamică a SEN. Preluarea surplusului de putere de la panourile fotovoltaice în acumulatele electrice (AE) se realizează până la atingerea unei stări de încărcare (SOC) de 100%, stare estimată prin valoarea tensiunii la bornele AE. Transferul de putere din AE în rețea se face prin intermediul unui convertor DC-AC. Tensiunea la AE este în jurul tensiunii nominale (de 12,24,...[V], (multiplii de 12 [V])). Preluarea surplusului de putere de la panoul fotovoltaic (PV) în supercondensatoare (SC) se face prin încărcarea succesivă a acestora la tensiunea U_{DC} (care alimentează convertorul DC-AC). Transferul de putere de la SC în rețea se face de asemenea printr-un convertor DC-AC, cu precizarea că în cazul SC transferul se efectuează într-un timp mult mai scurt. În acest mod AE și SC funcționează în mod separat. Supercondensatoarele SC se folosesc la puteri relativ mici. La puteri de ordinul MW folosirea SC nu se justifică și deci sistemul de stocare conține numai AE [Ara 2010, Gan 2012]. Sistemele electroenergetice solare oferă o soluție de mare perspectivă în asigurarea necesarului de energie electrică mereu ascendent. Desigur, implementarea acestor sisteme bazate pe energii regenerabile trebuie să aibă la bază studii aprofundate și de lungă durată privind radiația solară.

Sistemele electroenergetice cu panouri fotovoltaice (PV), denumite și sisteme fotovoltaice (SPV), furnizează o putere ce se modifică lent în timp, depinzând direct de puterea radiantă solară care se modifică la schimbarea condițiilor meteo

(nori, praf, nebulozitate). Energia anuală primită de la soare este cu mult mai mare decât energia globală consumată de populație, așa cum se poate observa din (Fig. 2.1) [Gui 2012, Ker 2014, Ket 2005, Kha 2015].

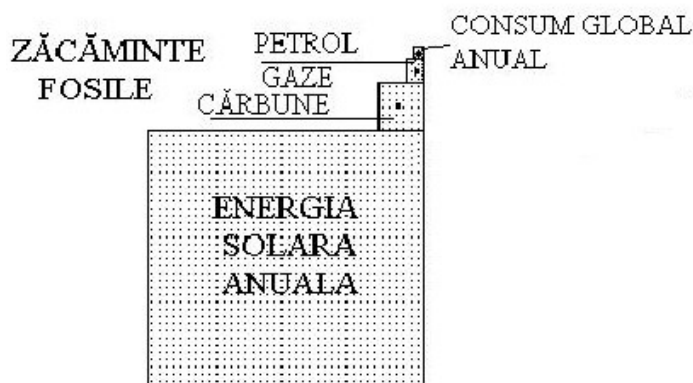


Fig. 2.1. Energia solară disponibilă anual raportată la zăcămintele fosile și la consumul global anual

Consumul global anual este cu mult mai mic decât energia primită și se bazează, în principal, pe cărbune, petrol, gaze și energie nucleară.

Energia hidroelectrică exploatabilă are o cotă extrem de redusă în comparație cu energia solară anuală ajunsă pe Pământ.

În prezent, randamentele la celulele solare sunt în jurul valorii de 15%.

Amortizarea unei instalații solare ce produce energie electrică este de 10÷15 ani, cu tendințe de scădere prin :

- îmbunătățirea randamentului
- scăderea prețului de cost la panourile fotovoltaice.

Radiația solară pe o suprafață de 1[m²] este de aproximativ 1.4[KW/m²] în spațiul cosmic aflat în vecinătatea stratosferei Pământului, iar pe pământ în condițiile unui cer senin are o valoare medie de 1[KW/m²].

Puterea electrică obținută de la soare pe un m² (utilizând tehnologia actuală a PV) este de aproximativ 150[W] [Anu 2014, Bat 2013, Cal 2013, Che 2007].

Potențialul energetic solar este dat de cantitatea medie de energie provenită din radiația solară incidentă în plan orizontal care, în România, pe an, este de circa 1100 kWh/m² [Bhu 2013, Fer 2014, Fre 2010, Gon 2005].

Harta radiației solare din România s-a elaborat pe baza datelor medii multianuale înregistrate de Institutul Național de Meteorologie și Hidrologie (INMH), procesate și corelate cu observații și măsurători fizice efectuate pe teren de instituții specializate [Ion 2012, Isl 2016, Jai 2007, Kar 2005].

În România s-au identificat cinci zone geografice (0-IV), diferențiate în funcție de nivelul fluxului energetic măsurat, acestea fiind prezentate în Tabelul 2.2 [Gan 2012]. Distribuția geografică a potențialului energetic solar relevă că mai mult de jumătate din suprafața României beneficiază de un flux anual de energie cuprins între 1000 kWh/m² -an. și 1300 kWh/m² -an.

Tabelul 2.2. Distribuția potențialului energetic solar din România

Zona	Potențialul energetic solar înregistrat
0	Peste 1250 kWh/m²/an
I	1250 kWh/m²/an→1150 kWh/m²/an
II	1150 kWh/m²/an→1050 kWh/m²/an
III	1050 kWh/m²/an→950 kWh/m²/an
IV	Sub 950 kWh/m²/an

Conversia radiației solare în energie electrică se realizează cu instalații cu panouri fotovoltaice (PV) alcătuite din module solare cu configurații și dimensiuni diferite. Potențialul exploatabil al producerii de energie electrică prin sisteme fotovoltaice este de aproximativ 1200[GWh]/an [Cat 2013].

Costul investiției pentru realizarea de SPV în rețea de module solare a înregistrat o evoluție favorabilă în ultimele decenii, prețul unui modul solar s-a diminuat sistematic ajungând în prezent la circa 4\$/1W(instalat) [Mal 2017, Pat 2018, Sub 2017].

Prețul energiei electrice produse din surse solare fotovoltaice variază între 25 cenți/kWh și 50 cenți/kWh [Lui 2018, Moh 2018, Nav 2017, Osa 2017]. Pentru alimentarea unor consumatori izolați și consumatori mici de energie, SPV oferă o alternativă economică atractivă, dacă se ține seama de costul ridicat pentru racordarea consumatorilor la rețeaua electrică aferentă sistemului energetic național.

În România s-au realizat SPV cu puteri variate și în regim de funcționare diferențiat în cadrul unor programe de cercetare-dezvoltare-demonstrare, astfel:

- sisteme autonome utilizate pentru alimentarea unor consumatori izolați, înscrise ca obiective în programul de electrificare rurală;
- sisteme conectate la rețeaua electrică (stații-pilot fotovoltaice cu panouri mobile, sisteme integrate în imobile ș.a.).

În România media multianuală pe m² a energiei solare disponibile este de : [Gan 2012]

$E_{an}=1100[\text{KWh/m}^2/\text{an}]$ fiind aproximativ la jumătatea intervalului POL-ECUATOR
 $E_{POL}=0\div 200[\text{KWh/m}^2/\text{an}], E_{ECUATOR}=2200[\text{KWh/m}^2/\text{an}]$

2.2. Efectul fotovoltaic

Transformarea directă a energiei solare în energie electrică se bazează pe efectul fotovoltaic prezentat în (Fig. 2.2), care constă în dislocarea unui electron din atomul semiconductorului de tip p sub acțiunea fotonului de energie $h\nu$ ($h=6.63\cdot 10^{-34}$ [Js], unde h - este constanta lui Planck; ν - este frecvența undei fotonului).

Valoarea frecvenței fotonului incident trebuie să fie cuprinsă între anumite limite astfel încât energia fotonului $h\nu$ să fie suficient de mare ca să scoată din groapa de potențial a atomului electronul ce devine astfel liber, dar să fie mai mică decât energia fotonului ce trece prin rețeaua cristalină a semiconductorului p, fotonul devenind în acest caz neutru [Mar 2012, Moh 2004].

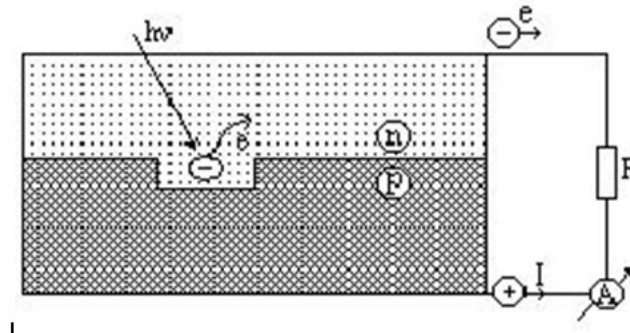


Fig 2.2. Efectul fotoelectric

Energia fotonului este maximă în domeniul ultraviolet ($\nu=10^{15}$ [Hz]) și minimă în domeniul infraroșu ($\nu=2\cdot 10^{14}$ [Hz]):

$$E_{\text{ultraviolet}}=h\cdot\nu=6.63\cdot 10^{-19}[\text{J}]=4.1[\text{eV}];$$

$$E_{\text{infraroșu}}=h\cdot\nu=1.3\cdot 10^{-19}[\text{J}]=0.8[\text{eV}]$$

Energia fotonului "ultraviolet" trebuie să fie suficient de mare pentru a scoate electronul din groapa de potențial în care se afla în atomul semiconductorului p și să-i imprime o energie suficient de mare ca acest electron, devenit liber, să treacă prin rezistența de sarcină R, ajungând în final în semiconductorul p unde se recombina și revine, astfel, în groapa de potențial de unde a fost dislocat de fotonul de energie $h\nu$ inițial.

Electronii din semiconductorul p, ca urmare a absorbției energiei fotonilor incidenti, devin liberi parcurgând semiconductorul n, rezistența de sarcină R și ajung din nou în semiconductorul p unde se recombina cu golurile de aici, formând astfel atomi neutri (Fig.2.3).

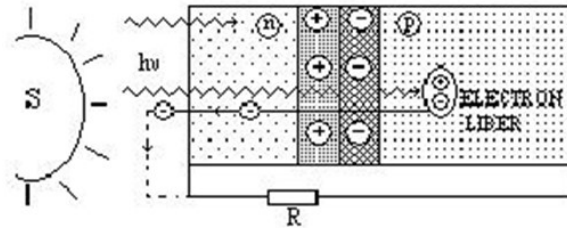


Fig 2.3. Parcursul electronului fotoelectric

Pe parcursul său electronul liber parcurge stări energetice din ce în ce mai mici, starea de energie maximă având-o după ce a trecut zona de contact p-n, iar cea minimă la recombinarea cu golul pozitiv din semiconductorul p.

Energia fotonului $h\nu$ se regăsește în energia electrică din rezistența de sarcină R

În concluzie, apariția curentului electric I (mișcarea ordonată de electroni), se bazează pe principiul energiei minime, în sensul că în natură orice sistem fizic ocupă poziția de energie minimă și poate fi scos din această poziție doar prin consum de energie, în cazul de față energia fotonului $h\nu$.

La SPV problemele de reglaj par simple, mai ales la o insolație constantă în timp, dar ele se complică atunci când se modifică rapid în timp condițiile meteo. Modificându-se valoarea puterii radiante și punctul de putere maximă își schimbă coordonatele, rezistența de sarcină R fiind necesar a se modifica mereu, astfel încât punctele de funcționare să fie cât mai aproape de cele corespunzătoare puterii utile maxime (P_{OPTIM}).

Sistemele de conducere analizate [Jee 2010, Jee 2013, Jif 2013, Jin 2013] nu se bazează pe modelarea matematică a caracteristicii externe a PV deci pe cunoașterea, la o anumită insolație a punctului de optim (putere maximă).

În procesul de conducere modificarea sarcinii și deci deplasarea punctului de funcționare (fig.2.4), pe caracteristica externă, are la bază măsurarea puterii debitate, $P=U*I$.

Acordarea reguletoarelor este o problemă dificilă la modificări rapide ale nivelului de insolație. Funcționarea devine instabilă, apărând oscilații relativ mari în jurul punctului de putere maximă [Li 2008, Lia 2008, Mam 2015, Mid 1996].

Punctele de funcționare "alunecă" spre P_{OPTIM} (după cum se poate vedea în (Fig. 2.4)), prin micșorarea lui R în zona I, respectiv prin mărirea lui R , dacă funcționarea este în zona II, dar procesul poate să nu se stabilizeze și în final punctul de funcționare poate ajunge în punctul A.

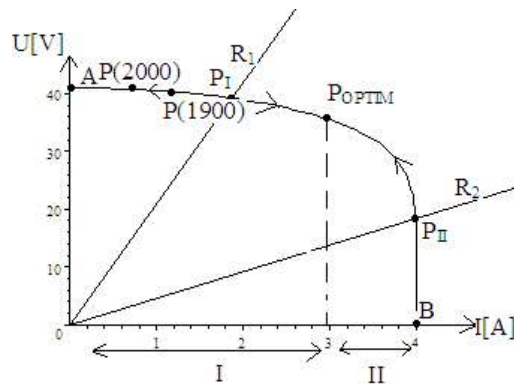


Fig.2.4. Deplasarea punctelor de funcționare pe caracteristica externă a PV

În unele cazuri mărirea sau micșorarea lui R nu asigură funcționarea în P_{OPTIM} , deoarece prin depășirea lui P_{OPTIM} se continuă îndepărtarea de zona optimă, puterea scăzând, ajungându-se sau în A ($I=0$, U_{GOL}) sau în B ($I=I_{SC}$, $U=0$). Acest fapt apare la unele sisteme de conducere, cu precădere la cele la care regulatoarele sunt cele clasice: P, PI sau PID [Cos 2017, Fra 2008, Jai 2007, Mur 2017].

2.3. Stadiul actual al cercetărilor privind conversia energiei solare în energie electrică

În literatura de specialitate [Nea 2003, Oi 2003, Rob 2014, Qua2005, Rok 2017, Sem 1980], preocupările esențiale constau în obținerea unei energii maxime la o insolație dată. În [Par 2013] și [Pro 1985] se prezintă în detaliu metoda micilor perturbații care constă în principiul "*perturbă și observă*". Funcționarea este în acest caz în jurul punctului de putere maximă (Maximum Power Point), MPP, captând o energie sub maximul posibil, aceasta depinzând de parametrii de reglaj. În [Gan 2012] se folosește în reglajul puterii curentul de scurtcircuit al PV care permite estimarea curentului optim, dar cu erori legate de dependența dintre acești doi curenți. În [Mir 2017] se abordează funcționarea sistemului fotovoltaic prin prisma puterii obținute la o anumită insolație și compararea acestor valori cu puterea anterior determinată la un pas de observare dependent de locația respectivă. În [Okp 2013], pe baza metodei micilor perturbații, se obține o energie solară dependentă de intervalul din jurul punctului de putere maximă și se dau referiri privind micșorarea acestui interval. În [Par 2015, Rah 2013, Riz 2008, Sab2015] se folosesc regulatoare adaptive pentru a localiza punctul de putere maximă și se încearcă maximizarea energiei captate prin modificarea parametrilor reguletoarelor folosite.

Avantajele energiei solare sunt:

- accesul la energia solară există în majoritatea țărilor lumii;
- posibilitatea amplasării PV în apropierea locului de consum, evitându-se problemele legate de transportul energiei [Meh 2010] pe distanțe mari;
- sursă de energie regenerabilă nepoluantă;
- se poate edifica treptat un sistem energetic nou [Sin 2013, Suk 2013], care să ia în calcul și sursele de energie solare

Dezavantajele energiei solare sunt:

- neuniformitate de distribuție în timp [Lor 2002, Meh 2010] și indisponibilitatea pe timp de noapte;
- posibilități de stocare dificile și costisitoare, neputându-se crea rezerve pe termen lung.

Sursele de energie solară pentru alimentarea cu energie electrică au o pondere din ce în ce mai mare [Ale 2013], ca urmare a penuriei de energie la nivel mondial [Anu 2013]. Folosirea energiei solare în comunitățile izolate reprezintă o soluție realistă, atractivă, în comparație cu alimentarea cu energie electrică produsă de generatoare diesel, care nu sunt avantajoase din cauza consumului de carburant, de preț și poluare [Osa 2017].

Fluctuațiile de putere cauzate de factorii meteo face ca energia solară să implice sisteme de stocare a energiei care să poată oferi consumatorilor energia necesară la valorile și momentele de timp impuse de aceștia [Ket 2005, Tib 2012].

Sistemele electroenergetice cu panouri fotovoltaice pot fi o soluție rentabilă la o funcționare în regim insular [Lui 2018].

Sistemele de stocare a energiei solare cele mai importante sunt, [Nav 2017]:

- acumulatele electrice (AE) prin intermediul unui convertor DC-DC.
- supercondensatoarele, (SC) [Fre2010], se folosesc la puteri mici. La puteri de ordinul MW folosirea SC nu se justifică și deci sistemul de stocare conține numai acumulate electrice (AE).

Sistemele electroenergetice solare oferă o soluție de mare perspectivă în asigurarea necesarului de energie electrică mereu ascendent [Osa 2017]

În prezent randamentele sunt mici, în jurul valorii de 15%, dar se preconizează o creștere a randamentelor în jurul valorii de 20% [Sar 2018].

În România sunt cinci zone geografice (0-IV), diferențiate de nivelul fluxului energetic [Mir 2017].

Potențialul exploatabil al producerii de energie electrică prin sisteme fotovoltaice este de aproximativ 1200[GWh]/an [Zhi 2017].

Prețul unui modul solar s-a diminuat sistematic ajungând, în prezent la circa 4\$/1W (instalat) [Osa 2017, Yaw 2018].

În general, în lucrările ce au în vedere producerea de energie electrică din energie solară prin efect fotovoltaic [Meh 2014, Nad 2017, Nai 1990, Osa 2017], se preconizează ca sistemul fotovoltaic PV să funcționeze în punctele de putere maximă [Rab 2010, Rah 2013, Rat 2015, Rei 2010, Sim 2001, Sem 2011-1]. Coordonatele punctului de putere maximă (tensiune: U_{OPTIM} , curent: I_{OPTIM}) se modifică în timp, depinzând de condițiile meteo (intensitatea radiației solare) și din acest motiv sarcina echivalentă la bornele modulului PV trebuie corelată cu valoarea intensității radiației solare [Sin 2013, Sne 2013, Sob 2012, Sun 2009].

Caracteristicile externe $U=f(I)$ ale panoului fotovoltaic PV se modifică în funcție de nebulozitatea din atmosferă.

Cu modificarea curentului de sarcină, puterea obținută de la un panou fotovoltaic se modifică semnificativ atingând o valoare maximală la curentul I_{OPTIM}

Conducerea sistemelor cu PV trebuie să realizeze mereu funcționarea la P_{OPTIM} , mai ales că această valoare se modifică în permanență în funcție de gradul de insolație (nori, ceață, poluare).

Coordonatele punctului de putere maximă, (tensiune: U_{OPTIM} , curent: I_{OPTIM}), depind de intensitatea radiației solare [Fat 2018, Him 2018, Vel 2009, Wal 2014].

Așadar, puterea primită de la Soare se modifică continuu și sistemul, (panou fotovoltaic PV, convertor de putere DC-DC și acumulator electric de stocare AE, (PV+DC-DC+AE) (Fig 2.5), trebuie să fie astfel reglat încât să funcționeze în punctul de putere maximă [Mir 2017, Ric 2017, Sev 2018].

Așa cum se va demonstra în lucrare, conducerea sistemului (PV + DC-DC + AE), având în vedere puterea debitată măsurată, nu realizează o captare maximă a energiei solare disponibile.

Prin modificarea rezistenței de sarcină echivalente de la bornele SPV se dorește ca funcționarea sistemului să fie cât mai aproape de punctul de putere maximă, dar acest punct nefiind cunoscut se realizează o funcționare la o putere sub cea maximă [Pil 2017, Sad 2018, Sar 2018]. Toate aceste metode de modificare a rezistenței de sarcină echivalente presupun costuri ridicate pentru echipamentele electronice complexe, în speță convertoare DC-DC, [Aek 2017, Ais 2017, Ben 2017-1, Cos 2017, Cos 2017-1, Son 2017] și în multe aplicații investițiile devin nerentabile.

O soluție mult mai eficientă este aceea ce se bazează pe coordonatele punctului de putere maximă: U_{OPTIM} , tensiune și I_{OPTIM} , curent. În acest sens se modelează matematic caracteristicile externe, $U(I)$, ale panoului fotovoltaic PV.

După cum s-a menționat, puterea primită de la soare se modifică continuu iar sistemul (PV + DC-DC + AE) (Fig2.5), trebuie să fie astfel reglat încât să funcționeze în apropierea punctului de putere maximă. Pentru realizarea acestui regim de funcționare se impune ca între PV și AE să existe un convertor DC-DC iar acesta face ca sistemul să devină scump.

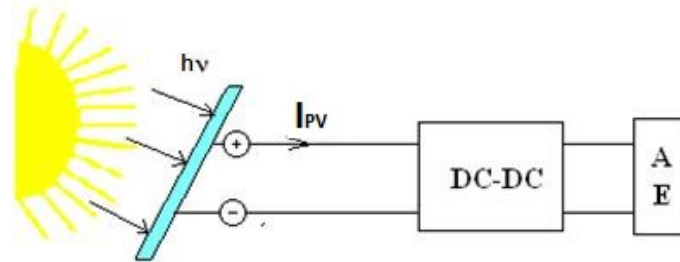


Fig 2.5. Sistemul: (PV + (DC-DC) + AE)

Pentru a reduce costurile instalațiilor energetice solare trebuie realizate echipamente ieftine și eficiente, așa cum se propune în prezenta lucrare.

Prin modelarea matematică a caracteristicilor tensiune-curent se propune o estimare, prin calcularea energiei obținute, a rentabilității funcționării sistemului PV+AE.

Coordonatele punctului de putere maximă P_{OPTIM} , (U_{OPTIM} , I_{OPTIM}) se modifică în timp, depinzând de condițiile meteo (intensitatea radiației solare P_s) și din acest motiv sarcina echivalentă la bornele panoului fotovoltaic PV trebuie corelată cu valoarea intensității radiației solare [Sun 2017, Tan 2014, Teo 2012, Ton 2013].

Prin măsurarea puterii radiante solare P_s [Zhi 2017] se pot determina mărimile importante ce caracterizează funcționarea PV în punctele de putere maximă, MPP și anume:

- rezistența de sarcină optimă R_{OPTIM} ;
- puterea electrică utilă maxim disponibilă: P_{OPTIM} ;
- curentul I_{OPTIM} și tensiunea U_{OPTIM} corespunzătoare punctului de putere maximă.

Determinarea coordonatelor punctului de putere maximă, (MPP sau P_{OPTIM}) (Fig 2.6), se bazează pe caracteristicile externe $U=f(I)$ (Fig. 2.6) ale panoului fotovoltaic PV, caracteristici care se modifică în funcție de nebulozitatea din atmosferă.

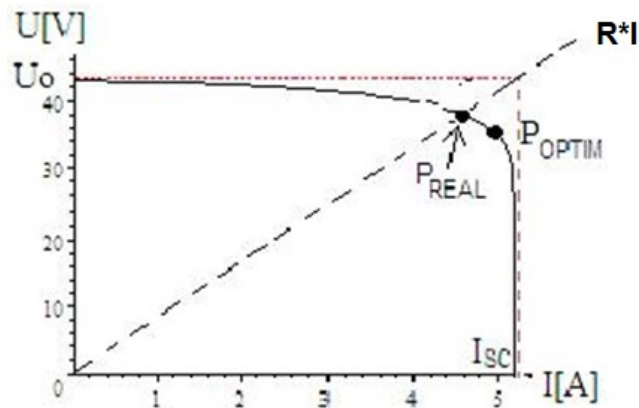


Fig 2.6. Caracteristicile externe $U=f(I)$

2.4. Concluzii

Analizând evoluția ultimilor ani a SES, se poate trage concluzia că pe plan mondial dezvoltarea energetică s-a făcut și prin atragerea surselor regenerabile de energie solară. Acestea au însă un caracter variabil, astfel că se impune stocarea energiei obținute de la soare pentru perioadele în care captarea acestor energii este foarte mică sau chiar deloc (noaptea). După hidroenergie, energia solară și cea eoliană prezintă cea mai mare rată de integrare, atât în România cât și la nivel mondial.

Stadiul actual al utilizării surselor regenerabile solare pe plan mondial și în România demonstrează interesul pentru abordarea acestui aspect.

3. MODELAREA PANOURILOR FOTOVOLTAICE

În cadrul acestui capitol se dezvoltă modele matematice (MM), pentru panourile fotovoltaice (PV), fiind propus un MM original și două MM simplificate, bazate pe funcția cos. Pe baza modelelor respective se pot determina coordonatele MPP. Parametrii modelelor matematice realizate depind de datele furnizate de firmele producătoare de PV.

Având în vedere tendința constantă de ridicare a valorilor randamentului de conversie atât pentru energia eoliană cât și pentru energia solară, sistemele de conducere impun folosirea unor modele matematice adecvate [Ben 2017-1, Sar 2018].

Determinarea modelelor matematice trebuie astfel realizată încât să se considere influența modificării nivelului de insolație pentru PV [Pro 1985, Rok 2017, Tan 2014].

Din datele obținute din literatura de specialitate [Any 2013, Gon 2005, Liq 2013, Meh 2014, Ton 2013], la baza MM stau diferite caracteristici de funcționare. În prezenta lucrare s-au considerat esențiale pentru panourile fotovoltaice (PV), caracteristicile externe: tensiune-curent

La acumulatele electrice modelul matematic folosit permite estimarea stării de încărcare.

Din cauza complexităților de evaluare a procesului de conversie din interiorul panoului fotovoltaic, în prezent nu există un model standard pentru PV.

3.1. Problematika modelării panourilor fotovoltaice

Ca și generator electric, panourile fotovoltaice realizează o conversie a energiei solare în energie electrică.

Caracterizarea unui panou fotovoltaic se face printr-o familie de funcții generată de valorile radiației solare, ce exprimă legăturile dintre tensiunea și curentul debitat de la borne, așa numită *caracteristica externă (CE)*: $U=f(I)$

În energetica ultimelor decenii energia solară s-a dezvoltat semnificativ, mai ales pe baza realizărilor din domeniul cercetărilor impuse de cucerirea spațiului cosmic [Pat 2018, Tah 2017, Zon 2017].

Conducerea sistemelor energetice solare, astfel încât funcționarea să fie în zona optimă – energie maxim captată – impune folosirea unor MM adecvate, modele care să permită în fiecare moment identificarea punctului de putere maximă.

Caracteristicile externe $U=f(I)$ ale PV se modifică în funcție de oră, de nebulozitatea din atmosferă și sunt de forma celor din (Fig. 3.1.a).

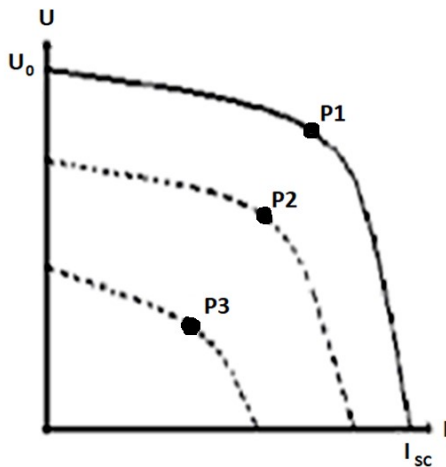


Fig.3.1.a. Caracteristici $U = f(I)$

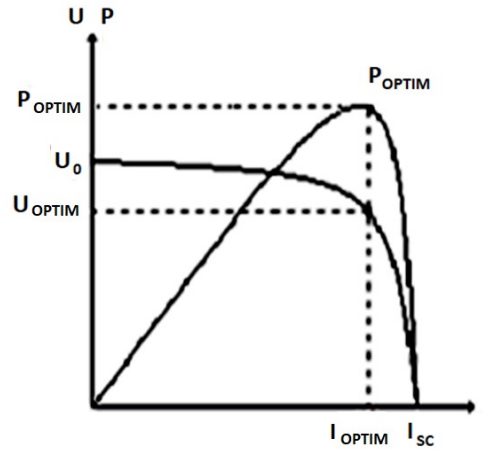


Fig.3.1.b. Caracteristicile puterii $P(I)$ și tensiunii $U(I)$

Fig.3.1 Caracteristici ale panoului fotovoltaic (PV)

Caracteristica $U=f(I)$ cu punctul de putere maximă P_1 corespunde radiației solare maxime : $P_S = 1[\text{KW}/\text{m}^2]$, (I_{sc} = curentul de scurtcircuit).

Caracteristica $U=f(I)$ cu punctul de putere maximă P_2 corespunde radiației solare: $P_S = 0.8[\text{KW}/\text{m}^2]$, iar cea cu putere maximă P_3 unei radiații solare: $P_S=0.6[\text{KW}/\text{m}^2]$.

Puterea obținută de la un panou fotovoltaic se modifică semnificativ cu modificarea curentului de sarcină I (Fig. 3.1.b.), atingând o valoare maximală P_{OPTIM} la curentul I_{OPTIM} și respectiv tensiunea U_{OPTIM} , $P_{OPTIM} = U_{OPTIM} I_{OPTIM}$.

La estimarea valorii puterii utile maxime, importantă este valoarea ariei suprafeței dreptunghiului de laturi U_{OPTIM} și I_{OPTIM} , aceasta trebuind să fie cât mai aproape de cea reală, aspect urmărit în construcția modelelor. Se realizează astfel, cu modelele matematice propuse, o estimare corectă a puterii.

Conducerea sistemului cu PV, trebuie să realizeze mereu funcționarea la putere maximă P_{OPTIM} . Această valoare se modifică în permanență, în funcție de gradul de insolație (nori, ceață, poluare) definit de puterea radiantă solară P_S .

Coordonatele punctului de putere maximă, depind de gradul de insolație.

Așadar, puterea primită de la Soare se modifică continuu iar sistemul (PV+DC-DC+AE) trebuie să fie astfel reglat încât să funcționeze în punctul de putere maximă.

3.2. Modelul matematic al panoului fotovoltaic: MM-PV

În cele ce urmează, construcția MM ale SPV ține cont doar de interesele legate de conducerea sistemelor PV și anume funcționarea SPV la putere maximă. Modelul matematic al PV propus se referă la caracteristicile externe și se determină pe baza caracteristicilor externe experimentale, furnizate de producător, de tipul celor reprezentate în (Fig. 3.2):

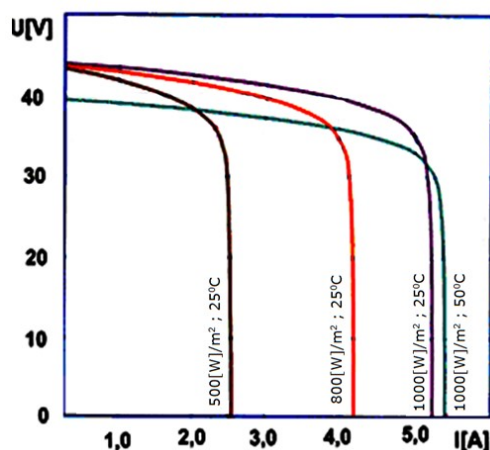


Fig.3.2.Caracteristici externe experimentale

Dezvoltarea MM-PV se efectuează analizând caracteristicile externe experimentale, ținând cont de următoarele **observații**:

- 1 Valorile curenților la scurtcircuit (I_{SC}), cresc cu puterea radiantă solară P_S .
- 2 Valorile tensiunilor de la funcționarea în gol nu depind de valoarea puterii radiante P_S .
- 3 Temperatura (T) a panoului fotovoltaic (PV) influențează valoarea curentului de scurtcircuit, în sensul că acesta crește direct proporțional cu temperatura.
- 4 Valorile tensiunilor la funcționarea în gol se micșorează cu creșterea temperaturii T a panoului fotovoltaic (PV).
- 5 Forma caracteristicii externe experimentale se apropie de forma funcției $\cos(X)$ pe intervalul $[0 - \pi/2]$, deci se poate scrie:

$$U(I) = U(0) \cdot \cos(X)$$

- 6 Cele două valori extreme sunt mărimile :
 - tensiunea în gol, U_0 (pentru $x=0$)
 - curentul de scurtcircuit I_{SC} (pentru $x=\pi/2$)
- 7 Având în vedere observațiile 5 și 6, în funcția \cos se poate alege pentru X , o expresie de forma [Gan 2010]: $X=f(I,T,P_S)$, și anume:

$$X = \frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b} \quad (3.1)$$

cea ce arată că se ține seama de puterea radiantă P_s^b , de temperatura T și de curentul debitat I .

Relația (originală) 3.1 a fost determinată pe cale experimentală. Ideea acestei relații a pornit de la asemănarea funcției cosinus cu caracteristica externă a PV, furnizată de către producător și relația a fost constant îmbunătățită prin încercări repetate, pentru a se putea mula cât mai exact peste caracteristica oferită de producător până când s-a obținut o transpunere relativ exactă peste aceasta.

Coeficienții a, b și g urmează să fie determinați ulterior.

De influența curentului I se ține seama prin parametrul „ a ”, iar de temperatura T prin parametrul „ g ”. Coeficienții a, b , și g urmează a fi determinați. Coeficientul b se justifică prin faptul că influența puterii radiante solare P_s asupra caracteristicilor externe modelate impune o dependență de forma P_s^b pentru ca cele două caracteristici externe, cea modelată și cea experimentală, să se apropie cât mai mult.

La o dependență de forma P_s (fără exponent), caracteristicile modelate verifică numai valorile extreme: curenții la scurtcircuit și tensiunile în gol, dar nu și valorile intermediare. Din acest motiv se consideră P_s^b și caracteristica modelată trece în acest fel și prin punctele intermediare.

- 8 Forma caracteristicilor externe experimentale recomandă ca funcția $\cos(x)$ să fie considerată la puterea c , caz în care caracteristica modelată se apropie de cea reală.

$$\left(\cos\left(\frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b}\right)\right)^c \quad (3.2)$$

- 9 Analizând forma caracteristicilor externe la mai multe PV și respectiv temperaturi T , tensiunea în gol U_0 , se poate considera de forma :

$$U_0 = (d - T \cdot f), \quad (3.3)$$

Coeficienții d și f rezultă din tensiunea în gol la temperatura T , deoarece valoarea tensiunii în gol scade cu creșterea temperaturii T .

Pe baza acestor observații, pentru caracteristica externă, se poate scrie o expresie de forma[Gan 2010, Gan 2011]:

$$U(I) = U_0 \cdot \left(\cos\left(\frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b}\right)\right)^c, \quad (3.4)$$

tensiunea maximă obținându-se pentru:

$$\left(\cos\left(\frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b}\right)\right)^c = 1 \quad (3.5)$$

și este chiar U_0

Rezultă astfel pentru **modelul matematic MM-PV** propus, o expresie de forma:

$$U(I) = (d - T \cdot f) \cdot \left(\cos\left(\frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b}\right) \right)^c \quad (3.6)$$

unde:

a, b, c, d, f, g sunt parametri modelului, iar acestia se determină din caracteristicile externe experimentale (Fig. 3.2). (De remarcat că notația **e** lipsește din această enumerație deoarece softul de calcul matematic utilizat consideră **e** definit ca și constanta lui Euler-Mascheroni)

T este temperatura panoului fotovoltaic

P_s este puterea radiantă solară

U este tensiunea la borne

I este curentul debitat

Pentru cunoașterea completă a MM-PV este necesară deci determinarea a șase necunoscute (a,b,c,d,f,g), fiind astfel necesare șase ecuații.

Determinarea coordonatelor punctelor de putere electrică maximă - P_{OPTIM}

Determinarea coordonatelor punctelor de putere electrică maximă (Fig. 3.3), notată P_{OPTIM}, tensiunea : U_{OPTIM} și curentul: I_{OPTIM}, se face prin anularea derivatei puterii electrice: P=U·I în raport cu I:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI} \left((d - T \cdot f) \cdot \left(\cos\left(\frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b}\right) \right)^c \cdot I \right) = 0 \quad (3.7)$$

Din ecuația 3.7 se determină curentul I_{OPTIM}

$$I_{OPTIM} = T \frac{g}{P_s^c \left(\frac{a}{P_s^c} + a \frac{c}{P_s^c} \right)} \quad (3.8)$$

pe baza căruia se pot obține:

- tensiunea U_{OPTIM}:

$$U_{OPTIM} = (d - T \cdot f) \cdot \left(\cos\left(\frac{a \cdot I_{OPTIM} - g \cdot T}{P_s^b}\right) \right)^c \quad (3.9)$$

- puterea P_{OPTIM} :

$$P_{OPTIM} = U_{OPTIM} \cdot I_{OPTIM} \quad (3.10)$$

- rezistența de sarcină optimă :

$$R_{OPTIM}: R_{OPTIM} = \frac{U_{OPTIM}}{I_{OPTIM}} \quad (3.11)$$

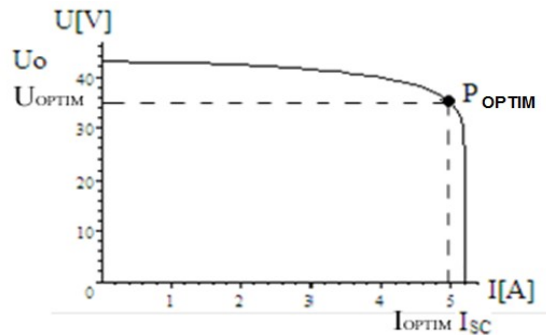


Fig.3.3 Punctul de putere maximă P_{OPTIM}

3.3. Determinarea experimentală a caracteristicilor externe

Validarea modelului MM-PV se face prin compararea caracteristicii externe experimentale cu cea modelată. Așa cum se observă în (Fig. 3.4) cele două caracteristici sunt foarte apropiate, în cel mai defavorabil caz erorile fiind sub 2 %.

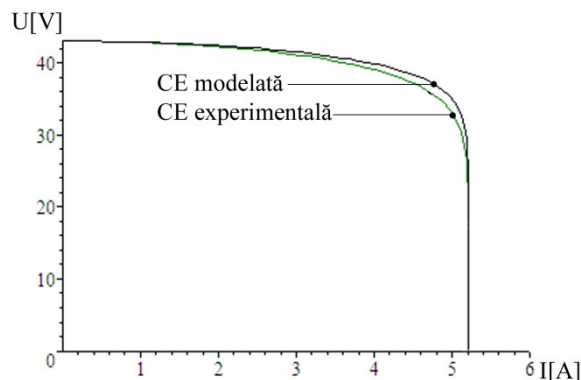


Fig.3.4 Comparație între caracteristica modelată și caracteristica experimentală

Firmele constructoare, de regulă, furnizează caracteristicile externe $U(I)$ la diverse puteri radiante solare P_s și la diferite temperaturi T . Aceste date sunt utile doar pentru o perioadă scurtă de timp, (eventual de ordinul lunilor), după care, datorită radiațiilor solare, depunerilor de praf și a modificărilor în structura elementelor semiconductoare ce alcătuiesc PV, caracteristicile externe își modifică forma, fiind deci necesară o nouă evaluare a lor. Determinarea caracteristicilor $U(I)$ se poate face exact numai experimental, pentru fiecare panou fotovoltaic (PV) în parte, sau doar pentru cele mai importante ca și poziție în locația respectivă. Prin determinarea periodică, pe cale experimentală, a caracteristicilor externe $U(I)$ se poate cunoaște în orice moment de timp valoarea maximă a puterii electrice utile $P=UI$, și astfel se poate regla sarcina la PV astfel încât energia solară captată să fie

maximă. Prin acest procedeu de conducere se realizează un maxim energetic la un cost scăzut și în timp util.

Actualizarea experimentală a caracteristicilor externe depinde de locația în care funcționează panourile fotovoltaice PV, în sensul că se are în vedere:

- gradul de poluare cu depuneri de praf;
- modificările meteorologice din timpul zilei.

Experimental problema poate fi rezolvată utilizând o schemă de montaj de tipul celei prezentate în (Fig. 3.5), care permite și determinarea punctelor de funcționare extreme A și B (Fig. 3.6).

Metodă de determinare experimentală a caracteristicilor externe :

Se măsoară tensiunea $U_0=U_A$

(prin deschiderea întrerupătoarelor K_1 și K_2 , din (Fig. 3.5), la curentul $I=0$.)

De asemenea prin închiderea lui K_1 se măsoară curentul:

$$I_{SC}=I_B \text{ la } U=0$$

Se cunosc astfel cele două puncte de funcționare extremă: gol (punctul A) și scurtcircuit (punctul B) (Fig. 3.6).

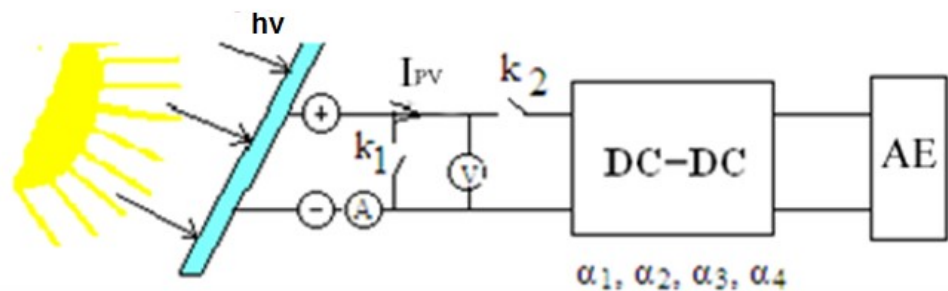


Fig.3.5 Schema de montaj

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - valorile unghiului de conducție a elementelor de comutație din DC-DC;
 $h\nu$ - energia fotonului; h - constanta lui Planck; ν - frecvența de oscilație a fotonului

Două puncte (A și B) au fost determinate deja, rămânând de determinat doar patru relații, corespunzătoare a patru puncte de pe caracteristica externă, C,D,E,F (Fig. 3.6). Aceste puncte se pot determina simplu, prin măsurarea tensiunii cu voltmetrul (V) și a curentului cu ampermetrul (A), la patru valori: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ și α_4 , ale unghiului de conducție, sau a factorului de umplere a elementelor de comutație din convertorul DC-DC.

Toate testele sunt făcute la temperatura panoului T și puterea radiantă solară P_s .

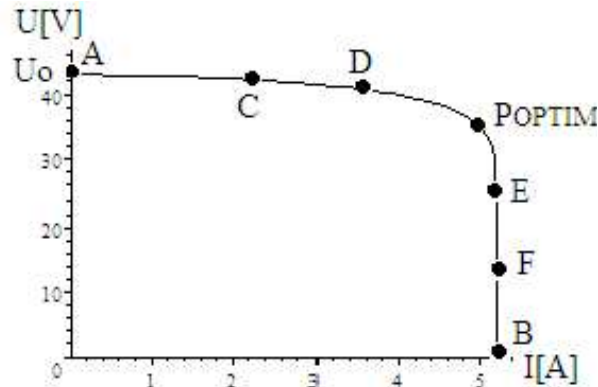


Fig.3.6 Determinarea experimentală a caracteristicilor externe

Timpul necesar măsurătorilor experimentale este redus (ordinul secundelor), deci pierderile de energie datorate nefuncționării sistemului la parametri optimi fiind nesemnificative.

Determinarea experimentală a caracteristicilor se poate face la diverse puteri radiante solare P_s și la diferite temperaturi T în mai multe momente ale zilei, cunoscându-se astfel foarte exact dependența $U(I)$. Sunt astfel determinate coordonatele punctului de putere maximă P_{OPTIM} , tensiunea - U_{OPTIM} , curentul - I_{OPTIM} .

3.4. Identificarea parametrilor MM-PV

3.4.1 Identificarea parametrilor modelului matematic MM-PV la temperatura T constantă

Identificarea parametrilor MM-PV se face pe baza caracteristicilor externe experimentale (vezi Fig.3.2) la o temperatură T dată, considerată de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectiv T_1 de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ adică

$$T=[273.15+25][K] \text{ și } T_1=[273.15+50][K] \quad (3.12)$$

Din caracteristicile externe experimentale se determină parametri modelului, adică a, b, c, d, f și g considerând următoarele regimuri de funcționare:

Funcționarea în gol:

- Pentru: $P_s = 1000[W], I = 0 [A],$ (3.13)

$$T = (273.15 + 25.)[K] \text{ și}$$

$$U_0 = 43[V] \quad (3.14)$$

folosind relația 3.3 rezultă:

$$43. = d - (273.15 + 25.)f \quad (3.15)$$

deoarece tensiunea în gol este maximă și se obține la $\cos(X)=1$ (punctul **A**)

- Pentru: $P_s = 1000[W], I = 0 [A],$ (3.16)

$$T_1 = (273.15 + 50.)[K] \text{ și} \quad (3.17)$$

$$U_0 = 39[V] \quad (3.18)$$

rezultă:

$$39. = d - (273.15 + 25.)f \quad (3.19)$$

$$\text{cu soluțiile: } \{f = 0.16, d = 90.704\} \quad (3.20)$$

Pentru determinarea celorlalți parametri se consideră următoarele regimuri de funcționare:

Regimul de scurtcircuit:

$$\bullet \text{Pentru : } P_s = 1000[W], I = 5.2 [A], \quad (3.21)$$

$$T = (273.15 + 25.)[K] \quad (3.22)$$

$$U_0 = 0[V] \quad (3.23)$$

deoarece pentru $U_0=0$ argumentul funcției „cos” este $\pi/2$ ($\cos(\pi/2)=0$), rezultă (din rel.3.6 și Fig.3.6):

$$\left(\frac{a5.2 - g(273.15 + 25.)}{1000.b} \right) = \frac{\pi}{2}; \quad (\text{punctul B}) \quad (3.24)$$

Regimul de funcționare în sarcină:

$$1) \text{ Pentru: } P_s = 1000[W], I = 2.4 [A], \quad (3.25)$$

$$T = (273.15 + 25.)[K] \quad (3.26)$$

$$U = 40.5[V] \quad (3.27)$$

rezultă:

$$40.5 = 43 \left(\cos \left(\frac{a2.4 - g(273.15 + 25.)}{1000.b} \right) \right)^c; \quad (\text{punctul C, Fig.3.6}) \quad (3.28)$$

$$2) \text{ Pentru: } I = 5[A], U = 35[V] \quad (3.29)$$

$$T = (273.15 + 25.) \quad (3.30)$$

se obține:

$$35. = 43. \left(\cos \left(\frac{a5 - g(273.15 + 25.)}{1000.b} \right) \right)^c - (\text{punctul } \mathbf{P_{OPTIM}}) \quad (3.31)$$

$$3) \text{ Pentru: } P_s = 1000[W / m^2], \quad (3.32)$$

$$T = (273.15 + 25.), \quad (3.33)$$

$$I = 3.8291[A] \quad (3.34)$$

rezultă:

$$36.474 = 43. \left(\cos \left(\frac{a3.8291 - g(273.15 + 25.)}{1000.b} \right) \right)^c - (\text{punctul D}) \quad (3.35)$$

Pe baza rezultatelor obținute se obțin în final pentru parametri următoarele valori:
 $a=446.32$; $b=1.0566$; $c= 7.3737 \times 10^{-2}$; $d=90.704$; $f= 0.16$ (3.36)

Caracteristica externă modelată pentru $P_s=1000[W]$ este reprezentată în (Fig. 3.7).

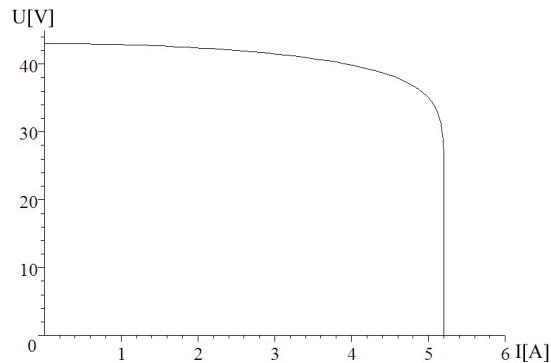


Fig.3.7 Caracteristica externă modelată ($P_s=1000[W]$)

3.4.2. Modele matematice simplificate, MM-PVS1 și MM-PVS2, pentru cazul temperaturii T constante

În cazul considerării unei temperaturi T constante se poate opera cu MM simplificate:

Se propun două modele simplificate:

MM simplificat 1 : MM-PVS1, cu determinarea a trei parametri funcționali: **a, b și c**.

$$U(I) = U_0 \left(\cos \left(\frac{aI}{P_s^b} \right) \right)^c \quad (3.37)$$

MM simplificat 2 : MM-PVS2, cu determinarea a doi parametri funcționali : **a și c**, deoarece influența exponentului b poate fi mai redusă relativ la forma caracteristicii externe $U=f(I)$, pentru anumite tipuri de PV.

$$U(I) = U_0 \left(\cos \left(\frac{aI}{P_s} \right) \right)^c \quad (3.38)$$

3.4.2.1 MM-PVS1, studii de caz:

Studiu de caz 1

Validarea MM-PVS1

Pentru modelul MM-PVS1 se consideră caracteristicile externe experimentale, $U=f(I)$, furnizate de producător, prezentate în (Fig. 3.2), iar pentru temperatură s-a ales valoarea $T=273.15+25$, considerând că aceasta este temperatura de funcționare optimă, aflată la jumătatea axei de temperatura oferita de producator (pe caracteristica externă).

Caracteristica se poate modela pornind de la relația 3.37, unde $U_0=43[V]$

Modelul MM-PVS1 (rel.3.37) pentru valorile determinate ale parametrilor (3.36) devine:

$$U(I) = U_0 \left(\cos \left(\frac{446.32 \cdot I}{P_s^{1.0566}} \right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} \quad (3.39)$$

Pentru $U_0=43[V]$ și nivelul de radiație solară $P_s=1000[W/m^2]$, $800[W/m^2]$ și $500[W/m^2]$ se obțin caracteristicile din (Fig. 3.8), care aproximează relativ bine caracteristica dată de producător, ceea ce confirmă corectitudinea modelului.

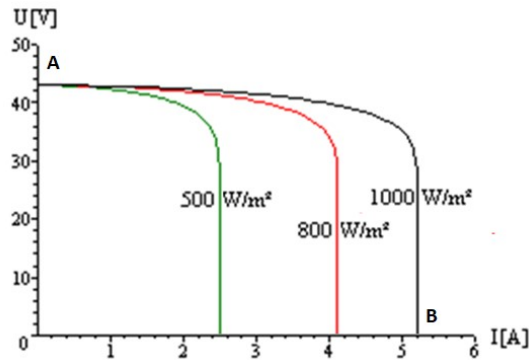


Fig.3.8 Caracteristicile externe modelate la $T=(273.15+25)K$

Studiu de caz 2:

Determinarea mărimilor de optim : I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , P_{OPTIM} , R_{OPTIM} pentru diferite valori ale nivelului de radiație solară (insolație) P_s , P_s fiind considerat constant.

1) Pentru $P_{s1} = 1000[W/m^2]$, adică *cer senin*, tensiunea este:

$$U(I) = 43 \cdot \left(\cos \left(\frac{446.32 \cdot I}{P_s^{1.0566}} \right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} \quad (3.40)$$

iar puterea electrică devine:

$$P = U \cdot I = 43 \cdot \left(\cos \left(\frac{446.32 \cdot I}{1000^{1.0566}} \right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} \cdot I \quad (3.41)$$

Din condiția de anulare a derivatei puterii

$$\frac{dP}{dI} = 0 \quad (3.42)$$

rezultă curentul optim:

$$I_{OPTIM} = 4.8472[A] \quad (3.43)$$

Pe baza lui se pot obține:

- tensiunea optimă:

$$U_{OPTIM} = 43. \left(\cos \left(\frac{446.32 \cdot 4.8472}{1000 \cdot 1.0566} \right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} = 36.474[V]; \quad (3.44)$$

- puterea optimă:

$$P_{OPTIM} = U \cdot I = 36.474 \cdot 4.8472 = 176.80[W]; \quad (3.45)$$

- rezistența de sarcină optimă:

$$R_{OPTIM} = \frac{U}{I} = \frac{36.474}{4.8472} = 7.5248[\Omega]; \quad (3.46)$$

2) Pentru $P_{S2} = 800 [W/m^2]$, valoare aleasă **pentru cer parțial înorat**, se obțin în mod analog rezultatele:

- curentul optim:	$I_{OPTIM} = 3.8291[A];$
- tensiunea optimă:	$U_{OPTIM} = 36.474[A];$
- puterea optimă :	$P_{OPTIM} = 139.66[W];$
- rezistența de sarcină optimă :	$R_{OPTIM} = 9.5255 [\Omega];$

3) Pentru $P_{S3} = 500 [W/m^2]$, valoare aleasă **pentru cer înorat**, se obțin rezultatele:

- curentul optim:	$I_{OPTIM} = 2.3304[A];$
- tensiunea optimă:	$U_{OPTIM} = 36.473[A];$
- puterea optimă :	$P_{OPTIM} = 84.997[W];$
- rezistența de sarcină optimă :	$R_{OPTIM} = 15.651 [\Omega];$

Din datele obținute se poate determina dependența dintre P_{OPTIM} și P_S , care este una liniară.

La diverse valori ale puterii radiante solare, se obțin cu metoda anulării derivatei puterii, punctele de putere maximă P_{OPTIM} . Aceste puncte sunt pe dreapta de ecuații

$$P_{OPTIM}(P_S) = k \cdot P_S$$

Pentru valorile determinate se obține dependența liniară din rel 3.47, reprezentată în (Fig. 3.9).

$$P_{OPTIM} = 0.1768 \cdot P_S \quad (3.47)$$

De asemenea se poate determina dependența dintre rezistența de sarcină R_{OPTIM} de puterile radiante alese P_S , reprezentă în (Fig. 3.9).

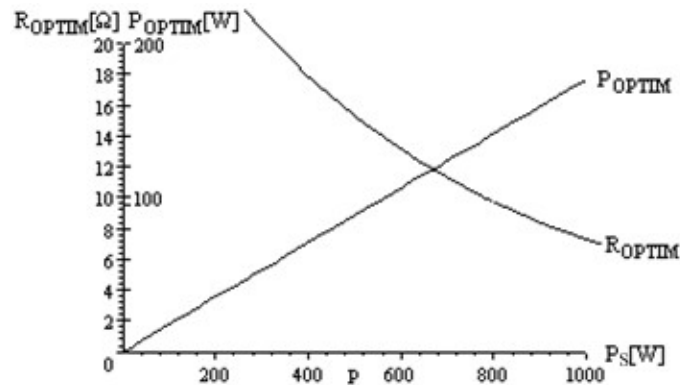


Fig.3.9 Dependența lui P_{OPTIM} și R_{OPTIM} de P_S

În mod analog se determină și dependențele tensiunii și curentului optim, U_{OPTIM} , I_{OPTIM} , funcție de puterea radiantă P_S , reprezentată în (Fig. 3.10).

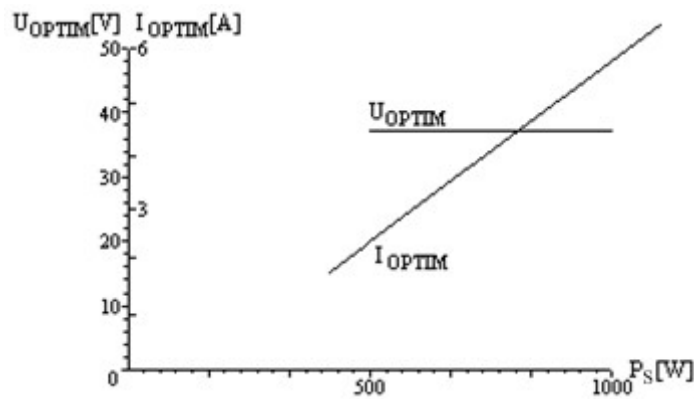


Fig.3.10 Dependența lui U_{OPTIM} și I_{OPTIM} de P_S

Din analiza rezultatelor obținute se desprind următoarele **concluzii**:

- Valorile tensiunii optime U_{OPTIM} se modifică relativ puțin cu P_S .
- Rezistența optimă depinde semnificativ de P_S , scăzând la creșterea lui P_S .
- Puterea electrică debitată maximă, P_{OPTIM} depinde practic liniar de P_S .
- Curentul I_{OPTIM} se modifică liniar cu P_S .

3.4.2.2. MM-PVS2, studii de caz

Studiu de caz 1 Validarea MM-PVS2

Caracteristicile externe ridicate experimental, pentru un PV cu suprafața $S = 0.5[m^2]$, la valori ale puterii radiante $P_s = 189.8; 465.7; 696$ și $883[W/m^2]$, sunt reprezentate în (Fig. 3.11) [Tri 2011]. Pe baza lor se pot determina parametrii a și c ai modelului MM-PVS2 (rel 3.38).

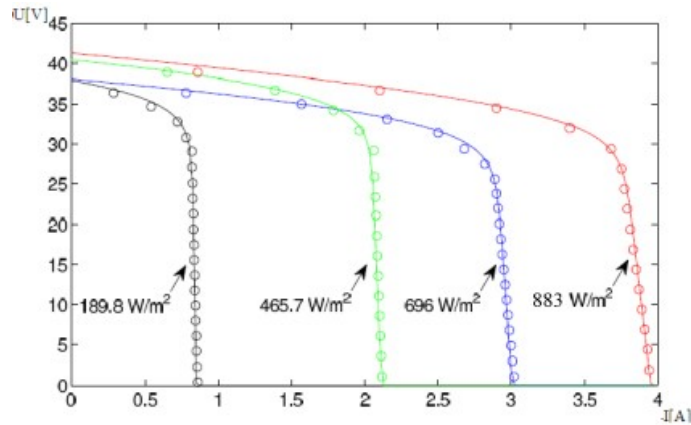


Fig.3.11 Caracteristicile externe experimentale pentru PV având $S=0.5[m^2]$

În acest sens se consideră, de exemplu, caracteristica experimentală a puterii radiante $P_s = 883[W/m^2]$, cu $U_0 = 41[V]$, fiind necesară fixarea a două puncte A și B (Fig. 3.12).

Astfel, s-a ales punctul A de coordonate $U(A) = 38.9[V]$ și $I(A) = 2[A]$, respectiv punctul B de coordonate $U(B) = 32.103[V]$ și $I(B) = 3.5[A]$,

Se obține astfel sistemul de ecuații :

$$\begin{cases} 32.103 = 41 \cdot \left(\cos \frac{a \cdot 3.5}{883} \right)^c \\ 38.9 = 41 \cdot \left(\cos \frac{a \cdot 2}{883} \right)^c \end{cases} \quad (3.48)$$

cu soluțiile:

$$a = 346.58 \quad \text{și} \quad c = 0.15. \quad (3.49)$$

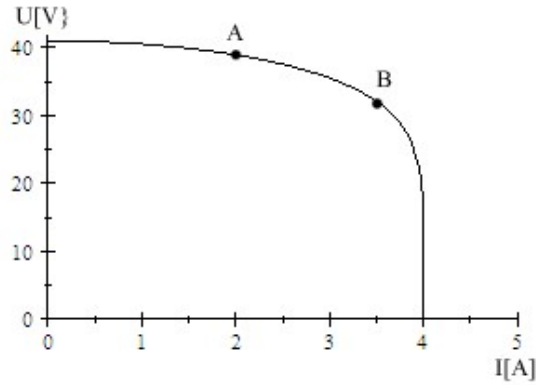


Fig.3.12 Caracteristica externă experimentală

- Astfel, pentru o **putere radiantă P_s oarecare, MM-PVS2** devine :

$$U(I) = 41. \left(\cos \frac{346.58}{P_s} I \right)^{0.15} \quad (3.50a)$$

sau într-o *formă echivalentă* mai convenabilă calculului numeric:

$$U(I) = 41. \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot I \cdot \frac{883}{P_s} \right) \right)^{0.15} \quad (3.50b)$$

Pentru caracteristicile externe experimentale reprezentate în (Fig. 3.11), modelul MM-PVS2 devine:

- pentru $P_{s1} = 883 [W / m^2]$: $U(I) = 41. \left(\cos \frac{346.58}{883} I \right)^{0.15} \quad (3.51)$

- pentru $P_{s2} = 696 [W / m^2]$: $U(I) = 41. \left(\cos \frac{346.58}{696} I \right)^{0.15} \quad (3.52)$

- pentru $P_{s3} = 465.7 [W / m^2]$: $U(I) = 41. \left(\cos \frac{346.58}{465.7} I \right)^{0.15} \quad (3.53)$

- pentru $P_{s4} = 189.8 [W / m^2]$: $U(I) = 41. \left(\cos \frac{346.58}{189.8} I \right)^{0.15} \quad (3.54)$

Corespunzător puterilor radiante solare P_{s1} , P_{s2} , P_{s3} , P_{s4} rezultă caracteristicile prezentate în (Fig. 3.13).

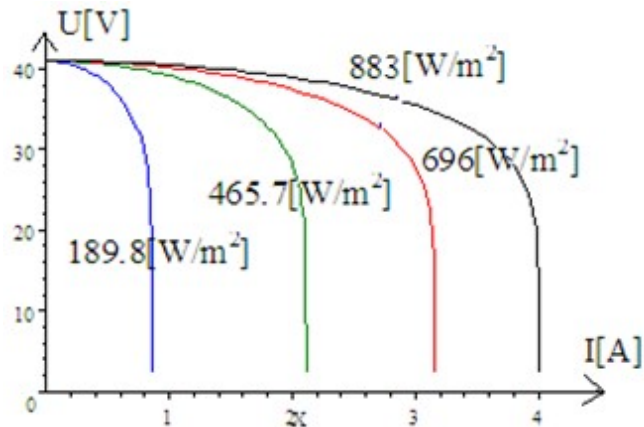


Fig.3.13 Caracteristicile externe modelate cu MM-PVS2

Comparând caracteristicile externe din (Fig. 3.11) cu cele din (Fig. 3.13), se observă că există o bună concordanță între caracteristicile modelate și cele experimentale, ceea ce validează încă o dată corectitudinea modelului matematic MM-PVS2.

Caracteristica $P(I)$, obținută pe baza MM-PVS2 pentru $P_s = 883 [W/m^2]$ este modelată de rel.3.51, fiind reprezentată în (Fig. 3.14).

$$P = UI = 41 \cdot \left(\cos \frac{346.58}{883} I \right)^{0.15} I \quad (3.55)$$

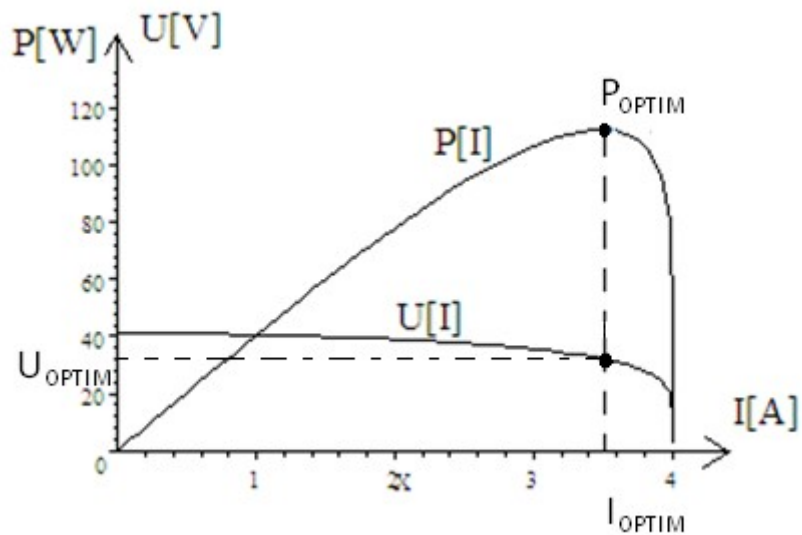


Fig.3.14 Caracteristica externă și caracteristica puterii la $P_s=883 [W/m^2]$

Studiu de caz 2

Determinarea I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , P_{OPTIM} , R_{OPTIM} pentru P_S variabil sinusoidal in timp.

Pentru a analiza comportarea PV la o variație a puterii radiante solare P_S datorită condițiilor meteo, se alege pentru P_S o variație sinusoidală de perioadă 2 ore. Această abordare este justificată prin faptul că în general modificarea condițiilor meteo se face lent, de ordinul zecilor de minute.

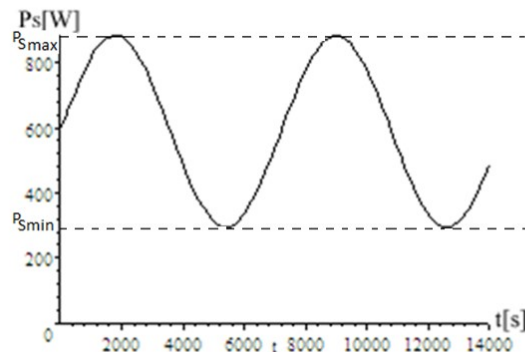


Fig.3.15 Variația sinusoidală a puterii radiante solare

Considerând de exemplu o variație a nivelului de insolație P_S între valoarea maximală

$P_{SMAX} = 883 [W/m^2]$ (în cazul unui cer senin) și valoarea minimală $P_{SMIN} = 883/3 [W/m^2]$ (în cazul unui cer puternic înnorat), și ținând cont că perioada este de două ore, iar la $t=0$, P_S este $2/3 \cdot 883$. Se poate scrie pentru P_S o expresie de forma:

$$P_s = \frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-t)}{3600} \right) \right) \quad (3.56)$$

rezultând pentru variația tensiunii:

$$U(I) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} I \frac{883}{\left(\frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-1800)}{3600} \right) \right) \right)} \right) \right)^{0.15} \quad (3.57)$$

Se observă din (Fig. 3.15) că în timp de o oră P_S variază între :

$$P_{SMIN} = 883/3 = 294 [W/m^2] \text{ și} \\ P_{SMAX} = 883 [W/m^2]$$

Pentru o variație a puterii radiante P_S între $P_{SMAX} = 883 [W/m^2]$ și $P_{SMIN} = 294 [W/m^2]$, pe baza MM-PVS2 se obțin caracteristicile din (Fig. 3.16).

Se observă că, punctele de putere maximă P_{OPTIM} se deplasează între $P_{OPTIM-1}$ și P_{OPTIM2}

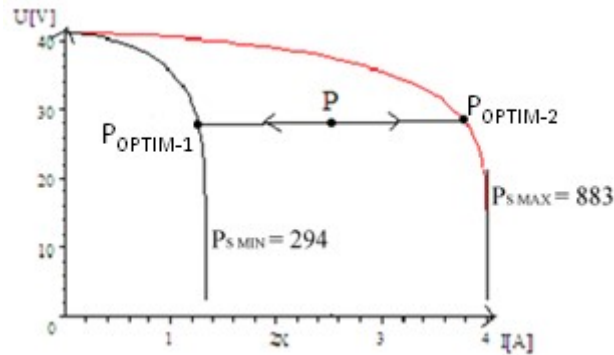


Fig.3.16 Deplasarea punctului de funcționare

Valoarea optimă a curentului debitat se deduce anulând derivata puterii electrice

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI} \left(41 \cdot \left(\cos \frac{346.58}{\frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-t)}{3600} \right) \right)} I \right)^{0.15} \cdot I \right) = 0 \quad (3.58)$$

obținându-se în final:

$$I_{OPTIM} = \left(2.3242 - 1.1621 \sin \left(-3.14 + 8.7222 \times 10^{-4} t \right) \right), \quad (3.59)$$

a cărei variație în funcție de timp este reprezentată în (Fig. 3.17).

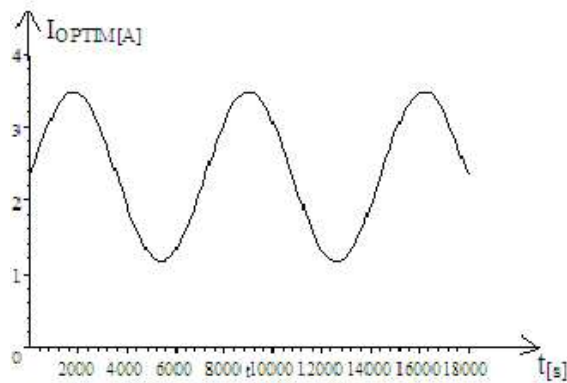


Fig.3.17 Variația curentului I_{OPTIM}

În mod analog, pentru dependența curentului optim de P_S , $I_{OPTIM}=f(P_S)$, se obține:

$$I_{OPTIM} = 3.9482 \times 10^{-3} P_S \quad (3.60)$$

Dependența este liniară și este reprezentată în (Fig. 3.18).

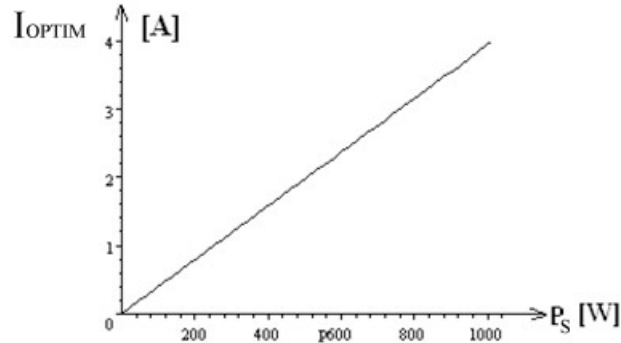


Fig.3.18 Dependența curentului optim de P_s

Rezultatul obținut este deosebit de util, în sensul că la orice nivel de radiație, caracterizat prin puterea radiantă P_s , se cunoaște valoarea curentului optim, I_{OPTIM} . Se poate obține cu ușurință $U_{OPTIM}(t)$, rezultând o variație de forma celei din (Fig. 3.19):

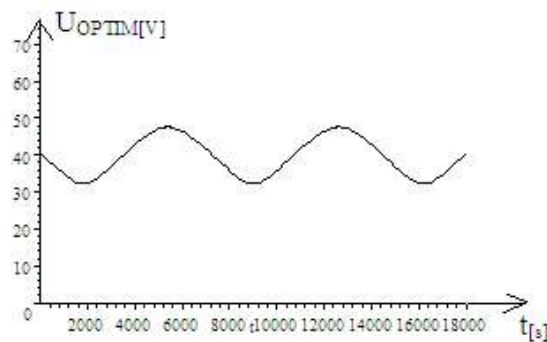


Fig.3.19 Variația tensiunii optime U_{OPTIM}

Variațiile în timp ale curentului optim (I_{OPTIM}) și ale tensiunii optime (U_{OPTIM}) sunt asemănătoare cu variația în timp a puterii radiante solare. Pentru rezistența de sarcină optimă R_{OPTIM} se poate obține o reprezentare de forma celei din (Fig. 3.20).

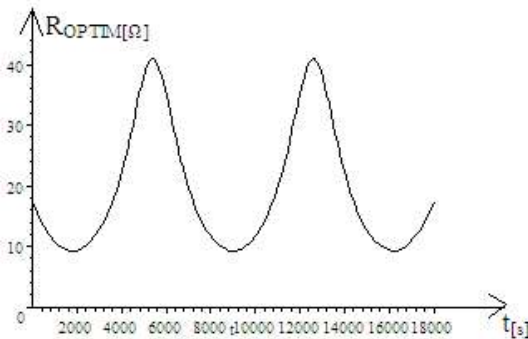


Fig.3.20 Variația rezistenței optime R_{OPTIM}

3.5. Concluzii:

Din rezultatele obținute se observă cum variațiile în timp ale principalelor mărimi funcționale: curent, tensiune și rezistență de sarcină depind de forma de variație în timp a puterii radiante solare.

Cazul analizat, utilizând variația sinusoidală a nivelului de insolație, este mai apropiat de realitatea meteo decât cazurile când s-a considerat variația bruscă a puterii radiante solare.

Pentru a funcționa în MPP, valoarea rezistenței de sarcină trebuie modificată în strânsă dependență cu valoarea puterii radiante solare!

Considerând o variație sinusoidală pentru puterea radiantă solară, s-au determinat mărimile de bază corespunzătoare MPP (tensiune, curent, rezistență de sarcină). Variațiile în timp ale acestor mărimi pot fi alese ca mărimi de referință în sistemele de reglare.

4. PROBLEME ALE CONDUCERII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE CU PANOURI FOTOVOLTAICE

4.1. Preliminarii

Conversia energiei solare în energie electrică se realizează în prezent la randamente destul de scăzute, în jurul a 15% [Aza 2008, Chi 2013, Dha 2013]. Se impune în consecință ca sistemul de conducere să asigure o eficiență energetică cât mai mare pentru a se obține costuri energetice comparabile cu cele clasice (cărbune, hidro, nucleară), deși actuala energetică solară nu este competitivă fără susțineri din partea statului [Mal 2017, Meh 2014, Osa 2017].

Obiectivul capitolului îl constituie analiza funcționării în diverse condiții a panourilor fotovoltaice și conceperea unor structuri de conducere performante.

Sunt propuși algoritmi care folosesc coordonatele MPP determinate pentru diverse cazuri. Se demonstrează că sistemele de reglare clasice, bazate pe estimarea puterii debitate, funcționează totdeauna sub valoarea puterii maxime disponibile P_{OPTIM} (deci nu în MPP) [Gan 2012, Him 2018, Sub 2017, Zon 2017]. Se au în vedere diverse posibilități de modificare a rezistenței de sarcină prin folosirea unui convertor DC-DC.

Prin analiza funcționării sistemului cu panouri fotovoltaice (PV) în diverse configurații: pe o rezistență de sarcină de valoare fixă, direct pe un acumulator electric (AE), sau folosind un convertor DC-DC interpus între PV și AE, se poate determina eficiența energetică comparativă a acestora.

Conducerea optimă a unui sistem electroenergetic solar se bazează pe modelul matematic al PV. În lucrare se utilizează MM originale (MM-PV, MM-PVS1, MM-PVS2) ce oferă date în timp real despre coordonatele punctului de putere maximă la un nivel de insolație cunoscut.

Sistemele de conducere considerate utilizează mărimi funcționale de bază: curent, putere sau rezistență de sarcină.

4.2. Considerații generale

Având în vedere tendința de ridicare a valorilor randamentelor de conversie, sistemul de conducere trebuie să realizeze o funcționare într-o zonă cât mai apropiată de punctul de putere maximă MPP. Deoarece coordonatele acestui punct (U_{OPTIM} , I_{OPTIM}) se modifică în funcție de nivelul de insolație, se impune modificarea valorii rezistenței de sarcină echivalente de la bornele PV astfel încât să se extragă energie maximă de la PV.

Această modificare de încărcare pentru PV se realizează prin intermediul convertorului DC-DC interpus între PV și AE (Fig. 4.1).

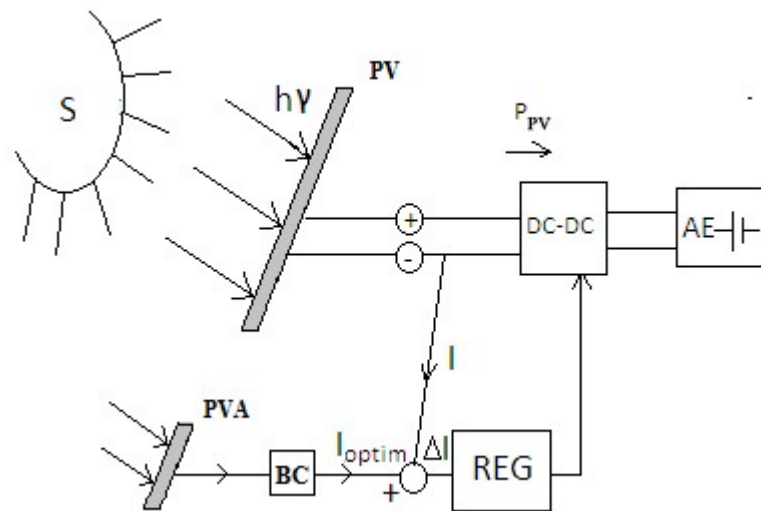


Fig.4.1 Sistem de reglare a PV pentru funcționarea în MPP
BC - bloc de calcul; REG - regulator; PVA - panou solar auxiliar (de mică putere)

Prin măsurarea puterii radiante solare se pot determina mărimile de bază corespunzătoare punctului de putere maximă, (curentul I_{OPTIM} în (Fig. 4.1)), care sunt folosite ca și mărimi de referință în sistemele de conducere performante.

În (Fig. 4.1) se consideră un panou solar auxiliar de mică putere (PVA), de același tip cu panoul fotovoltaic de putere instalat (PV).

Mărimile de ieșire ale PVA (U, I) sunt prelucrate într-un bloc de calcul (BC) pentru a se obține mărimea de prescriere I_{OPTIM} pentru regulatorul (REG).

Structura BC este detaliată în Cap.5.

În aplicațiile în care nu există un reglaj al rezistenței de sarcină echivalentă de la bornele PV, energia electrică obținută este sub valoarea energiei maxim disponibile. În §4.3, §4.4, §4.5 se realizează o analiză a funcționării sistemului cu PV în următoarele 3 cazuri:

- a) direct pe o rezistență de sarcină;
- b) direct pe un acumulator electric;
- c) în punctul de putere maximă, (MPP), prin intermediul unui convertor DC-DC utilizând MM-PVS2 (rel 3.38)

Utilizând un model MM-PVS2 pentru PV, s-au realizat simulări pentru diverse regimuri de funcționare reprezentative, pentru a se putea analiza performanțele sistemelor de conducere considerate.

Utilizarea coordonatelor MPP ca mărimi de referință în sistemele de reglare are ca efect posibilitatea funcționării sistemului în MPP și nu la valori sub puterea maximă, cum funcționează în prezent majoritatea sistemelor electroenergetice solare. [Gan 2012, Mos 2013, Zon 2017].

Se demonstrează în §4.5 că sistemele de reglare clasice, bazate pe estimarea puterii debitate, funcționează totdeauna sub valoarea puterii maxime disponibile P_{OPTIM} .

Structurile de conducere propuse sunt originale și se bazează pe mărimile de referință corespunzătoare MPP. Se analizează prin simulări comportarea sistemului când puterea radiantă solară se modifică în trepte și sinusoidal.

4.3. Panou fotovoltaic debitând pe o rezistență de sarcină constantă (PV+R)

În cele ce urmează se analizează funcționarea sistemului format dintr-un panou solar și o rezistență de sarcină, (PV+R) (Fig. 4.3), pe baza caracteristicilor experimentale $U=f(I)$, pentru un PV tip "Schott Poly 5" produs de firma TRITEC [Tri 2011] (Fig. 4.2).

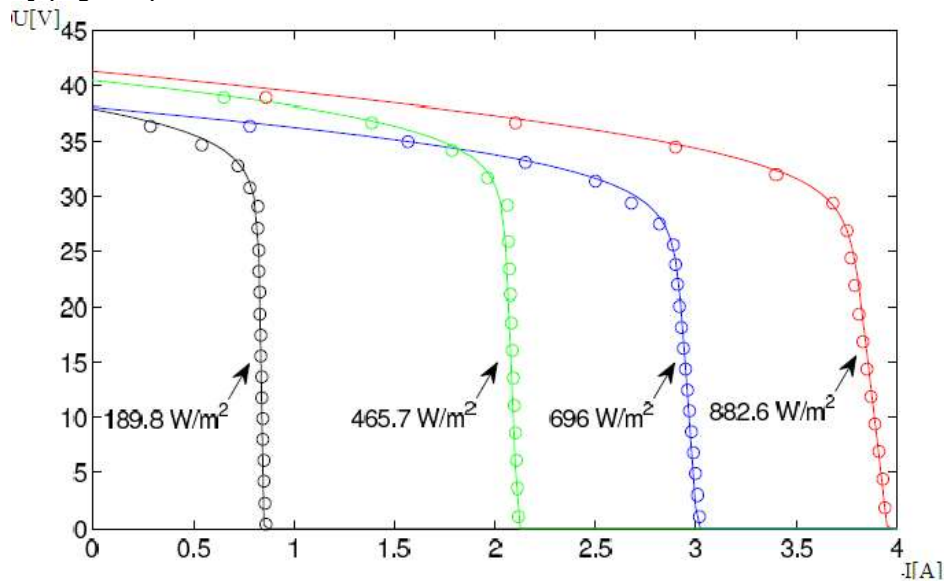


Fig.4.2 Caracteristicile externe la un PV de tip Schott Polly 5

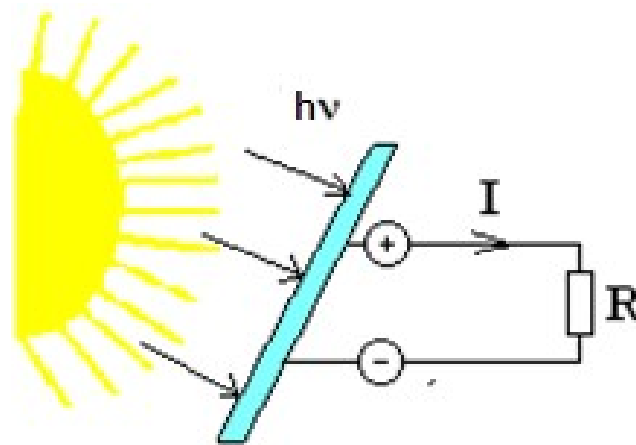


Fig.4.3. Panou fotovoltaic debitând pe rezistența de sarcină R

La conectarea directă a PV pe sarcina R se obține o energie captată dependentă de R, de regulă mult mai mică decât în cazul funcționării în punctele de putere maximă MPP.

Pentru o rezistență de sarcină de valoare constantă nu se poate capta o energie maximă pe toată durata zilei.

Pierderile de energie la $R=ct$ depind de valoarea lui R care trebuie aleasă cât mai aproape de R_{OPTIM} , a cărui valoare depinde de P_S .

Pentru a se obține o energie captată maximă, la o anumită rezistență R, se analizează pentru o zi următorul **scenariu meteo**:

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| - pentru $P_S1=882[W]$ | PV funcționează $t_1=4[h]$; |
| - pentru $P_S2=800[W]$ | PV funcționează $t_2=1[h]$; |
| - pentru $P_S3=700[W]$ | PV funcționează $t_3=1[h]$; |
| - pentru $P_S4=600[W]$ | PV funcționează $t_4=2[h]$; |
| - pentru $P_S5=500[W]$ | PV funcționează $t_5=1[h]$; |
| - pentru $P_S6=400[W]$ | PV funcționează $t_6=1[h]$; |
| - pentru $P_S7=300[W]$ | PV funcționează $t_7=0.5[h]$; |
| - pentru $P_S8=200[W]$ | PV funcționează $t_8=0.5[h]$; |
| - pentru $P_S9=100[W]$ | PV funcționează $t_9=1[h]$; |

Prin urmare, pentru diferite valori ale lui $R=ct$, energia captată, W, are valoarea:

$$W(R) = \sum_1^9 P_i \cdot t_i = R(I_1^2 \cdot 14400 + I_2^2 \cdot 3600 + I_3^2 \cdot 3600 + I_4^2 \cdot 7200 + I_5^2 \cdot 3600 + I_6^2 \cdot 3600 + I_7^2 \cdot 1800 + I_8^2 \cdot 14400 + I_9^2 \cdot 3600) \quad (4.3.1)$$

unde: P_i = putere electrică debitată pe intervalul de timp t_i ; t_i = interval de timp în care puterea radiantă solară P_S = constant.

Pentru rezistențe de valori: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 [Ω] s-au obținut rezultatele sintetizate în tabelul 4.1:

Tabelul 4.1. Energiile obținute pentru diverse rezistențe de sarcină

R[Ω]	W[J]
1	$4.0244 \cdot 10^5$
2	$8.0488 \cdot 10^5$
3	$1.2054 \cdot 10^6$
4	$1.6082 \cdot 10^6$
5	$2.0122 \cdot 10^6$
6	$2.4061 \cdot 10^6$
7	$2.6952 \cdot 10^6$
8	$2.8916 \cdot 10^6$
9	$3.0326 \cdot 10^6$
10	$3.3671 \cdot 10^6$
11	$3.1832 \cdot 10^6$
12	$3.1688 \cdot 10^6$

Maximul energetic s-a obținut pentru o rezistență R=10[Ω].
Energia totală în timpul unei zile, la R=10[Ω], are valoarea:

$$W_1 = \sum_1^9 P_i \cdot t_i = 3.3671 \cdot 10^6 \text{ [J]} \quad (4.3.2)$$

Sistemul PV+R prezentat se regăsește în practică în aplicațiile casnice unde rezistența de sarcină R este de exemplu un reșou de încălzit. Tensiunea pe R fiind variabilă sistemul nu poate fi folosit pentru consumatorii casnici care impun un anumit nivel de tensiune, de regulă U=230[V] la o frecvență f=50[Hz].

4.4. Panou fotovoltaic debitând pe un acumulator electric (PV+AE)

De cele mai multe ori înmagazinarea energiei solare se face în acumuloare electrice AE (Fig. 4.4).

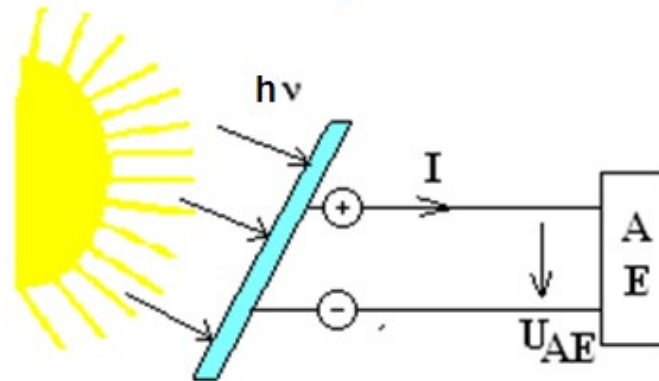


Fig.4.4 Panou fotovoltaic debitând pe un acumulator electric

VARIANTA 1-SARCINĂ NEADAPTATĂ la caracteristica externă a PV,
Tensiunea la bornele AE este $U_{AE}=24[V]$

Funcționarea sistemului (PV+AE) la diferite grade de insolație, pentru caracteristici de tipul celei reprezentate în (Fig. 4.2), este departe de punctele de putere maximă, (MPP-1 sau MPP-2) așa cum se poate observa în (Fig. 4.5):

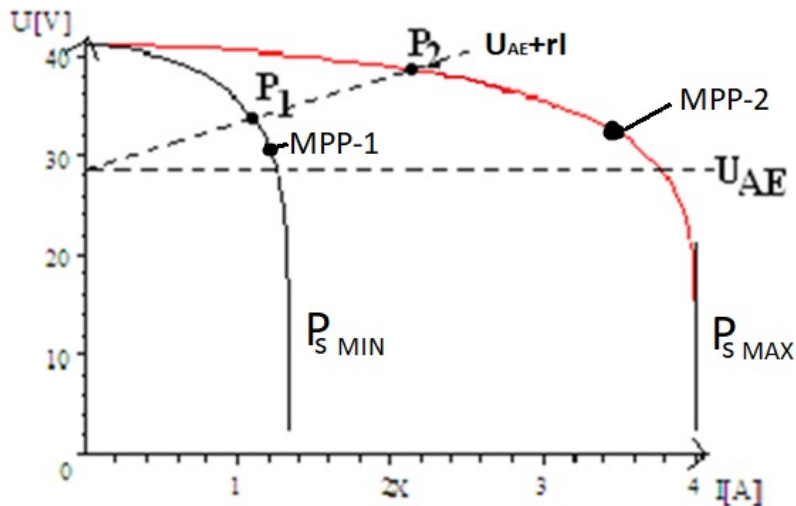


Fig.4.5 Punctele de funcționare în cazul PV+AE.

Punctele de funcționare P_1 (la putere radiantă minimă $P_{S \text{ MIN}}$) și P_2 , (la putere radiantă maximă $P_{S \text{ MAX}}$), se obțin la intersecția caracteristicii externe $U=f(I)$ a PV cu

caracteristica tensiunii la AE: $U=U_{AE}+rI$, unde r este rezistența internă a AE, U_{AE} este tensiunea internă a AE [Gan 2012].

Schema electrică echivalentă în acest caz, este cea reprezentată în (Fig. 4.6)

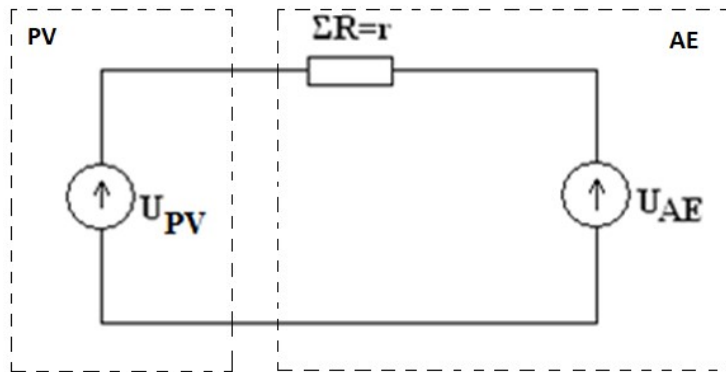


Fig.4.6.Schemă electrică PV+AE

Punctele de funcționare P_1 , la puterea radiantă minimă P_{MIN} și P_2 , la puterea radiantă maximă P_{MAX} , (Fig. 4.5) se pot determina pe caracteristicile externe $U(I)$ ale PV la tensiunea $U = rI + U_{AE}$, în felul următor:

-pentru o putere radiantă solară de valoarea $P_S=900[W]$, rezultă pentru curent, pe baza MM-PVS2 (rel 3.50b)

$$U(I) = 41. \left(\cos\left(\frac{3.14}{8} I \frac{883}{900}\right) \right)^{0.15} = 0.1 \cdot I + 24. \quad (4.4.1)$$

valoarea: $I=3.9974[A]$

Inlocuind valoarea obținută pentru curent se obține:

$$U(3.9974) = 41. \left(\cos\left(\frac{3.14}{8} 3.9974 \frac{883}{900}\right) \right)^{0.15} \quad (4.4.2)$$

rezultând astfel pentru tensiune valoarea: $U=24.402[V]$,

- Cu aceste valori se obține valoarea puterii debitate:

$$P=U \cdot I = 24.402 \cdot 3.9974 = 97.545[W] \quad (4.4.3)$$

Analog se obțin puterile debitate la diferite puteri radiante solare P_{Si} :

- pentru $P_{S1}=882[W]$ - puterea $P_1=112.11 [W]$, $t_2=4[h]$
- pentru $P_{S2}=800[W]$ - puterea $P_1= 86.555 [W]$, $t_2=1[h]$;
- pentru $P_{S3}=700[W]$ - puterea $P_2= 75.631 [W]$, $t_3=1[h]$;
- pentru $P_{S4}=600[W]$ - puterea $P_3= 64.72 [W]$, $t_4=2[h]$;
- pentru $P_{S5}=500[W]$ - puterea $P_4= 53.839 [W]$, $t_5=1[h]$;
- pentru $P_{S6}=400[W]$ - puterea $P_5= 43.006 [W]$, $t_6=1[h]$;
- pentru $P_{S7}=300[W]$ - puterea $P_6= 32.204 [W]$, $t_7=0.5[h]$;
- pentru $P_{S8}=200[W]$ - puterea $P_7= 21.434 [W]$, $t_8=0.5[h]$;

- pentru $P_{s9}=100[W]$ - puterea $P_8= 10.701 [W]$, $t_9=1[h]$;

Energia totală înmagazinată în acest caz în acumulatorul electric AE, pe timpul unei zile, are valoarea :

$$W_2 = \sum_1^9 P_i \cdot t_i = 2.91 \times 10^6 [J] \quad (4.4.4)$$

Aceasta este mai mică decât energia captată în cazul în care receptorul este o rezistență de $10[\Omega]$, caz în care energia are valoarea $W_1=3.3671 \times 10^6 [J]$ (vezi 4.3.2):

adică, cu
$$\frac{3.3671 - 2.91}{3.3671} \cdot 100 = 13.57\% \quad \text{mai mică.} \quad (4.4.5)$$

În continuare se va analiza o variantă îmbunătățită prin folosirea unui acumulator cu parametri potrivit aleși, astfel încât energia solară captată să se apropie de valoarea captată maximă.

VARIANTA 2-SARCINĂ ADAPTATĂ la caracteristica externă a PV

Tensiunea la bornele AE este: $U_{AE}=32[V]$

Prin adaptarea potrivită a caracteristicii externe a PV la AE, în sensul că tensiunile de gol la cele două componente (AE și PV) ale SES să fie corespunzător alese [Gana], se realizează obținerea, pe durata unei zile, a unei valori a energiei apropiată de valoarea maxim posibilă când PV funcționează în punctul de putere maximă MPP, așa cum se demonstrează în continuare.

Soluția propusă este mult mai economică decât cea clasică: PV+DC-DC + AE deoarece nu mai este necesar convertorul de curent continuu - curent continuu (DC-DC). Puterea primită de la Soare se modifică continuu, iar sistemul: **(PV+AE)**, funcționează în apropierea punctului de putere maximă.

Studiu de caz

Caracteristicile externe ale PV se obțin din MM-PVS2, adaptată pentru caracteristica externă experimentală Schott Polly (vezi Fig. 3.11) la temperatura $T=(273+25)K$ (vezi rel 3.50b):

$$U(I) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} I \frac{883}{P_s} \right) \right)^{0.15} \quad (4.4.6)$$

În (Fig. 4.7) sunt reprezentate caracteristicile externe pentru diverse valori ale puterii radiante P_s și anume $P_s = 900, 800, 700, 600, 500, 400, 300 [W]$.

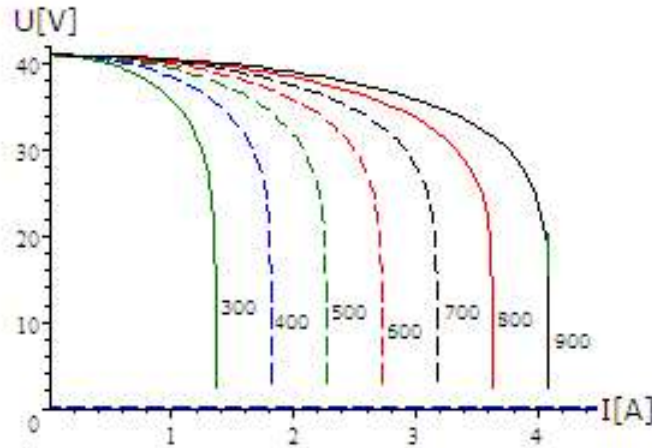


Fig.4.7 Caracteristicile externe pentru diverse puteri radiante

Coordonatele punctului de putere maximă se obțin prin anularea derivatei $\frac{dP}{dI} = 0$, care pentru $P_{s1}=900[W]$ devine :

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI} \left(41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} I \frac{883}{900} \right) \right)^{0.15} \cdot I \right) = 0 \quad (4.4.7)$$

sau :

$$2.3683 \times 10^9 \cdot I \sin 0.38509 - 4.1 \cdot 10^{10} \cos 0.38509 \cdot I = 0$$

$$\text{se obține curentul :} \quad I_{OPTIM} = 3.5533 [A] \quad (4.4.8)$$

pentru care rezultă tensiunea :

$$U_{OPTIM} = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} 3.5533 \frac{883}{900} \right) \right)^{0.15} = 32.232 [V] \quad (4.4.9)$$

adică tensiunea corespunzătoare MPP, la $P_{s1}=900[W]$ are valoarea:

$$U_{OPTIM} = 32.232 [V]$$

Pentru tensiunea :

$$U = rI + U_{AE} = 0.1I + 32 = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} I \frac{883}{P_s} \right) \right)^{0.15} \quad (4.4.10)$$

rezultă puterile debitate P_i , după cum urmează:

- pentru $P_{s1}=900[W]$ rezultă: $P_1=112.11[W]$; $t_1=4h=14400 [s]$
- pentru $P_{s2}=800[W]$ rezultă: $P_2=101.8[W]$; $t_2=1h=3600 [s]$
- pentru $P_{s3}=700[W]$ rezultă: $P_3=89.079[W]$; $t_3=1h=3600 [s]$
- pentru $P_{s4}=600[W]$ rezultă: $P_4=76.353[W]$; $t_4=2h=7200 [s]$
- pentru $P_{s5}=500[W]$ rezultă: $P_5=63.628[W]$; $t_5=1h=3600 [s]$
- pentru $P_{s6}=400[W]$ rezultă: $P_6=50.901[W]$; $t_6=1h=3600 [s]$
- pentru $P_{s7}=300[W]$ rezultă: $P_7=38.175[W]$; $t_7=0.5h=1800 [s]$
- pentru $P_{s8}=200[W]$ rezultă: $P_8=25.449[W]$; $t_8=0.5h=1800 [s]$

- pentru $P_{s9}=100[W]$ rezultă: $P_9=12.724[W]$; $t_9=1h=3600 [s]$

Energia captată are valoarea:

$$W_3 = \sum_1^9 P_i \cdot t_i = 112.11 \cdot 14400 + 101.8 \cdot 3600 + 89.079 \cdot 3600 + 76.353 \cdot 7200 + 63.628 \cdot 3600 + 50.901 \cdot 3600 + 38.175 \cdot 1800 + 25.449 \cdot 1800 + 12.724 \cdot 3600 = 3.4239 \cdot 10^6 [J]$$

(4.4.11)

fiind mai mare decât în cazul anterior la care energia captată avea valoarea (vezi rel. 4.4.4):

$$W_2 = 2.91 \times 10^6 [J],$$

adică cu :

$$\frac{3.4239 - 2.91}{3.4239} \cdot 100 = 15.01\% \text{ mai mare.}$$

(4.4.12)

4.5. Panou fotovoltaic debitând pe un convertor DC-DC conectat la un acumulator electric (PV+ (DC-DC) + AE)

Prin modificarea rezistenței de sarcină echivalente de la bornele PV se urmărește ca funcționarea SES să fie cât mai aproape de punctul de putere maximă, dar acest punct nefiind cunoscut, se realizează o funcționare la o putere sub cea maximă [Gan 2012].

Pentru o funcționare în punctele de putere maximă, caracterizate prin valorile U_{OPTIM} , pentru tensiune și I_{OPTIM} , pentru curent, este necesară folosirea unui convertor DC-DC între PV și AE (sau rețeaua de curent continuu de tensiune $U_{CC} = 12,24...[V]$) (Fig. 4.1, Fig. 4.8).

Coordonatele punctului de putere maximă se obțin prin anularea derivatei $\frac{dP}{dI} = 0$, care pentru $P_{s1}=900[W]$ devine (pe baza rel 4.4.6) :

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI} \left(41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} I \frac{883}{900} \right) \right)^{0.15} \cdot I \right) = 0 \quad (4.5.1)$$

sau :

$$2.3683 \cdot 10^9 \cdot I \sin 0.38509 - 4.1 \cdot 10^{10} \cos 0.38509 \cdot I = 0 \quad (4.5.2)$$

obținându-se pentru curent:

$$I_{OPTIM} = 3.5533 [A]$$

pentru care rezultă tensiunea:

$$U_{OPTIM} = 41 \cdot \left(\cos\left(\frac{3.14}{8} \cdot 3.5533 \frac{883}{900}\right) \right)^{0.15} = 32.232 [V] \quad (4.5.3)$$

rezistența optimă rezultă :

$$R_{OPTIM} = U_{OPTIM} / I_{OPTIM} = 32.232 / 35533 = 9.071 [\Omega] \quad (4.5.4)$$

Puterea în acest punct este puterea optima (maximă):

$$P_{OPTIM} = U_{OPTIM} \cdot I_{OPTIM} = 32.232 \cdot 3.553 = 114.52 [W] \quad (4.5.5)$$

În mod similar pentru diferite valori ale puterii radiante solare se obțin puterile debitate optime :

- pentru $P_s1=900[W]$ rezultă $P_{OPTIM1} = 112.11[W]$; $t_1=4h$
- pentru $P_s2=800[W]$ rezultă $P_{OPTIM2} = 101.80[W]$; $t_2=1h$
- pentru $P_s3=700[W]$ rezultă $P_{OPTIM3} = 89.080[W]$; $t_3=1h$
- pentru $P_s4=600[W]$ rezultă $P_{OPTIM4} = 76.354[W]$; $t_4=2h$
- pentru $P_s5=500[W]$ rezultă $P_{OPTIM5} = 63.629[W]$; $t_5=1h$
- pentru $P_s6=400[W]$ rezultă $P_{OPTIM6} = 50.902[W]$; $t_6=1h$
- pentru $P_s7=300[W]$ rezultă $P_{OPTIM7} = 38.177[W]$; $t_7=0,5h$
- pentru $P_s8=200[W]$ rezultă $P_{OPTIM8} = 25.452[W]$; $t_8=0,5h$
- pentru $P_s9=100[W]$ rezultă $P_{OPTIM9} = 12.726[W]$; $t_9=1h$

Energia totală captată în timpul unei zile se obține cu:

$$\begin{aligned} W_4 &= \sum_1^9 P_i \cdot t_i = P1 \cdot 14400 + P2 \cdot 3600 + P3 \cdot 3600 + \\ &P4 \cdot 7200 + P5 \cdot 3600 + P6 \cdot 3600 + P7 \cdot 1800 + \\ &P8 \cdot 1800 + P9 \cdot 3600 = 3.4587 \cdot 10^6 [J] \end{aligned} \quad (4.5.6)$$

fiind mai mare decât în cazul anterior (rel 4.4.11), la care energia captată avea valoarea:

$$W_3 = 3.4239 \times 10^6 [J],$$

adică cu:

$$\frac{3.4587 - 3.4239}{3.4587} \cdot 100 = 1.01\% \text{ mai mare} \quad (4.5.7)$$

Din cele 4 cazuri analizate:

- 1) funcționare pe o rezistență de sarcină constantă (W_1),
- 2) funcționare direct pe acumulatorul electric cu sarcină neadaptată (W_2),
- 3) funcționare direct pe acumulatorul electric cu sarcină adaptată (W_3),
- 4) funcționare în punctele de putere maximă (MPP) (W_4),

așa cum se putea anticipa, energia cea mai mare (optimă) este în cazul W_4 , care comparată cu cazul W_3 este cu 1.01% mai mică (la AE potrivit ales), sau comparată cu cazul W_2 este cu 15,01% mai mică (la AE neadaptat) și cu cazul W_1 este cu 2.65% mai mică la rezistența de sarcină constantă și potrivit aleasă.

Concluzii:

- Prin funcționarea sistemului (PV+DC-DC+AE) în zona MPP s-a realizat, în timpul unei zile, o energie de $W_4=3.4587[\text{MJ}] = 0.96\text{kWh}$. Funcționând direct pe un AE, în aceeași perioadă de timp și în aceleași condiții, s-a realizat o energie de valoare $W_3=3.4239[\text{MJ}] = 0.95[\text{kWh}]$.

Diferența de energie dintre cele două cazuri este:

$$\Delta W = 3.4587 \times 10^6 - 3.4239 \times 10^6 = 34800.[J]$$

și reprezintă 1%, deci o diferență foarte mică, în aplicațiile uzuale neglijabilă, mai ales dacă se consideră și pierderile de putere în convertorul DC-DC, care poate să depășească 1%.

- Rezultatele experimentale obținute cu soluția (PV+AE cu sarcină adaptată) au confirmat calculele anterioare și sunt doar cu 0.9% sub cele energetic maxim posibil, justificând astfel utilitatea acestui procedeu simplu și ieftin de aplicat în practică.

Pe baza rezultatelor obținute se poate concluziona că la alegerea potrivită a AE în raport cu PV se realizează o captare maximă a energiei solare și fără folosirea unui convertor DC-DC interpus între PV și AE.

Funcționarea în MPP se poate realiza numai printr-un reglaj corespunzător, care să modifice valoarea rezistenței de sarcină echivalente de la bornele PV, pe baza unor algoritmi care consideră curentul, puterea sau rezistența corespunzătoare MPP, ca mărimi de referință.

4.6. Analiza funcționării panoului fotovoltaic PV în zona MPP

În majoritatea lucrărilor, [Bat 2013, Den 2006, Jai 2007, Sar 2018, Ton 2013, Wie 2014, Yaw 2018, Zon 2017], sistemele de conducere se bazează pe măsurarea puterii electrice debitate, fără a estima coordonatele MPP, folosind *metoda micilor perturbații* (cunoscută ca *metoda perturbă și observă* în literatura străină) [Awa 2017, Mam 2015, Ned 2011]. Din acest motiv puterea generată de sistemul electroenergetic solar va fi în permanență sub valoarea lui P_{OPTIM} .

4.6.1. Analiza comparativă a funcționării sistemului PV+(DC-DC)+AE la modificarea sarcinii, folosind metoda micilor perturbații (MP) respectiv metoda anulării derivatei puterii (ADP)

Cu metoda MP se urmărește identificarea coordonatelor punctelor de putere maximă, $(U_{\text{OPTIM}}, I_{\text{OPTIM}})$, care devin mărimi de referință pentru sistemul de reglare.

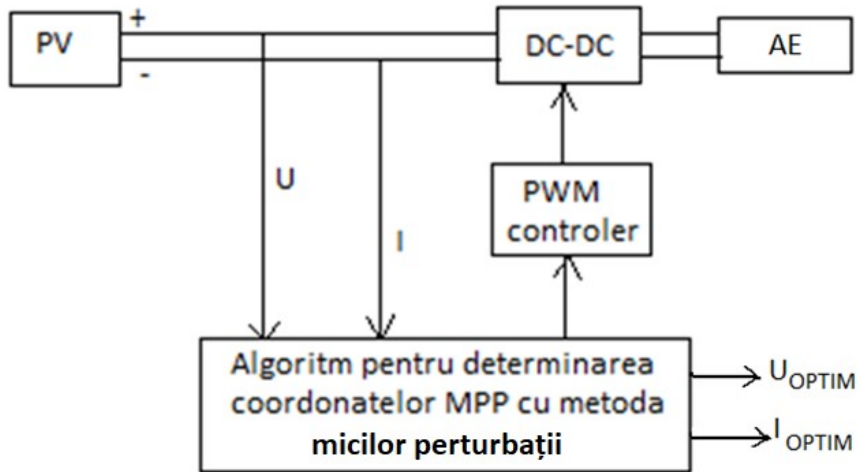


Fig. 4.8 Metoda micilor perturbații
PWM = modulare cu impulsuri (Pulse with modulation)

În anumite situații procesul devine oscilant și nu pot fi determinate aceste coordonate din următoarele motive:

- 1) Intervalul de timp pentru măsurarea puterii este necorespunzător ales
- 2) Valoarea coeficientului de proporționalitate K_p nu este bine aleasă.

Prin modificarea rezistenței de sarcină, punctele de funcționare se deplasează pe caracteristica externă a PV.

Se analizează în continuare, în ce mod aceste puncte de funcționare se apropie sau se depărtează de zona MPP.

Prin măsurarea puterii electrice utile: $P=U \cdot I$ și modificarea rezistenței de sarcină a PV, se identifică zona optimă din punct de vedere energetic.

Metoda **MP**, pentru a fi eficientă trebuie ca pașii de observare și rezistența de sarcină să fie corespunzător aleși.

Cu această metodă se identifică coordonatele MPP și apoi folosind regulatoare de tip P, PI și PID se menține sistemul în zona optimă.

În cele ce urmează este analizată comportarea sistemului PV + (DC-DC) + AE la modificarea rezistenței de sarcină, prin măsurarea puterii electrice debitate.

Cazul 1 - putere radiantă solară constantă: $P_s=1000$ [W].

Metoda MP se bazează pe măsurarea puterii electrice debitate de PV la momente eșantionate de timp și modificarea rezistenței de sarcină în funcție de:

$$\Delta P = P(i) - P(i-1), \quad (4.6.1)$$

unde :

- $P(i)$ este puterea măsurată la momentul i ,
- $P(i-1)$ este puterea măsurată la momentul $i-1$.

Folosind modelul simplificat MM-PVS1 (rel 3.37), cu tensiunea de gol $U_0=43$ [V], se analizează comportarea sistemului la modificarea în pași a rezistenței de sarcină, după cum urmează:

- **pasul 0**

Considerând MM-PVS1 (rel 3.37), se calculează rezistența de sarcină la diferiți pași în funcție de puterea debitată, alegându-se pentru pasul 0, $R(0)$ ca valoare inițială, unde $R(0)=8[\Omega]$, utilizând metoda micilor perturbații.

Curentul debitat I rezultă din :

$$U(0) = 43 \cdot \left(\cos\left(\frac{446.32 \cdot I}{1000 \cdot 1.0566}\right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} = 8 \cdot I, \quad (4.6.2)$$

și are valoarea $I(0)=4.6859$ [A].

Tensiunea la bornele PV devine în aceste condiții:

$$U(0) = 43 \cdot \left(\cos\left(\frac{446.32 \cdot 4.6859}{1000 \cdot 1.0566}\right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} = 37.487 [V] \quad (4.6.3)$$

Rezultând pentru valoarea puterii debitate :

$$P(0) = U(0) \cdot I(0) = 37.487 \times 4.6859 = 175.66 [W] \quad (4.6.4)$$

- **pasul 1**

Rezistența de sarcină se modifică la valoarea: $R(1) = 7.9[\Omega]$ (4.6.5)

și se obțin în mod asemănător valorile :

$$\text{curentul debitat:} \quad I(1) = 4.7209 [A] \quad (4.6.6)$$

$$\text{tensiunea la bornele PV:} \quad U(1) = 37.295 [V] \quad (4.6.7)$$

$$\text{puterea debitată :} \quad P(1) = 176.07 [W] \quad (4.6.8)$$

În general, metodele actuale de reglare la sistemele fotovoltaice se bazează pe metoda micilor perturbații [Awa 2017, Mam 2015, Ned 2011]. Așa cum s-a mai menționat, *metoda MP constă în modificarea în pași a sarcinii și obținerea corespunzătoare a modificării valorii puterii debitate, astfel ca aceasta să oscileze ca și valoare în jurul MPP. Prin monitorizarea puterii electrice debitate de PV, se caută zona energetică maximă, MPP.*

Se analizează în continuare **comportarea sistemului la modificarea sarcinii**, modificare impusă de variația puterii, considerând o modificare a rezistenței direct proporțională cu diferența de putere de forma :

$$\Delta R = K_p \cdot \Delta P \quad (4.6.9)$$

unde:

K_p = constanta de proporționalitate în cadrul metodei MP

$$\Delta R = R(i) - R(i-1) \quad (4.6.10)$$

$$\Delta P = P(i-1) - P(i-2) \quad (4.6.11)$$

deci:

$$R(i) - R(i-1) = K_p(P(i-1) - P(i-2)) \quad (4.6.12)$$

sau:

$$R(i) = R(i-1) + K_p(P(i-1) - P(i-2)) \quad (4.6.13)$$

In consecință:

$$R(2) - R(1) = K_p(P(1) - P(0)) \quad (4.6.14)$$

S-a ales pentru K_p valoarea $K_p = -0.91512$, obținută prin încercări repetate, astfel încât să se atingă punctul MPP în cât mai puțini pași.

$$\begin{aligned} R(2) &= R(1) - 0.91512(176.07 - 175.66) = \\ &7.9 - 0.91512(176.07 - 175.66) = 7.5248[\Omega] \end{aligned} \quad (4.6.15)$$

Pentru mai mulți pași se obțin rezultatele din tabelul 4.2:

Tabelul 4.2. Dependența puterii de rezistența de sarcină la $K_p = -0.91512$

	Pasul 0	Pasul 1	Pasul 2	Pasul 3	Pasul 4	Pasul 5	Pasul 6	Pasul 7
R[Ω]	8	7.9	7.5248	6.8568	9.6022	16.841	62.762	131.79
P[W]	175.66	176.07	176.8	173.8	162.89	104.8	29.367	14.02

Pe baza valorilor prezentate în tabelul 4.2 s-au determinat punctele de funcționare de pe caracteristica externă U(I) a PV, reprezentate în (Fig. 4.9).

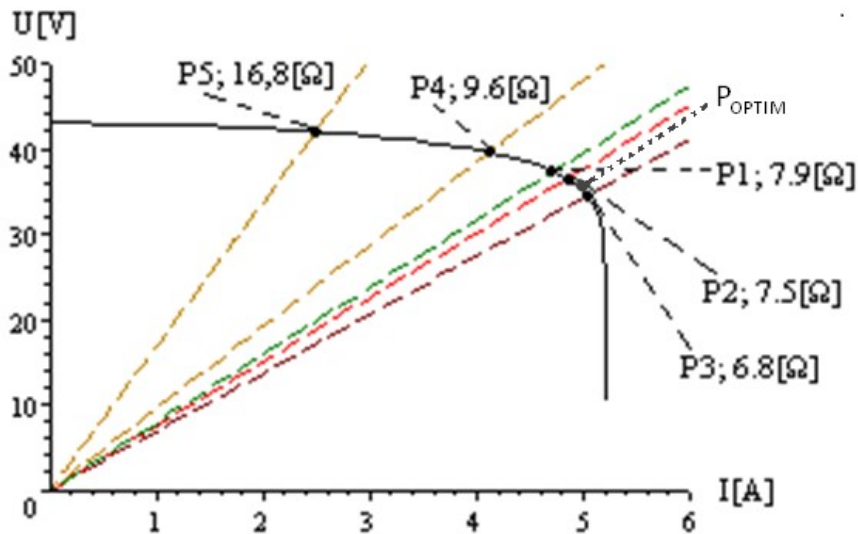


Fig.4.9. Deplasarea punctului de funcționare

Pentru a putea realiza o comparație cu valorile de optim, la aceeași putere radiantă solară, acestea s-au calculat cu **metoda anulării derivatei puterii (ADP)**, adică se calculează mărimile de optim din anularea derivatei puterii debitate:

$$\frac{d}{dI} \cdot UI = \frac{d}{dI} \cdot 43 \cdot \left(\cos \left(\frac{446.32 \cdot I}{1000 \cdot 1.0566} \right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} = 0 \quad (4.6.16)$$

Din care se obțin mărimile optime (în MPP):

$$I_{OPTIM} = 4.8472 [A] \quad (4.6.17)$$

$$U_{OPTIM} = 36.474 [V] \quad (4.6.18)$$

$$R_{OPTIM} = \frac{U_{OPTIM}}{I_{OPTIM}} = 7.5248 [\Omega] \quad (4.6.19)$$

$$P_{OPTIM} = U \cdot I = 36.474 \cdot 4.8472 = 176.8 [W] \quad (4.6.20)$$

Concluzii:

Prin modificarea rezistenței de sarcină R la valoarea de 7.9[Ω], (vezi Fig. 4.9), se obține, într-o primă fază, o apropiere de punctul de putere maximă P_{OPTIM} , $P_1 \rightarrow P_{OPTIM}$. Modificând în continuare rezistența de sarcină la valorile: 7.5248[Ω], 6.8568[Ω], 9.6022[Ω] și respectiv 16.841[Ω] punctul de funcționare se deplasează înspre P2, P3, P4, iar apoi înspre P5, din ce în ce mai îndepărtate de MPP (în condițiile în care Kp nu se modifică).

Prin urmare, folosind metoda MP în structurile de conducere ale sistemului PV + (DC-DC) + AE, nu se asigură funcționarea în punctul de putere maximă, acest punct putând fi atins prin metoda ADP).

Modificarea constantei Kp

Pentru a realiza o funcționare spre punctul de putere maximă se impune modificarea rezistenței de sarcină prin modificarea lui Kp, astfel încât la scăderea puterii să se modifice rezistența de sarcină în sensul creșterii puterii debitate.

Pentru rezistența de sarcină $R(3)=6.8568[\Omega]$, se poate scrie ecuația:

$$43 \cdot \left(\cos\left(\frac{446.32 \cdot I}{1000 \cdot 1.0566}\right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} = 6.8568 \cdot I \quad (4.6.21)$$

rezultând :

$$\text{curentul debitat :} \quad I(3) = 5.0346 [A] \quad (4.6.22)$$

$$\text{tensiunea la bornele PV:} \quad U(3) = 34.522 [V] \quad (4.6.23)$$

$$\text{puterea debitată:} \quad P(3) = U \cdot I = 34.522 \cdot 5.0346 = 173.8 [W] \quad (4.6.24)$$

Așa cum se observă din tabelul 4.2, începând de la pasul 3 puterea scade: la pasul 4 este 162.89[W]<173.8[W], la pasul 5 este 104.8[W], mai mică decât cea de la pasul anterior și în continuare la pașii 6 și 7 la fel scade (la pasul 6 este 29,367[W] și la pasul 7 este 14.02[W]). Din acest motiv se impune schimbarea factorului de proporționalitate Kp, care se face în continuare începând de la pasul 4.

Pentru a analiza **influența factorului de proporționalitate Kp** se consideră modificarea lui Kp în felul următor:

- 1) $Kp=-0.91512$, cu rezultatele date anterior în tabelul 4.2, până la pasul 3
- 2) $Kp=-0.1512$, începând de la pasul 4 (notat în continuare cu 4a)

Pentru pașii 4a÷10a s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 4.3, pe baza cărora s-a construit caracteristica din (Fig. 4.10).

Tabelul 4.3. Dependența puterii de rezistența de sarcină la $K_p=-0.1512$

	Pas 3	Pas 4a	Pas 5a	Pas 6a	Pas 7a	Pas 8a	Pas 9a	Pas 10a
R[Ω]	6.8568	7.3104	6.8987	7.251	6.9274	7.2132	6.9486	7.1875
P[W]	173.8	176.52	174.19	176.33	174.44	176.19	174.61	176.08

cu reprezentarea grafică dată în (Fig. 4.10) (doar pentru intervalul $I=(4.5÷5.2)[A]$).

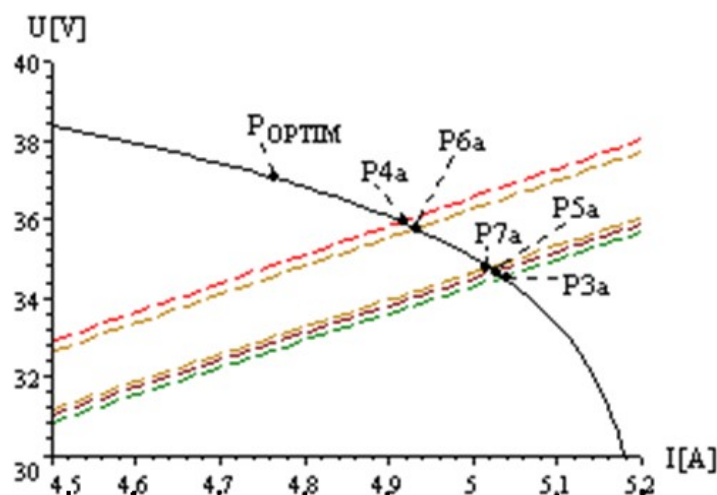


Fig.4.10. Punctele de funcționare la $K_p=-0.1512$

La modificarea valorii constantei K_p din $-0,91512$ în -0.1512 , punctele de funcționare se aglomerează în intervalul $P_{6a} ÷ P_{7a}$, departe de P_{OPTIM} , așa cum se poate observa din (Fig. 4.10).

Deoarece nu se rezolvă apropierea de MPP numai prin modificarea valorii lui K_p , în continuare se consideră și o modificare a valorii rezistenței inițiale, $R(0)$.

Pentru a putea **analiza influența valorii rezistenței de sarcină inițiale** ($R(0)$), în cazul de față se alege pentru pasul 0, valoarea $R(0)=7.9[\Omega]$, rezultatele obținute, utilizând această valoare, fiind prezentate în tabelul 4.4.

Tabelul 4.4. Dependența puterii de rezistența de sarcină inițială la $K_p=-0.1512$

R[Ω]	7.9	7.654	7.276	7.444	7.24	7.522	7.216	7.576	7.228	7.546	7.222
P[W]	176.07	176.7	176.42	176.76	176.29	176.80	176.2	176.78	176.25	176.79	176.23

Pe baza valorilor prezentate în tabelul 4.4 au fost ridicate graficele din (Fig. 4.11) și (Fig. 4.12), referitoare la variația rezistenței de sarcină reale, (R_{REAL}), comparativ cu (R_{OPTIM}) și respectiv variația puterii debitate reale (P_{REAL}), comparativ cu (P_{OPTIM}).

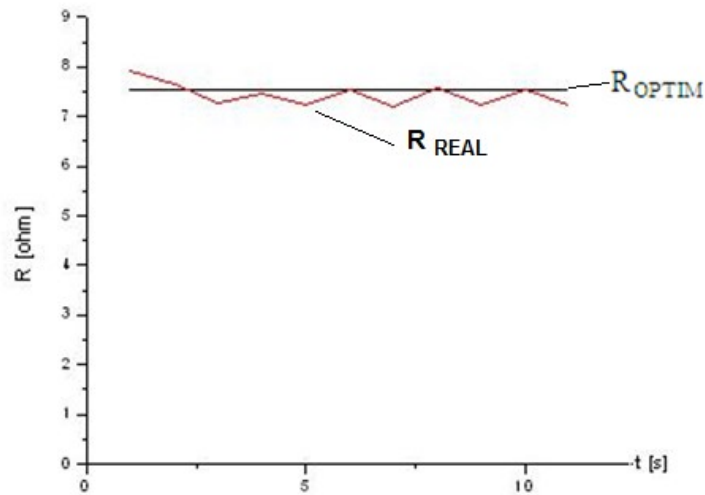


Fig.4.11. Variația rezistenței de sarcină



Fig.4.12. Variația puterii captate

Se observă din (Fig. 4.11) și (Fig. 4.12) că rezistența de sarcină reală (R_{REAL}) oscilează în jurul lui R_{OPTIM} , iar puterea reală este mereu sub valoarea maximală P_{OPTIM} .

Valoarea rezistenței de sarcină poate fi mai mare sau mai mică, dar întotdeauna puterea captată $P=U \cdot I$ este sub valoarea maximă P_{OPTIM} .

Concluzie:

Analiza efectuată subliniază importanța alegerii rezistenței de sarcină inițiale care trebuie stabilită în urma unor teste prealabile.

Cazul 2 - putere radiantă solară variabilă sinusoidal

În acest caz, puterea radiantă se consideră că se modifică sinusoidal în timp, (vezi rel 3.57):

$$P_S = \frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-t)}{3600} \right) \right) \quad (4.6.25)$$

Se utilizează modelul matematic MM-PVS2 în forma echivalentă (rel 3.50b), (pentru T= (253+25K):

$$U(I) = 41 \cdot \left(\cos \frac{3.14}{8} I \frac{883}{P_S} \right)^{0.15} \quad (4.6.26)$$

Determinarea zonei de funcționare în jurul punctului de putere maximă se realizează prin modificarea rezistenței de sarcină, la un interval de timp Δt .

În studiul de caz considerat, intervalul de timp se alege $\Delta t = 100[s]$.

În intervalul de timp Δt , puterea radiantă se modifică, având la $t=100[s]$, valoarea:

$$P_S(100) = \frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-100)}{3600} \right) \right) = 614.77 [W] \quad (4.6.27)$$

Caracteristica externă $U(I)$, la $t=100[s]$, are punctul de putere maximă cu coordonatele obținute prin anularea derivatei puterii:

$$I_{OPTIM}(100) = \left(2.3242 - 1.1621 \sin \left(-3.14 + 8.7222 \times 10^{-4} \cdot 100 \right) \right) = 2.4273 [A] \quad (4.6.28)$$

și respectiv:

$$U_{OPTIM}(100) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot 2.4273 \right) \cdot \frac{883}{614.77} \right)^{0.15} = 39.887 [V] \quad (4.6.29)$$

Cu aceste valori rezistența optimă devine :

$$R_{OPTIM}(100) = \frac{U_{OPTIM}(100)}{I_{OPTIM}(100)} = \frac{39.887}{2.4273} = 16.433 [\Omega] \quad (4.6.30)$$

La momentul $t=0$ rezistența optimă are valoarea:

$$R_{OPTIM}(0) = \frac{U_{OPTIM}(0)}{I_{OPTIM}(0)} = 17.399 [\Omega] \quad (4.6.31)$$

În continuare se realizează o analiză comparativă a valorilor puterilor debitate, la modificarea rezistenței de sarcină, utilizând metoda MP respectiv ADP :

rezistența $R_{OPTIM}(0)$ se menține constantă pe intervalul $(0,100)$ [s], urmând ca de la $t=100[s]$ să se modifice cu 10%.

Se obține astfel rezistența de sarcină:

$$R(100) = R_{OPTIM}(0) + 0.1 \cdot R_{OPTIM}(0) = 17.399 + 1.7399 = 19.139 [\Omega] \quad (4.6.32)$$

Valoarea rezistenței de sarcină $R(100)=19.139[\Omega]$ este diferită de valoarea optimă $R_{OPTIM}(100) = 16.433[\Omega]$, ceea ce înseamnă că *sistemul (PV+AE), la $t=100[s]$, nu funcționează în punctul de putere maximă.*

Punctul de funcționare la $R(100)$, pe caracteristica externă la $P_s(100)=614.77[W]$, se determină din:

$$U(100) = R(100) \cdot I \quad (4.6.33)$$

adică:

$$41 \cdot \left(\cos \frac{3.14}{8} I \frac{883}{614.77} \right)^{0.15} = 19.139 \cdot I, \quad (4.6.34)$$

Având soluția: $I=1.9141 [A]$ (4.6.35)

Deci la $R=R(100)$ se obține valoarea reală a curentului I_{REAL} :

$$I_{REAL}(100)=1.9141[A] \quad (4.6.36)$$

Diferența dintre I_{OPTIM} și I_{REAL} este de :

$$2.4273 - 1.9141 = 0.5132[A], \text{ adică } 21.25\%. \quad (4.6.37)$$

Caracteristicile externe la $t=0$ și $t=100[s]$ sunt date în (Fig. 4.13):
Pentru $t=0$:

$$U(0) = 41 \cdot \left(\cos \frac{3.14}{8} I \frac{883}{\left(\frac{883}{3} \cdot 2\right)} \right)^{0.15} \quad (4.6.38)$$

rezultând prin anularea derivatei puterii valorile de optim:

$$U_{OPTIM}(0) = 40.471[V] \text{ și } I_{OPTIM}(0) = 2.3241[A] \quad (4.6.39)$$

Deci:

$$P_{OPTIM}(0) = U_{OPTIM}(0) \cdot I_{OPTIM}(0) = 94.059 [W] \quad (4.6.40)$$

Analog, pentru $t=100$, rezultă:

$$U_{OPTIM}(100) = 32.232[V] \text{ și } I_{OPTIM}(100) = 2.4272[A] \quad (4.6.41)$$

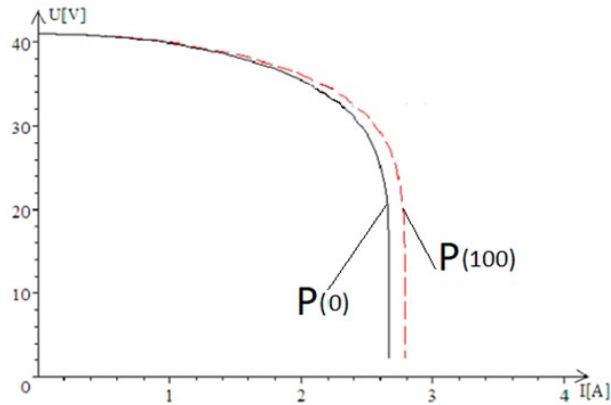


Fig.4.13. Caracteristicile externe la $t=0$ și $100[s]$

La $t=100[s]$ puterea optimă, (la funcționare în punctul optim), are valoarea:

$$P_{OPTIM}(100) = U_{OPTIM}(100) \cdot I_{OPTIM}(100) = 32.232 \cdot 2.4272 = 78.234 [W] \quad (4.6.42)$$

La $t=100[s]$ puterea debitată este:

$$P_{REAL}(100) = R(100) \cdot I_{REAL}^2(100) = 19.139 \cdot 1.9141^2 = 70.121 [W] \quad (4.6.43)$$

fiind mai mică decât cea optimă.

Concluzii:

Se observă că prin modificarea rezistenței de sarcină puterea obținută este mai mică decât puterea maximă disponibilă din nivelul de radiație solară. Prin urmare necunoscând coordonatele MPP, sistemul funcționează tot timpul sub P_{OPTIM} , indiferent de metodele de modificare a rezistenței de sarcină analizate.

Modificarea valorii rezistenței de sarcină, în scopul atingerii punctului de putere maximă, se face în prezent, în mod uzual [Anu 2013, Fra 2008, Gui 2012, Isl 2016, Lia 2008, Meh 2014, Mah 2013, Mur 2017, Sem 2011-1, Sob 2012, Vel 2009], prin monitorizarea puterii debitate (metoda ADP).

Funcționarea în MPP se poate realiza doar prin utilizarea metodei ADP.

4.6.2. Analiza comportării sistemului fotovoltaic (SPV) la modificarea rezistenței de sarcină, în funcție de diferența de putere (ΔP), pentru diferite valori ale constantei K_p

În (Fig. 4.14) se prezintă un SPV cu AE și convertor DC-DC (de tip BOOST) [Teo 2012].

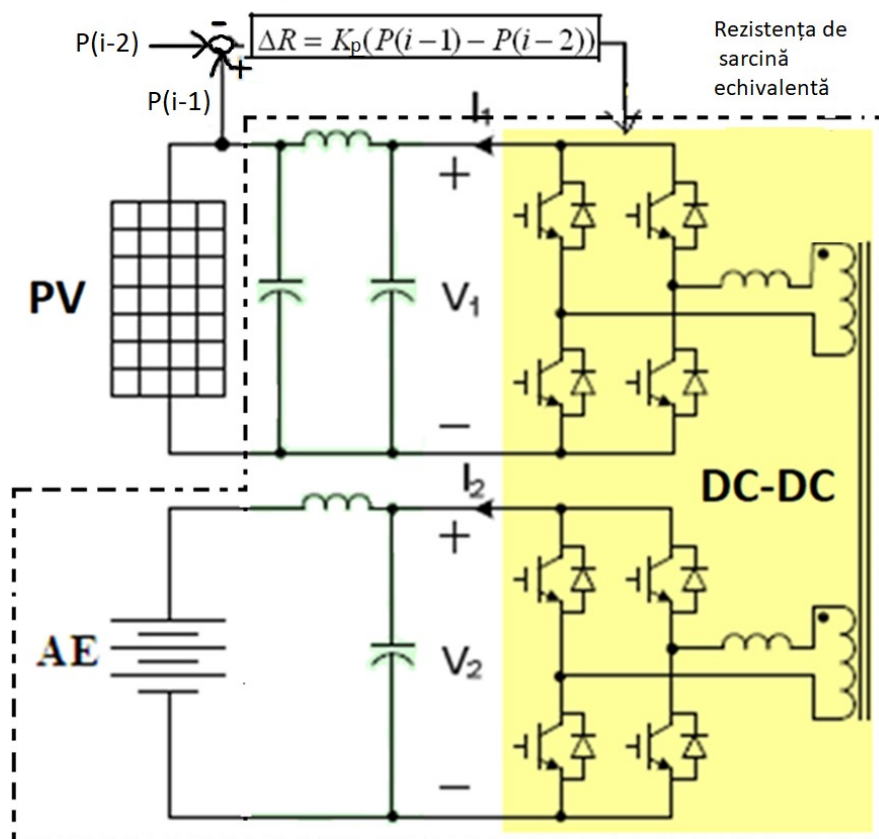


Fig.4.14.Sistem fotovoltaic cu AE și convertor DC-DC de tip BOOST

Se modifică rezistența de sarcină echivalentă în funcție de valoarea diferenței de putere:

$$\Delta P = P(i-1) - P(i-2) \quad (4.6.44)$$

În continuare se analizează **comportarea sistemului fotovoltaic la modificarea rezistenței de sarcină în funcție de diferența de putere, pentru diferite valori ale constantei K_p** :

$$\Delta R = K_p \cdot \Delta P \quad (4.6.45)$$

1) Constanta Kp are valoarea: Kp=0.1

Pentru **t=200[s]**

rezistența de sarcină se modifică având în vedere rezultatele prezentate în cadrul cazului 2 din §4.6.1 (rel 4.6.40) și (rel 4.6.43) :

$$\begin{aligned}\Delta R &= K_p \cdot \Delta P = K_p \cdot (P_{REAL}(100) - P_{OPTIM}(0)) = \\ &= 0.1 \cdot (70.121 - 94.059) = -2.3938\end{aligned}\quad (4.6.46)$$

la $t=200[s]$ rezistența de sarcină este:

$$R(200) = R(100) + \Delta R = 19.139 - 2.3938 = 16.745[\Omega] \quad (4.6.47)$$

Cu această valoare a rezistenței de sarcină, coordonatele punctelor de funcționare la $t=200[s]$ se obțin pe baza (rel 4.6.25) și (rel 4.6.26):

$$U(200) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot I \cdot \frac{883}{\left(\frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-200)}{3600} \right) \right) \right)} \right) \right)^{0.15} = R(200) \cdot I = 16.745 \cdot I \quad (4.6.48)$$

cu soluția:

$$I(200) = 2.1362 [A] \quad (4.6.49)$$

Rezultând pentru tensiune:

$$U(200) = 16.745 \cdot 2.1362 = 35.770[V] \quad (4.6.50)$$

și respectiv putere:

$$P(200) = U(200) \cdot I(200) = 35.77 \cdot 2.1362 = 76.412[W] \quad (4.6.51)$$

La $t=200 [s]$, coordonatele MPP se obțin din anularea derivatei puterii :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} U(200) \cdot I = 0 \quad (4.6.52)$$

cu soluția: $I_{OPTIM} = 2.5277[A]$. (4.6.53)

Înlocuind valoarea lui I_{OPTIM} în relația de calcul a tensiunii se obțin coordonatele punctului de putere maximă, la momentul de timp $t=200 [s]$:

$$\begin{aligned}I_{OPTIM}(200) &= 2.5277[A] \text{ și} \\ U_{OPTIM}(200) &= 32.232[V]\end{aligned}\quad (4.6.54)$$

În consecință rezultă:

$$R_{OPTIM}(200) = U_{OPTIM}(200) / I_{OPTIM}(200) = 32.232 / 2.5277 = 12.752 [\Omega] \quad (4.6.55)$$

și

$$P_{OPTIM}(200) = U_{OPTIM}(200) \cdot I_{OPTIM}(200) = 32.232 \cdot 2.5277 = 81.473 [W] \quad (4.6.56)$$

Rezultă deci că rezistența trebuie micșorată ca să se apropie de R_{OPTIM} , iar constanta K_p în consecință trebuie modificată.

2) Constanta se mărește la $K_p=0.3$

Rezistența de sarcină se modifică cu:

$$\begin{aligned} \Delta R &= K_p \cdot \Delta P = K_p \cdot (P_{REAL}(200) - P_{OPTIM}(100)) = \\ &= 0.3 \cdot (76.412 - 70.121) = 1.8873 [\Omega] \end{aligned} \quad (4.6.57)$$

Comparând valorile reale ale rezistenței cu cele optimale, date în tabelul 4.5, rezultă că rezistența trebuie să se micșoreze cu ΔR , devenind la $t=300[s]$:

$$R(300) = R(200) - \Delta R = 16.745 - 1.8873 = 14.858 [\Omega] \quad (4.6.58)$$

În continuare calculul se repetă, până la momentul de timp $t=1300 [s]$, rezultatele fiind sintetizate în tabelul 4.5.

Deoarece rezistența modificată nu se apropie de cea optimă, se impune mărirea în continuare a lui K_p .

3) Constanta se mărește la $K_p=0.6$

Rezistența de sarcină se modifică cu:

$$\begin{aligned} \Delta R &= K_p \cdot \Delta P = K_p \cdot (P_{REAL}(1400) - P_{OPTIM}(1300)) \\ &= 0.6 \cdot (103.17 - 101.43) = 1.044 [\Omega] \end{aligned} \quad (4.6.59)$$

devenind la $t=1500 [s]$:

$$R(1500) = R(1400) - \Delta R = 7.3528 - 1.044 = 6.3088 [\Omega] \quad (4.6.60)$$

În continuare calculul se repetă pentru intervalul de timp $t=1400-2000 [s]$.

În tabelul 4.5 sunt sintetizate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t=100 \div 2000 [s]$, pentru $K_p=0.1$, $K_p=0.3$ și $K_p=0.6$.

Tabelul 4.5. Puterile, tensiunile și curenții pentru $K_p=0.1$, $K_p=0.3$ și $K_p=0.6$

Timp [s]	P_{OPTIM} [W]	P_{REAL} [W]	R_{OPTIM} [Ω]	R_{REAL} [Ω]	I_{OPTIM} [A]	I_{REAL} [A]	U_{OPTIM} [V]	U_{REAL} [V]	K_p
100	94.059	70.121	13.868	19.139	2.324	9.914	32.232	36.639	0.1
200	81.473	76.412	12.752	16.745	2.527	2.136	32.232	35.77	0.3
300	84.658	81.906	12.271	14.858	2.626	2.347	32.231	34.885	0.3
400	87.771	86.778	11.836	13.21	2.723	2.563	32.321	33.858	0.3
500	93.504	90.726	11.79	11.748	2.816	2.779	33.209	32.647	0.3
600	93.683	93.459	11.089	10.564	2.906	2.974	32.231	31.421	0.3
700	96.435	95.44	10.773	9.744	2.991	3.129	32.232	30.495	0.3
800	99.023	97.118	10.491	9.149	3.072	3.258	32.231	29.809	0.3
900	101.43	98.436	10.242	8.646	3.146	3.374	32.231	29.174	0.3
1000	103.63	99.601	10.024	8.251	3.215	3.374	32.231	28.668	0.3
1100	100.44	103.47	9.635	7.901	3.276	3.565	31.575	28.171	0.3
1200	107.37	101.41	9.675	7.661	3.331	3.638	32.232	28.874	0.3
1300	108.87	101.43	9.541	7.358	3.377	3.712	32.231	27.321	0.3
1400	110.12	103.17	9.434	7.352	3.416	3.745	32.232	27.542	0.6
1500	112.06	94.801	9.431	6.308	3.416	3.876	32.509	24.455	0.6
1600	111.80	107.91	9.291	11.331	3.468	3.086	32.231	34.968	0.6
1700	112.23	55.405	9.257	3.465	3.481	3.995	32.232	13.868	0.6
1800	112.37	46.565	9.245	34.968	3.486	1.154	32.232	40.351	0.6
1900	112.22	40.748	9.257	40.272	3.481	1.005	32.232	40.509	0.6
2000	111.79	37.631	9.292	43.762	3.468	0.927	32.231	40.581	0.6

În (Fig. 4.15 – Fig. 4.17) sunt prezentate variațiile valorilor optime și reale ale curentului, ale rezistenței de sarcină, respectiv ale puterii:

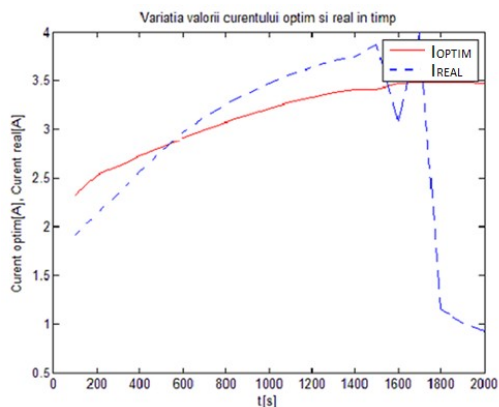


Fig.4.15. Variațiile valorilor optime și reale ale curentului

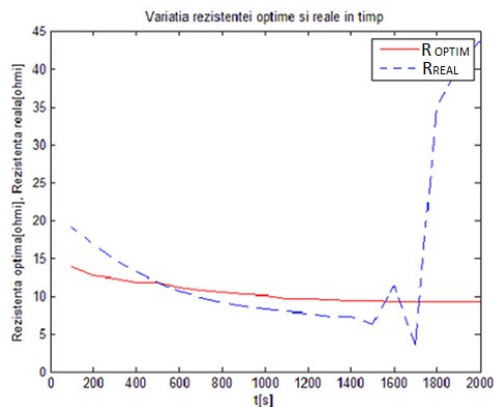


Fig.4.16. Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței

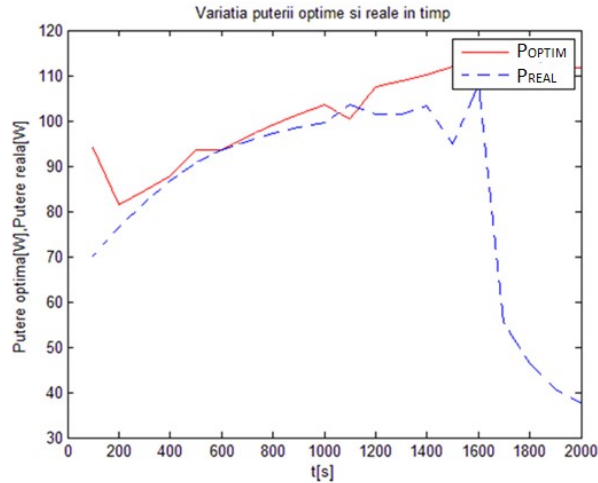


Fig.4.17. Variațiile valorilor optime și reale a puterii

Se observă că prin modificarea valorii constante de la $K_p=0.3$ la $K_p=0.6$, apar oscilații semnificative în jurul punctului de putere maximă, la momentele de timp $t=1600[s]$.

Pe baza rezultatelor din tabelul 4.5 se poate analiza deplasarea punctului de funcționare pe caracteristica externă a PV.

Deplasarea punctelor de funcționare este reprezentată în (Fig. 4.18).

Valorile reale și de optim, pentru momentele de timp $t=1600 [s]$, $t=1700 [s]$ și $t=1800[s]$, la $K_p=0.6$ sunt prezentate în tabelul 4.6.

Puterea radiantă solară la cele trei momente de timp are valoarea:

$$P_{s1} = \frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-1600)}{3600} \right) \right) \quad (4.6.61)$$

$$P_{s2} = \frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-1700)}{3600} \right) \right) \quad (4.6.62)$$

$$P_{s3} = \frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-1800)}{3600} \right) \right) \quad (4.6.63)$$

Tabelul 4.6 - Valorile reale și de optim, pentru momentele de timp $t=1600$ [s], $t=1700$ [s] și $t=1800$ [s] la $K_p=0.6$

MPP	Mărimi Reale
t=1600[s]	
$U_{OPTIM1} = 32.231$ [V]	$U1 = 34.968$ [V]
$I_{OPTIM1} = 3.468$ [A]	$I1 = 3.086$ [A]
$P_{OPTIM1} = 111.8$ [W]	$P1 = 107.91$ [W]
	$R1 = 11.331$ [Ω]
t=1700[s]	
$U_{OPTIM2} = 32.232$ [V]	$U2 = 13.868$ [V]
$I_{OPTIM2} = 3.4819$ [A]	$I2 = 3.995$ [A]
$P_{OPTIM2} = 112.23$ [W]	$P2 = 55.405$ [W]
	$R2 = 3.465$ [Ω]
t=1800[s]	
$U_{OPTIM3} = 32.232$ [V]	$U3 = 34.968$ [V]
$I_{OPTIM3} = 3.4862$ [A]	$I3 = 1.154$ [A]
$P_{OPTIM3} = 112.37$ [W]	$P3 = 46.565$ [W]
	$R3 = 34.968$ [Ω]

Simulările au la bază MM-PVS2.

Deplasarea punctului de funcționare conform tabelului 4.5 este redată în (Fig. 4.18).

Analiza rezultatelor obținute:

a) Se poate observa că la valori mici pentru K_p , punctul de funcționare "alunecă" în spre P_{OPTIM} , prin micșorarea lui R dacă funcționarea este în zona $I < I_{OPTIM}$ și prin mărirea lui R , dacă $I > I_{OPTIM}$, dar procesul nu se stabilizează.

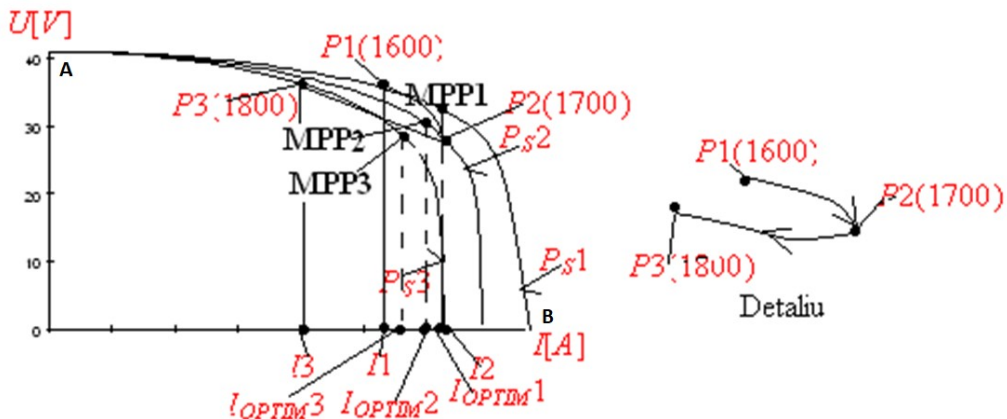


Fig.4.18 Deplasarea punctelor de funcționare

Pe traseul $P1, P2, P3$ nu se ajunge în MPP.

b) Mărirea sau micșorarea lui R în funcție de valoarea puterii debitate, sub forma $\Delta R = K_p \cdot \Delta P$ nu asigură funcționarea în MPP, deoarece prin depășirea lui P_{OPTIM} se continuă îndepărtarea de zona optimă, puterea scăzând, ajungându-se sau în punctul A (Fig. 4.18) ($I=0, U_{GOL}$) sau în B ($I=I_{SC}, U=0$). Acest aspect este mai vizibil la valori mari pentru K_p , dar este prezent și la valori mici.

c) Pentru o variație a lui R de forma:

$$R(i) = R(i-1) + \Delta R = R(i-1) + K_p(P(i-1) - P(i-2)) \quad (4.6.64)$$

punctul de funcționare se deplasează din zona $I < I_{OPTIM}$ în spre zona $I > I_{OPTIM}$, prin micșorarea rezistenței de sarcină, după care se va deplasa spre punctul A, deoarece:

$$P(i-1) < P(i-2) \text{ și } \Delta R < 0 \quad (4.6.65)$$

rezistența de sarcină R mărindu-se.

4.6.2.1 Analiza comportării SPV la mărirea rezistenței de sarcină

În analiza anterioară s-a putut vedea că valoarea constantei K_p modifică funcționarea sistemului într-o zonă mai mult sau mai puțin apropiată de zona energetică maximă.

În continuare se analizează comportarea sistemului la mărirea rezistenței de sarcină, mărire dependentă de diferența puterilor anterior debitate.

La o variație a lui R de forma:

$$R(i) = R(i-1) + \Delta R = R(i-1) + K_p(P(i-1) - P(i-2)), \quad (4.6.66)$$

se obțin rezultatele:

t=2000[s]

Rezistența de sarcină se modifică cu:

$$\Delta R = K_p \cdot \Delta P = K_p \cdot (P(1900) - P(1800)) = 0.6 \cdot (40.748 - 46.565) = -3.4902 [\Omega] \quad (4.6.67)$$

devenind:

$$R(2000) = R(1900) + \Delta R = 40.272 - 3.4902 = 36.782 [\Omega] \quad (4.6.68)$$

și:

$$U(2000) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot I \cdot \left(\frac{883}{3 \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-2000)}{3600} \right) \right)} \right) \right) \right)^{0.15} = R(2000) \cdot I = 36.782 \cdot I \quad (4.6.69)$$

cu soluția:

$$I(2000) = 1.0986 [A]$$

Rezultă valoarea tensiunii:

$$U(2000) = 40.408 [V] \quad (4.6.70)$$

respectiv valoarea puterii:

$$P(2000) = U(2000) \cdot I(2000) = 40.408 \cdot 1.0986 = 44.392 [W] \quad (4.6.71)$$

Marimile de referință caracteristice MPP se obțin din anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI}(U(2000) \cdot I) = 0 \quad (4.6.72)$$

de unde rezultă:

$$6.0657 \times 10^8 I \sin 0.39451I - 1.025 \times 10^{10} \cos 0.39451I = 0, \quad (4.6.73)$$

cu soluția:

$$I_{OPTIM}(2000) = 3.4685 [A], \quad (4.6.74)$$

respectiv:

$$U_{OPTIM}(2000) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot 3.4685 \frac{883}{\left(\frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600 - 2000)}{3600} \right) \right) \right)} \right) \right)^{0.15} = 32.231 [V] \quad (4.6.75)$$

$$R_{OPTIM}(2000) = U_{OPTIM}(2000) / I_{OPTIM}(2000) = 32.231 / 3.4685 = 9.2925 [\Omega] \quad (4.6.76)$$

$$P_{OPTIM}(2000) = U_{OPTIM}(2000) \cdot I_{OPTIM}(2000) = 32.231 \cdot 3.4685 = 111.79 [W] \quad (4.6.77)$$

În tabelul 4.7 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t = 2000 \div 2400$ [s].

Tabelul 4.7. Puterile, tensiunile și curenții la variația lui t în intervalul $t = [2000 \div 2400]$ [s]

Timp[s]	$P_{OPTIM}[W]$	$P_{REAL}[W]$	$R_{OPTIM}[\Omega]$	$R_{REAL}[\Omega]$	$I_{OPTIM}[A]$	$I_{REAL}[A]$	$U_{OPTIM}[V]$	$U_{REAL}[V]$
2000	111.79	44.392	9.292	36.782	3.468	1.098	32.231	40.408
2100	111.08	42.019	9.351	38.968	3.446	1.038	32.231	40.465
2200	110.1	43.502	9.435	37.544	3.415	1.076	32.232	40.414
2300	108.85	42.526	9.544	38.434	3.377	1.051	32.232	40.428
2400	107.34	43.107	9.678	37.848	3.330	1.067	32.232	40.393

Rezultatele simulărilor în Matlab sunt prezentate în (Fig. 4.19 – Fig. 4.22):

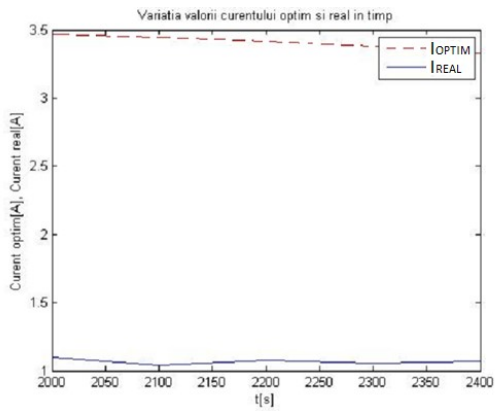


Fig.4.19. Variațiile valorilor optime și reale ale curentului

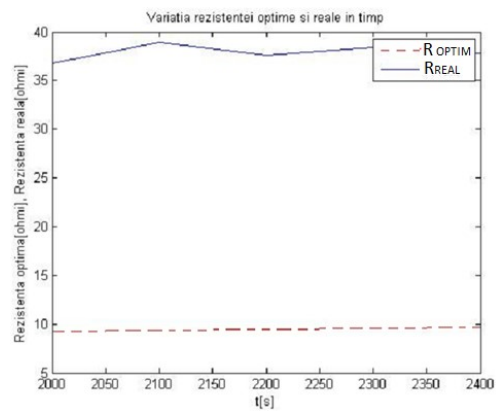


Fig.4.20. Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței

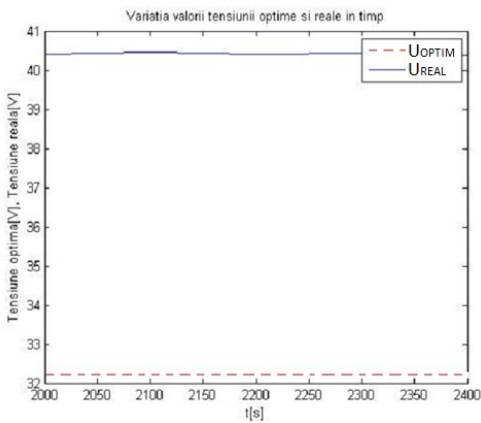


Fig.4.21. Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii

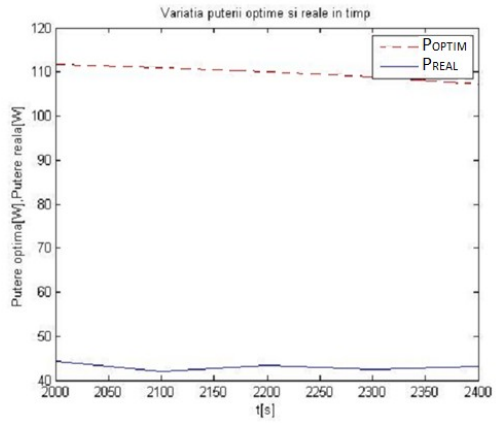


Fig.4.22. Variațiile valorilor optime și reale ale puterii

În (Fig.4.23) sunt reprezentate punctele de funcționare în intervalul de timp analizat.

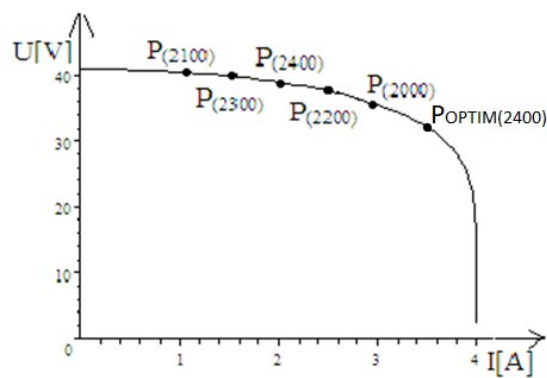


Fig.4.23. Deplasarea punctului de funcționare

Se observă, din (Fig. 4.23) și din tabelul 4.7 că punctul de funcționare, la sfârșitul intervalului $t=[2400][s]$, se "agață" la o putere $P=43.107[W]$, departe de zona optimă: $P_{OPTIM}(2400) = 107.34[W]$.

Observații:

Modificarea sarcinii după putere *nu se bazează pe modelarea matematică a caracteristicii externe a PV*, deci nu se poate preciza punctul de optim MPP (puterea maximă), la un anumit grad de insolație.

Analiza funcționării sistemului, modificarea sarcinii și deci deplasarea punctului de funcționare pe caracteristica externă are la bază *măsurarea puterii debitate*, $P=U \cdot I$.

4.6.3 Modificarea rezistenței de sarcină pentru a realiza o maximizare a puterii debitate

Maximizarea puterii se poate face simplu și eficace prin măsurarea puterii debitate și dacă aceasta crește în timp se continuă micșorarea rezistenței de sarcină, iar dacă puterea scade se schimbă sensul de variație pentru R .

În acest mod funcționarea va fi în jurul punctului de maxim așa cum se va demonstra în continuare.

Prin urmare, prin modificarea sarcinii la PV se poate modifica valoarea curentului debitat, astfel ca punctul de funcționare să se deplaseze înspre MPP

În continuare se propune un algoritm de conducere optimal, conceput pentru a duce sistemul în zona energetică maximă.

Se consideră un SPV cu rezistență de sarcină R și convertor DC-DC BUCK, reprezentat în (Fig.4.24).

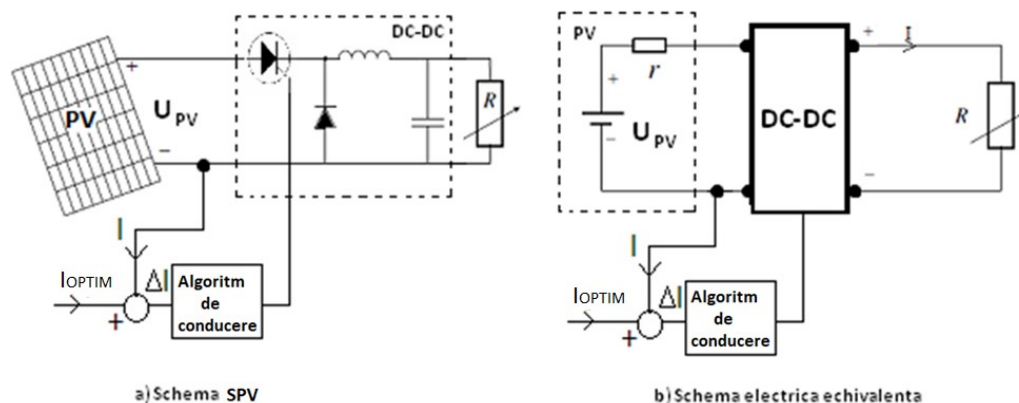


Fig.4.24. Structură de conducere a unui sistem fotovoltaic cu rezistență de sarcină și convertor DC-DC BUCK

Prin măsurarea puterii la momentele de timp "i-2" și "i-1" se obține variația de putere. Dacă puterea crește, se menține această tendință de modificare a rezistenței de sarcină, în sensul că dacă puterea s-a mărit prin micșorarea valorii rezistenței de sarcină, valoarea acesteia se micșorează în continuare. Dacă puterea s-a micșorat prin micșorarea valorii rezistenței de sarcină, în pasul următor aceasta se va mări.

Algoritmul de conducere optimal, conceput pentru a duce sistemul în zona energetică maximă, în 5 pași, este:

Pasul 1

Se măsoară puterea electrică $P(i-2)$ la momentul t_{i-2}

Pasul 2

Se modifică rezistența de sarcină la momentul t_{i-1} în pași de $0.5(\Omega)$

Pasul 3

Se determină puterea electrică $P(i-1)$ la momentul t_{i-1}

Pasul 4

Se compară puterile $P(i-2)$ și $P(i-1)$

Pasul 5a

La $P(i-1) > P(i-2)$ se coninuă micșorarea rezistenței de sarcină

Pasul 5b

La $P(i-1) < P(i-2)$ se mărește valoarea pentru rezistența de sarcină

Schema de implementare a algoritmului de conducere propus, este prezentată în (Fig. 4.25).

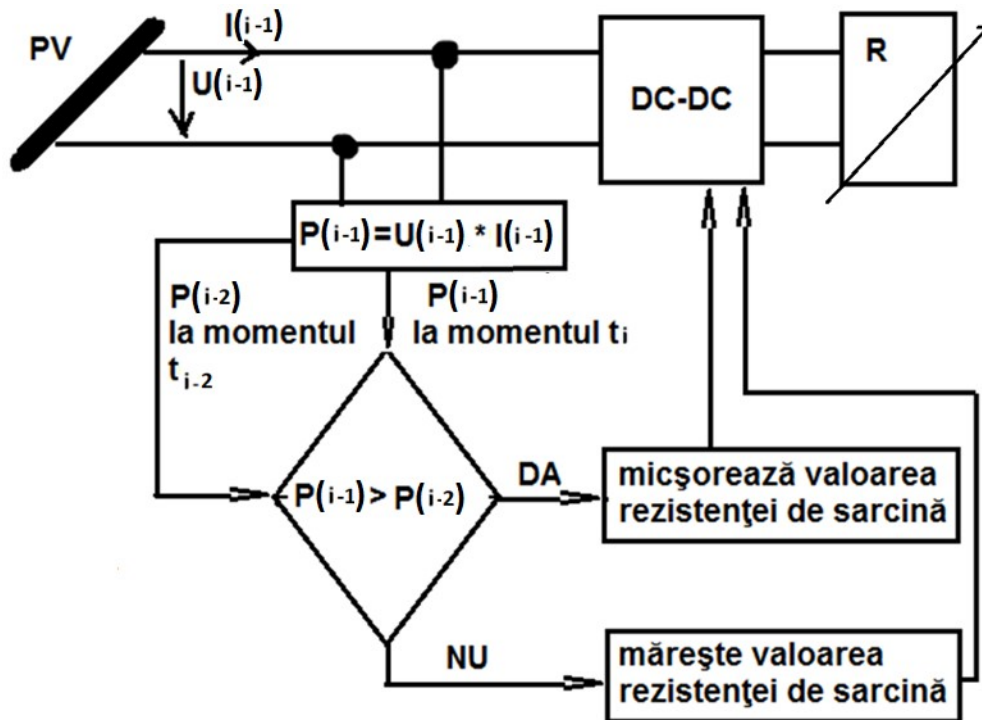


Fig.4.25. Schema de implementare a algoritmului de conducere

Cazul 1 - Analiza funcționării SPV cu rezistența de sarcină modificată în pași de $0.5[\Omega]$, la un interval de observare $\Delta t=50[s]$, pentru un interval de timp $t=[1900-2500] [s]$

t=1900[s]

Rezistența de sarcină se modifică în pași de $0.5[\Omega]$, din 50 în 50 [s],
la **t=1900[s]**, se alege o rezistență de sarcină de valoare **R(1900) = 11[Ω]**.
Pentru această valoare, din caracteristica externă a PV rezultă: (vezi rel 4.6.69)

$$U(1900) = R(1900) \cdot I = 11 \cdot I \quad (4.6.78)$$

obținându-se:

$$I(1900) = 3.151[A] \quad (4.6.79)$$

și tensiunea:

$$U(1900) = 34.66[V] \quad (4.6.80)$$

Puterea debitată rezultă:

$$P(1900) = U(1900) \cdot I(1900) = 34.66 \cdot 3.151 = 109.21[W] \quad (4.6.81)$$

Punctul de putere maximă se obține anulând derivata puterii:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI}(U(1900) \cdot I) = 0 \quad (4.6.82)$$

De unde rezultă:

$$6.0425 \times 10^8 I \sin 0.39301I - 1.025 \times 10^{10} \cos 0.39301I = 0, \quad (4.6.83)$$

cu soluția:

$$I_{OPTIM}(1900) = 3.4817[A] \quad (4.6.84)$$

respectiv:

$$U_{OPTIM}(1900) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot 3.4817 \cdot \frac{883.}{\left(\frac{883.}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600.-1900.)}{3600} \right) \right) \right) \right) \right)^{0.15} = 32.232[V] \quad (4.6.85)$$

$$R_{OPTIM}(1900) = U_{OPTIM}(1900) / I_{OPTIM}(1900) = 32.232 / 3.4817 = 9.2575[\Omega] \quad (4.6.86)$$

$$P_{OPTIM}(1900) = U_{OPTIM}(1900) \cdot I_{OPTIM}(1900) = 32.232 \cdot 3.4817 = 112.22[W] \quad (4.6.87)$$

t=1950[s]

Rezistența de sarcină se modifică în pași de $0.5[\Omega]$, din 50 în 50 [s], la $t=1950[s]$, rezistența de sarcină este **$R(1950)=10.5[\Omega]$** . Pentru această valoare rezulta:

$$U(1950) = R(1950) \cdot I = 10.5 \cdot I = 34.052[V] \quad (4.6.88)$$

$$I(1950) = 3.243[A], \quad (4.6.89)$$

$$P(1950) = 110.43[W] \quad (4.6.90)$$

Coordonatele punctului de putere maximă se obțin în mod similar:

$$I_{OPTIM}(1950) = 3.4762[A] \quad (4.6.91)$$

$$U_{OPTIM}(1950) = 32.232[V] \quad (4.6.92)$$

respectiv:

$$R_{OPTIM}(1950) = U_{OPTIM}(1950) / I_{OPTIM}(1950) = 32.232 / 3.4762 = 9.2722[\Omega] \quad (4.6.93)$$

$$P_{OPTIM}(1950) = U_{OPTIM}(1950) \cdot I_{OPTIM}(1950) = 32.232 \cdot 3.4762 = 112.04[W] \quad (4.6.94)$$

Puterea fiind de:

$$P(1950) = 110.43[W] > P(1900) = 109.21[W] \quad (4.6.95)$$

Scăderea rezistenței de sarcină continuă în pași de $0.5[\Omega]$, devenind la $t=2000[s]$, **$R(2000)=10[\Omega]$** .

În tabelul 4.8 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $[1900 \div 2500]$ [s].

Tabelul 4.8. Puterile, tensiunile și curenții în cazul 1

Timp[s]	$P_{OPTIM}[W]$	$P_{REAL}[W]$	$R_{OPTIM}[\Omega]$	$R_{REAL}[\Omega]$	$I_{OPTIM}[A]$	$I_{REAL}[A]$	$U_{OPTIM}[V]$	$U_{REAL}[V]$
1900	112.22	109.21	9.257	11.0	3.481	3.151	32.232	34.66
1950	112.04	110.43	9.272	10.5	3.476	3.243	32.232	34.052
2000	111.79	111.22	9.292	10.0	3.468	3.334	32.231	33.35
2050	111.47	111.43	9.319	9.5	3.458	3.424	32.232	32.536
2100	111.08	110.92	9.351	9.0	3.446	3.510	32.231	32.596
2150	111.08	110.61	9.351	9.5	3.432	3.412	32.232	32.417
2200	110.1	110.08	9.435	9.3	3.415	3.440	32.232	31.996
2250	109.51	109.50	9.487	9.4	3.397	3.413	32.232	32.083
2300	108.85	108.85	9.544	9.5	3.377	3.384	32.232	32.157
2350	108.13	108.07	9.608	9.4	3.354	3.390	32.232	31.873
2400	107.34	107.3	9.678	9.5	3.330	3.360	32.232	31.928
2450	106.49	106.34	9.755	9.4	3.303	3.363	32.232	31.617
2500	105.58	105.45	9.839	9.5	3.275	3.331	32.231	31.651

Rezultatele simulărilor în Matlab sunt prezentate în (Fig 4.26 – Fig. 4.29):

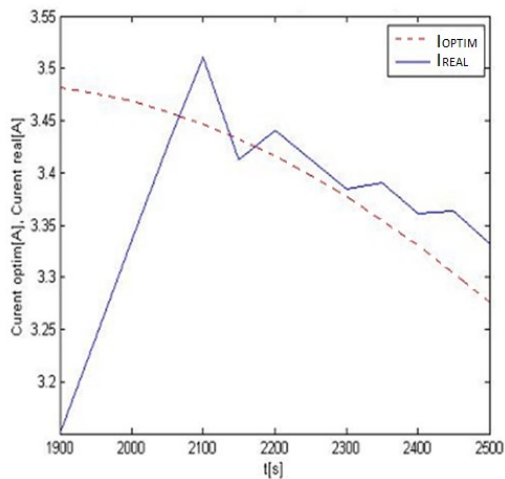


Fig.4.26. Variațiile valorilor optime și reale ale curentului

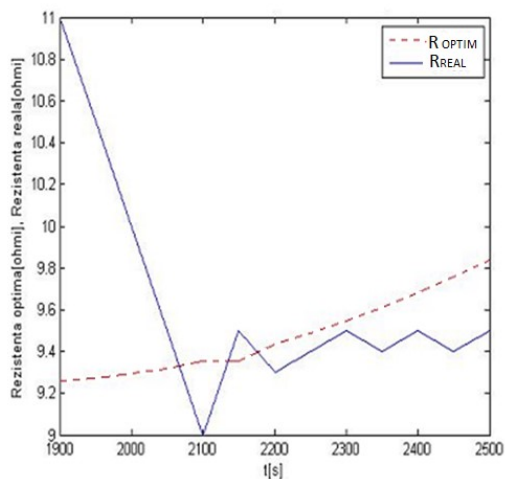


Fig.4.27. Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței

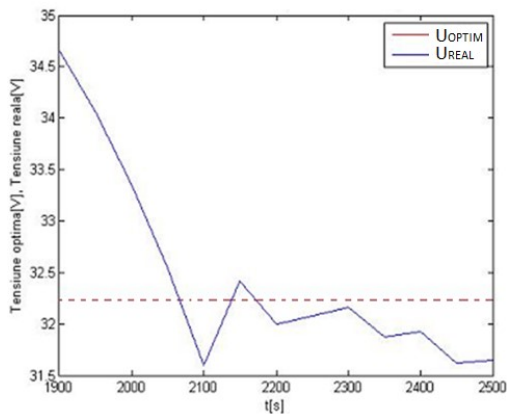


Fig.4.28. Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii

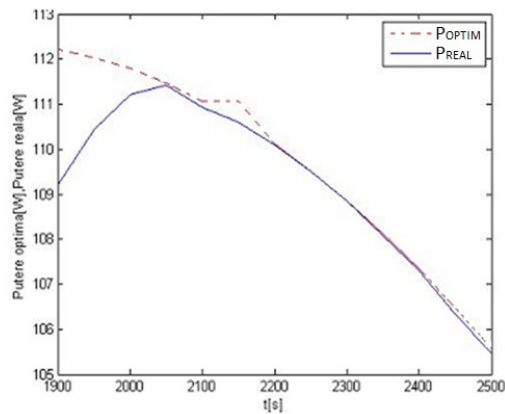


Fig.4.29. Variațiile valorilor optime și reale ale puterii

Observație:

Conducerea la un interval de observare de $t=50[s]$ este nesatisfăcătoare pentru că insolația modificându-se în timp crează perturbații. Se impune, deci, micșorarea intervalului de observare la $\Delta t=5[s]$, pentru a reduce influența modificării insolației în timp.

Cazul 2 - Analiza funcționării SPV în intervalul de timp $t=[2510 - 2580]$ [s], $\Delta t=5[s]$

a) Determinarea mărimilor caracteristice MPP

Mărimile optime se determină din modelul matematic MM-PVS1 al panoului fotovoltaic, model original ce dă dependența tensiunii de curent la diferite grade de insolație.

$t=2510[s]$

Punctul de putere maximă se obține din:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d}{dI} (U(2510) \cdot I) = 0 \quad (4.6.96)$$

sau:

$$5.1472 \times 10^8 I \sin 0.41847I - 8.2 \times 10^9 \cos 0.41847I = 0,$$

cu soluția:

$$I_{OPTIM} (2510) = 3.2699 [A] \quad (4.6.97)$$

respectiv:

$$U_{OPTIM} (2510) = 32.232 [V] \quad (4.6.98)$$

$$R_{OPTIM}(2510) = U_{OPTIM}(2510) / I_{OPTIM}(2510) = 32.232 / 3.2699 = 9.8572[\Omega]$$

(4.6.99)

$$P_{OPTIM}(2510) = U_{OPTIM}(2510) \cdot I_{OPTIM}(2510) = 32.232 \cdot 3.2699 = 105.40[W]$$

(4.6.100)

În mod similar, se prezintă în tabelul 4.9 mărimile optime: I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , R_{OPTIM} , P_{OPTIM} de la $t=2510[s]$ până la $t=2580[s]$ la intervale de timp de 5[s].

Tabelul 4.9 Puterile, tensiunile și curenții optimi în cazul 2

t[s]	$I_{OPTIM}[A]$	$U_{OPTIM}[V]$	$R_{OPTIM}[\Omega]$	$P_{OPTIM}[W]$
2510	3.2699	32.232	9.857	105.40
2515	3.2669	32.232	9.8662	105.30
2520	3.264	32.232	9.875	105.21
2525	3.2699	32.143	9.8300	105.1
2530	3.258	32.232	9.8932	105.01
2535	3.255	32.231	9.9020	104.91
2540	3.2519	32.232	9.9117	104.82
2545	3.2489	32.231	9.9206	104.72
2550	3.2458	32.232	9.9304	104.62
2555	3.2699	32.232	9.8572	105.40
2560	3.2699	32.232	9.8572	105.40
2565	3.2699	32.232	9.8572	105.40
2570	3.2699	32.232	9.8572	105.40
2575	3.2699	32.232	9.8572	105.40
2580	3.2699	32.232	9.8572	105.40

b) Determinarea curenților, tensiunilor și puterilor (reale) la rezistențe de sarcină modificată în pași de 0.2[Ω] la un interval de timp Δt= 5[s].

Mărimile reale, în intervalul de timp analizat, se obțin în continuare prin modificarea rezistenței de sarcină în pași de 0.2[Ω] la intervale de timp de 5[s].

În atingerea punctului de putere maximă, o importanță deosebită o are valoarea intervalului de timp la care se face modificarea sarcinii PV.

În cele ce urmează se arată procedeul de atingere a punctului de putere maximă prin modificarea succesivă a sarcinii în timp, în funcție de puterea debitată.

În acest fel funcționarea este oscilantă în jurul punctului de putere maximă. Modificarea sarcinii la un interval mai mic de timp este soluția optimă.

t=2505[s], $R(2510)=9.5[\Omega]$

La rezistența de sarcină :

$$R(2500) = 9.5[\Omega],$$

(4.6.101)

puterea debitată are valoarea:

$$P(2500) = 105.45[W].$$

(4.6.102)

Rezistența de sarcină se modifică la:

$$R(2505) = 9.7[\Omega]. \quad (4.6.103)$$

La această rezistență de sarcină, din caracteristica externă a PV rezultă:

$$U(2505) = R(2505) \cdot I = 9.7 \cdot I \quad (4.6.104)$$

se obține soluția:

$$I(2505) = 3.2974[A] \quad (4.6.105)$$

și valoarea tensiunii:

$$U(2505) = 31.984[V] \quad (4.6.106)$$

Rezultă:

$$P(2505) = U(2505) \cdot I(2505) = 31.984 \cdot 3.2974 = 105.46[W] \quad (4.6.107)$$

Se observă că puterea debitată crește odată cu creșterea rezistenței de sarcină. Astfel față de $P(2500)=105.45[W]$, la $R(2500)=9.5[\Omega]$ puterea debitată la $t=2505[s]$, pentru $R(2505)=9.7[\Omega]$ este mai **mare** : $P(2505)=105.46[W]$. Rezultă că trebuie menținută tendința de creștere a valorii rezistenței de sarcină, în consecință rezistența de sarcină la $t=2510[s]$ se **mărește** la $R(2510)=9.9[\Omega]$.

$t=2510[s]$, $R(2510)=9.9[\Omega]$

La această rezistență de sarcină, din caracteristica externă a PV, în mod asemănător cazurilor precedente se poate scrie:

$$U(2510) = R(2510) \cdot I = 9.9 \cdot I \quad (4.6.108)$$

rezultă soluția:

$$I(2510) = 3.2628[A] \quad (4.6.109)$$

respectiv:

$$U(2510) = 32.301[V] \quad (4.6.110)$$

$$P(2510) = U(2510) \cdot I(2510) = 32.301 \cdot 3.2628 = 105.39[W] \quad (4.6.111)$$

Se observă că față de $P(2505)=105.46[W]$, cu $R(2505)=9.7[\Omega]$ puterea debitată la $t=2510[s]$, la $R(2510)=9.9[\Omega]$, este mai **mică** : $P(2510)=105.39[W]$, în consecință rezistența de sarcină la $t=2515[s]$ se **micșorează** la $R(2515)=9.7[\Omega]$

Modificarea rezistenței de sarcină în trepte de $0.2[\Omega]$ determină captarea unei puteri P_{REAL} în jurul valorii optimele P_{OPTIM} . La momentul de timp $t=2520[s]$ se face o analiză mai în detaliu a comportării sistemului pentru 4 valori ale rezistenței de sarcină:

$$R = 9.9 [\Omega], R = 9.7 [\Omega], R = 9.5 [\Omega] \text{ și } R = 10,1[\Omega].$$

Se observă o modificare a valorii puterii captate cu mai puțin de 0.15% față de P_{OPTIM} , la modificări a rezistenței de sarcină cu 6%.

Tabelul 4.10 Evoluția în timp a puterii și a rezistenței reale

t[s]	$R_{REAL}[\Omega]$	$P_{REAL}[W]$
2510	9.9	105.39
2515	9.7	105.27
2520	9.9	105.2
2520	9.7	105.17
2520	9.5	105.05
2520	10.1	105.15
2525	9.5	105.39
2530	9.9	105.39
2535	9.9	105.39
2540	9.9	105.39
2545	9.9	105.39
2550	9.9	105.39
2555	9.9	105.39
2560	9.9	105.39

Rezistențele reale R_{REAL} nu sunt egale cu cele optime, date în tabelul 4.10, astfel la $t=2515[s]$ rezistența optimă are valoarea $9.8662[\Omega]$.

În (Fig. 4.30) sunt reprezentate comparativ variațiile în timp a puterilor P_{OPTIM} și P_{REAL} .

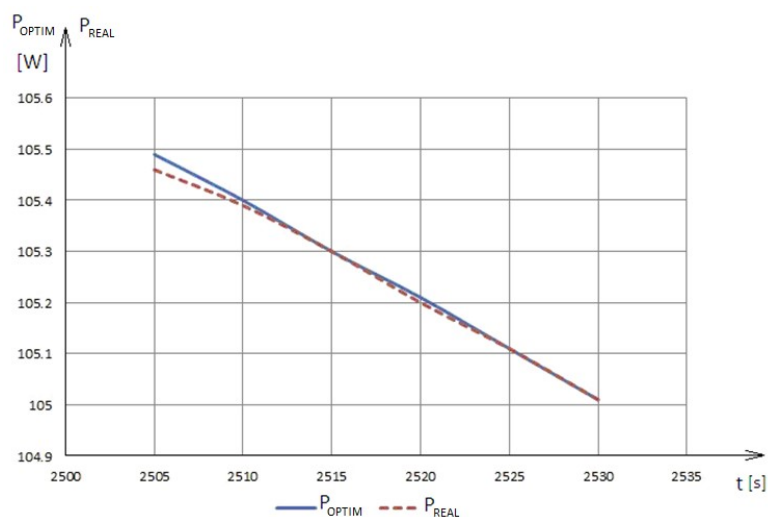


Fig.4.30 Variațiile puterilor în timp

Numai la $R_{REAL} = 9.9[\Omega]$ puterea reală este egală cu cea maxim disponibilă, P_{OPTIM} , în toate celelalte cazuri fiind mai mică.

Nefiind cunoscute coordonatele punctului de putere maximă U_{OPTIM} și I_{OPTIM} , la structurile de conducere bazate pe metoda micilor perturbații nu se poate realiza în permanență o funcționare în punctele de putere maximă.

c) Determinarea curenților, tensiunilor și puterilor la patru rezistențe de sarcină fixe

În comparație cu rezultatele obținute la rezistențe de sarcină optime, în continuare sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t=2505\div 2540$ [s], la patru rezistențe de sarcină fixe.

1) $R_{REAL}=9.1[\Omega]$

În tabelul 4.11 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t=2505\div 2540$ [s], în pași de **5 [s]**, la **$R_{REAL}=9.1[\Omega]$**

Tabelul 4.11. Puterile, tensiunile și curenții la **$R_{REAL}=9.1[\Omega]$**

Timp[s]	P_{OPTIM} [W]	P_{REAL} [W]	R_{OPTIM} [Ω]	R_{REAL} [Ω]	I_{OPTIM} [A]	I_{REAL} [A]	U_{OPTIM} [V]	U_{REAL} [V]
2505	105.49	104.82	9.847	9.1	3.272	3.393	32.231	30.884
2510	105.40	104.71	9.857	9.1	3.269	3.392	32.232	30.869
2515	105.30	104.6	9.866	9.1	3.266	3.390	32.232	30.852
2520	105.21	104.49	9.875	9.1	3.264	3.388	32.232	30.863
2525	105.11	104.37	9.884	9.1	3.261	3.386	32.232	30.819
2530	105.01	104.26	9.893	9.1	3.258	3.384	32.232	30.802
2535	104.91	104.15	9.902	9.1	3.255	3.383	32.231	30.786
2540	104.82	104.03	9.911	9.1	3.251	3.381	32.232	30.768

Variațiile lui U_{OPTIM} , U_{REAL} , I_{OPTIM} , I_{REAL} , R_{OPTIM} , R_{REAL} respectiv P_{OPTIM} , P_{REAL} sunt prezentate în (Fig. 4.31 – Fig. 4.34):

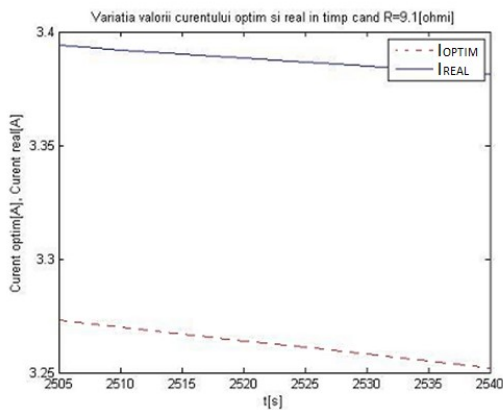


Fig.4.31. Variatiile valorilor optime și reale ale curentului

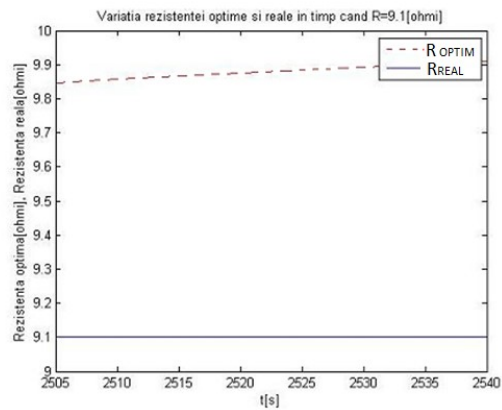


Fig.4.32. Variatiile valorilor optime și reale ale rezistenței

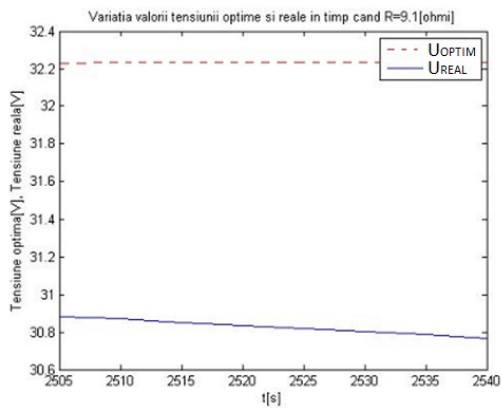


Fig.4.33. Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii

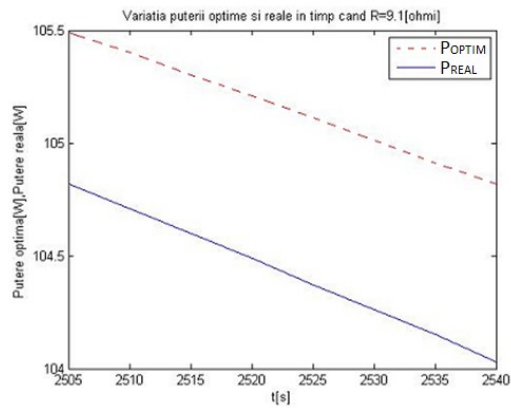


Fig.4.34. Variațiile valorilor optime și reale ale puterii

2) $R_{REAL}=9.3[\Omega]$

În tabelul 4.12 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t=2505\div 2540$ [s], la $R_{REAL}=9.3[\Omega]$.

Tabelul 4.12. Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL}=9.3[\Omega]$

Timp[s]	P_{OPTIM} [W]	P_{REAL} [W]	R_{OPTIM} [Ω]	R_{REAL} [Ω]	I_{OPTIM} [A]	I_{REAL} [A]	U_{OPTIM} [V]	U_{REAL} [V]
2505	105.49	105.14	9.847	9.3	3.272	3.362	32.231	31.27
2510	105.40	105.03	9.857	9.3	3.269	3.360	32.232	31.254
2515	105.30	104.93	9.866	9.3	3.266	3.358	32.232	31.239
2520	105.21	104.82	9.875	9.3	3.264	3.357	32.232	31.223
2525	105.11	104.71	9.884	9.3	3.261	3.355	32.232	31.206
2530	105.01	104.6	9.893	9.3	3.258	3.353	32.232	31.189
2535	104.91	104.5	9.902	9.3	3.255	3.353	32.231	31.174
2540	104.82	104.38	9.911	9.3	3.251	3.350	32.232	31.157

Variațiile lui U_{OPTIM} , U_{REAL} , I_{OPTIM} , I_{REAL} , R_{OPTIM} , R_{REAL} respectiv P_{OPTIM} , P_{REAL} sunt prezentate în (Fig. 4.35 – Fig. 4.38):

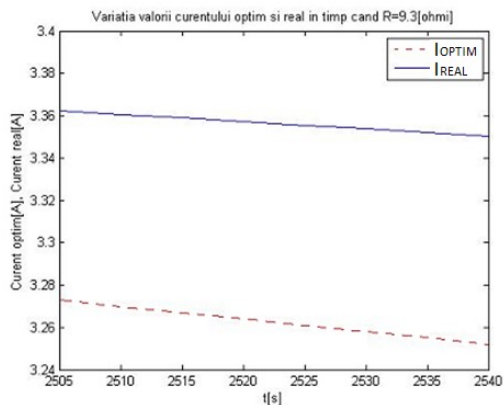


Fig.4.35. Variatiile valorilor optime și reale ale curentului

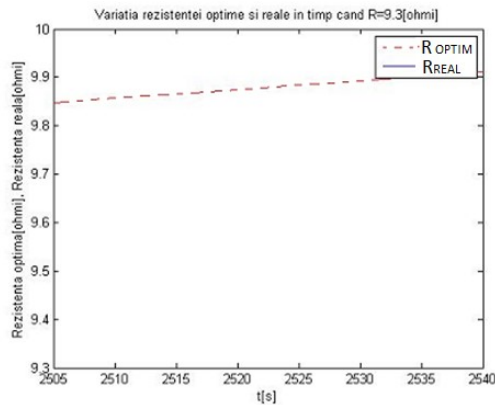


Fig.4.36. Variatiile valorilor optime și reale ale rezistenței

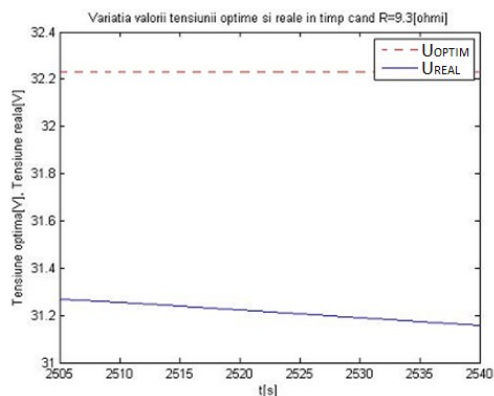


Fig.4.37. Variatiile valorilor optime și reale ale tensiunii

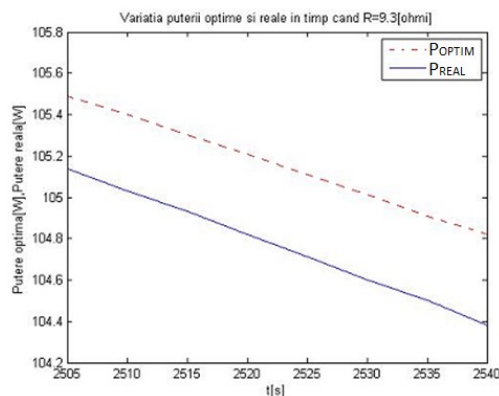


Fig.4.38. Variatiile valorilor optime și reale ale puterii

3) $R_{REAL}=9.7[\Omega]$

În tabelul 4.13 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t=2505\div 2540$ [s], la $R_{REAL}=9.7[\Omega]$.

Tabelul 4.13. Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL}=9.7[\Omega]$

Timp[s]	$P_{OPTIM}[W]$	$P_{REAL}[W]$	$R_{OPTIM}[\Omega]$	$R_{REAL}[\Omega]$	$I_{OPTIM}[A]$	$I_{REAL}[A]$	$U_{OPTIM}[V]$	$U_{REAL}[V]$
2505	9.847	105,46	9.847	9.7	3.272	3.297	32.231	31.984
2510	105.40	105.37	9.857	9.7	3.269	3.295	32.232	31.969
2515	105.30	105.27	9.866	9.7	3.266	3.294	32.232	31.955
2520	105.21	105.17	9.875	9.7	3.264	3.292	32.232	31.939
2525	105.11	105.07	9.884	9.7	3.261	3.291	32.232	31.925
2530	105.01	104.97	9.893	9.7	3.258	3.289	32.232	31.910
2535	104.91	104.87	9.902	9.7	3.255	3.288	32.231	31.894
2540	104.82	104.77	9.911	9.7	3.251	3.286	32.232	31.879

Variațiile lui U_{OPTIM} , U_{REAL} , I_{OPTIM} , I_{REAL} , R_{OPTIM} , R_{REAL} respectiv P_{OPTIM} , P_{REAL} sunt prezentate în (Fig. 4.39 – Fig. 4.42):

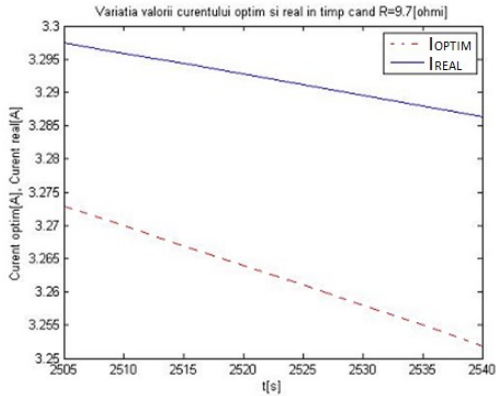


Fig.4.39. Variațiile valorilor optime și reale ale curentului

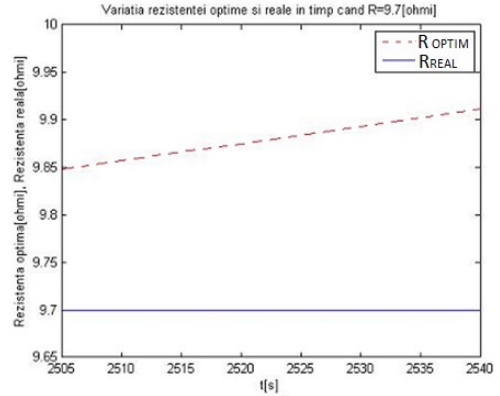


Fig.4.40. Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței

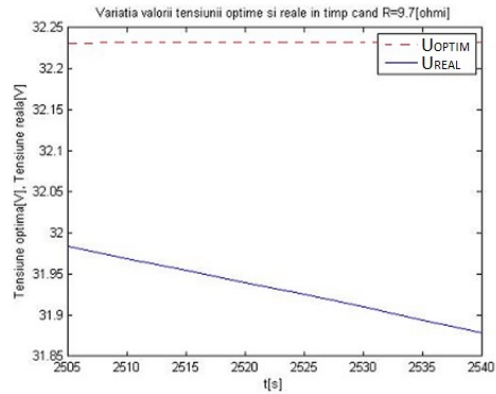


Fig.4.41. Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii

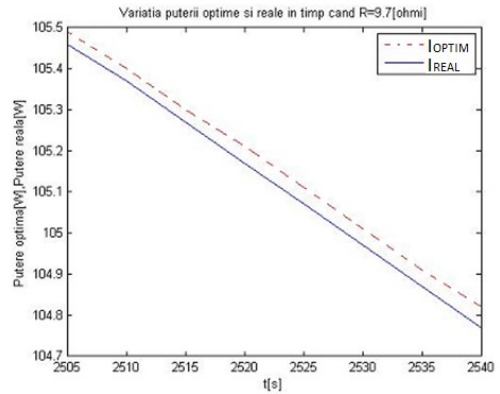


Fig.4.42. Variațiile valorilor optime și reale ale puterii

4) $R_{REAL}=9.9[\Omega]$

În tabelul 4.14 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $\Delta t=2510\div 2540$ [s], la $R_{REAL}=9.9[\Omega]$.

Tabelul 4.14. Puterile, tensiunile și curenții la $R_{REAL}=9.9[\Omega]$

Timp[s]	P_{OPTIM} [W]	P_{REAL} [W]	R_{OPTIM} [Ω]	R_{REAL} [Ω]	I_{OPTIM} [A]	I_{REAL} [A]	U_{OPTIM} [V]	U_{REAL} [V]
2510	105.40	105.39	9.857	9.9	3.269	3.262	32.232	32.301
2515	105.30	105.3	9.866	9.9	3.266	3.261	32.232	32.287
2520	105.21	105.2	9.875	9.9	3.264	3.259	32.232	32.273
2525	105.11	105.11	9.884	9.9	3.261	3.258	32.232	32.257
2530	105.01	105.01	9.893	9.9	3.258	3.256	32.232	32.242
2535	104.91	104.91	9.902	9.9	3.255	3.255	32.231	32.228
2540	104.82	104.81	9.911	9.9	3.251	3.253	32.232	32.213

Variațiile lui U_{OPTIM} , U_{REAL} , I_{OPTIM} , I_{REAL} , R_{OPTIM} , R_{REAL} respectiv P_{OPTIM} , P_{REAL} sunt prezentate în (Fig. 4.43 – Fig. 4.46):

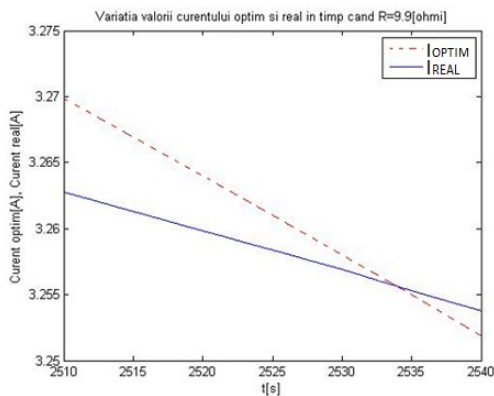


Fig.4.43. Variațiile valorilor optime și reale ale curentului

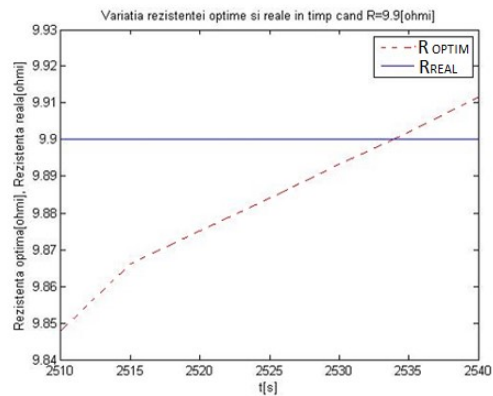


Fig.4.44. Variațiile valorilor optime și reale ale rezistenței

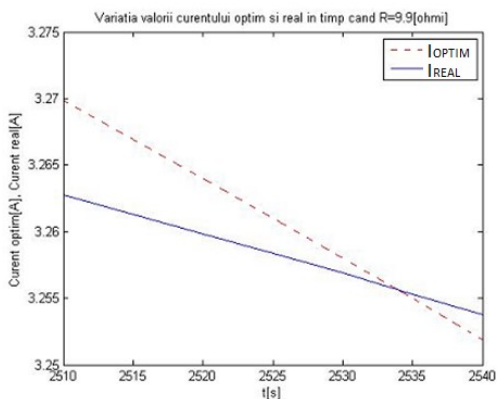


Fig.4.45. Variațiile valorilor optime și reale ale tensiunii

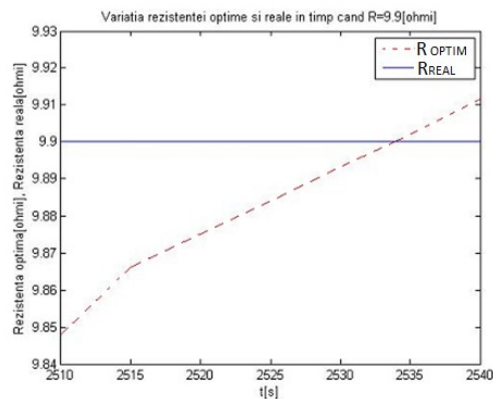


Fig.4.46. Variațiile valorilor optime și reale ale puterii

Concluzii:

Din rezultatele obținute se poate concluziona că funcționarea la $R=ct$, dar în vecinătatea lui R_{OPTIM} nu diminuează semnificativ puterea obținută : (de exemplu, $P(2540)=104,04[W]$ și $P_{optim}=104,82[W]$, deci $\Delta P=0.79[W]$ sau 0.7%).

La o modificare mai mare a valorii intensității radiației solare, diferențele între valorile reale și cele optime ale puterii se măresc și deci este necesară corelarea valorii rezistenței de sarcină cu valoarea radiației solare.

Acest fapt stă la baza sistemelor de conducere, care au ca referință curentul optim (I_{optim}), calculat la intervale de timp Δt .

Referitor la conducerea sistemului SPV prin adaptarea rezistenței de sarcină la valoarea puterii debitate, astfel încât aceasta să fie cât mai mare, apar următoarele aspecte:

- a) puterea maximă debitată se obține pe intervale scurte de timp;
- b) deoarece puterea obținută nu este întotdeauna maximă, energia solară captată este sub valoarea optimă;
- c) determinarea rezistenței de sarcină se face relativ complicat, prin mai multe încercări și nu ia valoarea optimă $R_{OPTIM} = U_{OPTIM} / I_{OPTIM}$, deoarece modificarea sarcinii se bazează doar pe comparația puterilor, valorile lui U_{OPTIM} și I_{OPTIM} nefiind cunoscute.

S-a demonstrat, că sistemele de conducere uzuale nu realizează o captare maximă a energiei solare.

Din rezultatele prezentate se pot remarca următoarele **concluzii** importante:

- 1) *modificarea rezistenței de sarcină prin monitorizarea în mod continuu sau în trepte - a puterii electrice debitate, nu asigură o funcționare a sistemului panou fotovoltaic-rezistență echivalentă, (PV+R), în zona MPP;*
- 2) *funcționarea sistemului la $R=ct.$, (în zona lui R_{OPTIM}), este mai eficientă, din punct de vedere energetic, decât o modificare a lui R după puterea debitată.*

4.7. Sisteme de conducere bazate pe metoda ADP cu mărimi de referință corespunzătoare MPP

Toate structurile de conducere care "caută" punctul de putere maximă, prin măsurarea puterii debitate, nu sunt capabile să realizeze o captare maximă a energiei solare disponibile.

Acest lucru se datorează faptului că funcționarea sistemului (PV + DC-DC + AE) este totdeauna sub nivelul de putere maximă, prin faptul că rezistența de sarcină R de la bornele PV se modifică în pași în funcție de puterea electrică măsurată pe orice interval de timp, $R \neq R_{OPTIM}$. [Him 2018, Sub 2017, Zon 2017, Aza 2008, Chi 2013, Dha 2013]

Prin metoda propusă în teză, în care se cunoaște punctul de putere maximă, se poate realiza o funcționare optimă în sensul captării unei energii maxime, deoarece la bornele PV, cunoscând pe I_{OPTIM} se realizează o rezistență de sarcină de valoare optimă: R_{OPTIM} [Gan 2012, Gan2020-1].

Pe baza cunoașterii mărimilor optimale R_{OPTIM} și I_{OPTIM} se realizează o funcționare în MPP, randamentul de conversie fiind maxim.

4.7.1. Sistem de conducere cu I_{OPTIM} și U_{OPTIM} mărimi de referință

Căutarea punctului de putere maximă P_{OPTIM} este mult mai eficientă dacă se modifică rezistența de sarcină R atât după tensiunea U (în fapt după $\Delta U = U_{OPTIM} - U$), cât și după curentul I (în fapt după $\Delta I = I_{OPTIM} - I$), deoarece la un reglaj numai după U sau numai după I apar următoarele aspecte (după cum se poate vedea în (Fig. 4.47)):

- a) în zona $U_0 - P_{OPTIM}$, U nu se modifică semnificativ
- b) în zona $I_{SC} - P_{OPTIM}$, I nu se modifică semnificativ.

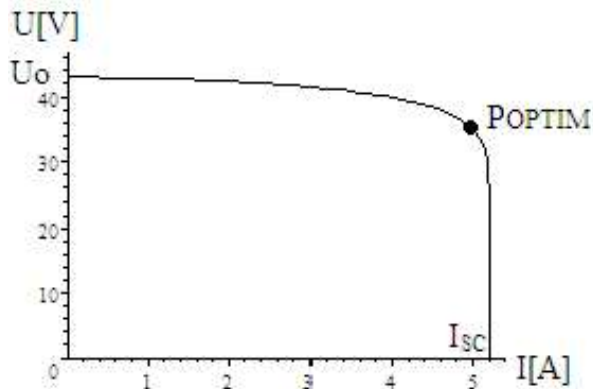


Fig.4.47.Caracteristica externă a PV

În consecință, structura de conducere propusă conține două regulatoare de tip P : R_1 cu intrarea ΔI și R_2 cu intrarea ΔU (Fig. 4.48). Prin însumarea celor două ieșiri se obține:

$$(\Delta R = K_1 \cdot \Delta U + K_2 \cdot \Delta I) \quad (4.7.1)$$

modificarea rezistenței de sarcină R , la momentul k se face sub forma:

$$R(k) = R(k-1) - \Delta R = R(k-1) - (K_1 \Delta U + K_2 \Delta I) \quad (4.7.2)$$

cu:

$$\Delta U = U_{OPTIM} - U(k-1)$$

$$\Delta I = I_{OPTIM} - I(k-1)$$

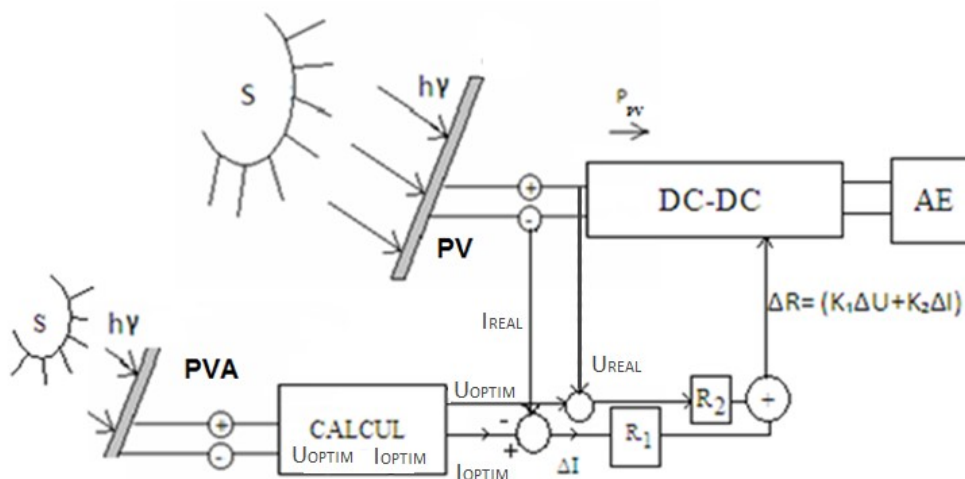


Fig.4.48.Structură de conducere cu U_{OPTIM} și I_{OPTIM} mărimi de referință
PVA – Panou fotovoltaic auxiliar ; R_1, R_2 – Regulator de tip P

Coordonatele punctului de putere maximă P_{OPTIM} , la $P_S=1000[W/m^2]$ sunt (pe baza (rel 3.45) și a metodei ADP) :

$$\text{curentul :} \quad I_{OPTIM} = 4.8472 [A] ; \quad (4.7.3)$$

$$\text{tensiunea :} \quad U_{OPTIM} = 36.474 [V] ; \quad (4.7.4)$$

$$\text{puterea :} \quad P_{OPTIM} = 176.8 [W] ; \quad (4.7.5)$$

$$\text{rezistența de sarcină optimă:} \quad R_{OPTIM} = 7.5248 [\Omega]. \quad (4.7.6)$$

Algoritm de conducere se bazează pe o reglare în pași a rezistenței de sarcină, cunoscând marimile optimale U_{OPTIM} și I_{OPTIM} .

La $t=0$ rezistența de sarcină fiind, de exemplu $R(0)=8[\Omega]$, reglarea se face în pași la intervale de timp T .

Având în vedere faptul că la deplasarea punctului de funcționare, când scade tensiunea, curentul crește (și invers). Coeficienții $K_{1,2}$ trebuie să fie de semne contrare.

În continuare coeficienții se aleg de valori absolute egale, dar de semne diferite $K_1=-K$, $K_2 = K$, rezistențele de sarcină modificându-se astfel:

$$R(k) = R(k-1) - (-K \cdot (U_{OPTIM} - U_{REAL}) + K \cdot (I_{OPTIM} - I_{REAL})) \quad (4.7.7)$$

Pasul 0 - rezistența de sarcină **$R(0)=8[\Omega]$**

curentul debitat se obține din ecuația (vezi 3.44) :

$$U(0) = 43 \left(\cos \left(\frac{446.32 \cdot I}{1000 \cdot 1.0566} \right) \right)^{7.3737 \times 10^{-2}} = 8I \quad (4.7.8)$$

rezultând:

$$\text{curentul debitat:} \quad I_{REAL} = 4.6859 [A] \quad (4.7.9)$$

$$\text{tensiunea la bornele PV:} \quad U_{REAL} = 37.487 [V] \quad (4.7.10)$$

puterea debitată :

$$P(0) = U \cdot I = 37.487 \cdot 4.6859 = 175.66 [W] \quad (4.7.11)$$

eroarea de curent :

$$\Delta I = I_{OPTIM} - I_{REAL} = 4.8472 - 4.6859 = 0.1613 [A] \quad (4.7.12)$$

eroarea de tensiune :

$$\Delta U = U_{OPTIM} - U_{REAL} = 36.474 - 37.487 = -1.013 [V] \quad (4.7.13)$$

Deoarece rezistența de sarcină optimă are valoarea: $R_{OPTIM}=7.5248[\Omega]$

ΔR devine:

$$\Delta R = R_{OPTIM} - R_{REAL} = 7.5248 - 8 = -0.4752 [\Omega] \quad (4.7.14)$$

sau:

$$0.4752 = -K \cdot \Delta U + K \cdot \Delta I = K \cdot 1.013 + K \cdot 0.1613 \quad (4.7.15)$$

de unde rezultă:

$$0.4752 = K \cdot 1.013 + K \cdot 0.1613 \quad (4.7.16)$$

deci:

$$K = 0.4 \quad (4.7.17)$$

Cu această valoare a lui K se calculează rezistența de sarcină necesară pentru pasul următor:

$$R(1) = R(0) - \Delta R = 8 - (-K \cdot \Delta U + K \cdot \Delta I) = 8 - 0.4(1.013 + 0.1613) = 7.5303 [\Omega] \quad (4.7.18)$$

Pasul 1 - rezistența de sarcină $R(1)=7.5303[\Omega]$

Procedând similar pasului 0, rezultă:

$$\text{curentul debitat (real):} \quad I(1) = 4.8454 [A] \quad (4.7.19)$$

$$\text{tensiunea la bornele PV :} \quad U(1) = 36.487 [V] \quad (4.7.20)$$

puterea debitată :

$$P(1) = U \cdot I = 36.487 \cdot 4.8454 = 176.79 [W] \quad (4.7.21)$$

eroarea de curent:

$$\Delta I = I_{OPTIM} - I_{REAL} = 4.8472 - 4.8454 = 0.0018 [A] \quad (4.7.22)$$

eroarea de tensiune:

$$\Delta U = U_{OPTIM} - U_{REAL} = 36.474 - 36.487 = -0.013 [V] \quad (4.7.23)$$

rezistența de sarcină necesară pentru pasul următor:

$$R(2) = 7.5303 - 0.4(0.013 + 0.0018) = 7.5244 [\Omega] \quad (4.7.24)$$

Pasul 2 - rezistența de sarcină $R(2)=7.5244[\Omega]$

Rezultă similar:

$$\text{curentul debitat:} \quad I(2) = 4.8473 [A] \text{ din} \quad (4.7.25)$$

$$\text{tensiunea la bornele PV :} \quad U(2) = 36.473 [V] \quad (4.7.26)$$

puterea debitată :

$$P(2) = U \cdot I = 36.473 \cdot 4.8473 = 176.8 [W] \quad (4.7.27)$$

eroarea de curent :

$$\Delta I = I_{OPTIM} - I_{REAL} = 4.8472 - 4.8473 = -0.0001[A] \quad (4.7.28)$$

eroarea de tensiune:

$$\Delta U = U_{OPTIM} - U_{REAL} = 36.474 - 36.473 = 0.001[V] \quad (4.7.29)$$

rezistența de sarcină necesară pentru pasul următor:

$$R(3) = 7.5244 - 0.4(-0.001 - 0.0001) = 7.5248[\Omega] \quad (4.7.30)$$

pasul 3 - rezistența de sarcină $R(3)=7.5248[\Omega]$

Rezultă :

curentul debitat : $I(3) = 4.8472[A]$ (4.7.31)

tensiunea la bornele PV: $U(3) = 36.474[V]$ (4.7.32)

puterea debitată:

$$P(3) = U \cdot I = 36.473 \cdot 4.8472 = 176.8[W] \quad (4.7.33)$$

eroarea de curent:

$$\Delta I = I_{OPTIM} - I_{REAL} = 4.8472 - 4.8472 = 0[A] \quad (4.7.34)$$

eroarea de tensiune :

$$\Delta U = U_{OPTIM} - U_{REAL} = 36.474 - 36.474 = 0[V] \quad (4.7.35)$$

Deoarece erorile de tensiune și curent sunt nule, s-a atins punctul de optim (P_{OPTIM}). Deplasarea punctului de funcționare ($P(1,2,3)$) pe caracteristica externă este reprezentată în (Fig. 4.49).

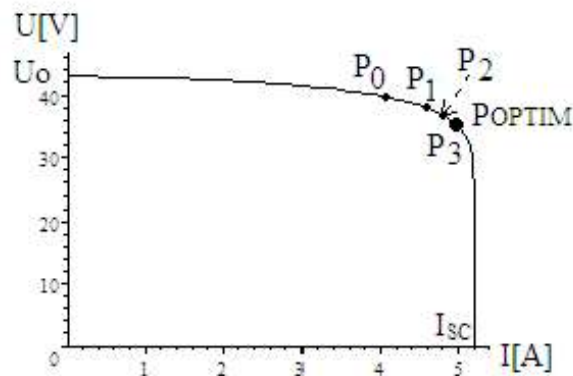


Fig.4.49. Deplasarea punctului de funcționare

Din (Fig. 4.49) se observă cum după trei pași punctul de funcționare P_3 se confundă cu P_{OPTIM} , ceea ce demonstrează eficacitatea metodei de conducere propusă.

4.7.2. Structură de conducere cu I_{OPTIM} mărime de referință

În comparație cu cele prezentate anterior se analizează și o structură de conducere cu I_{OPTIM} ca mărime de referință.

Prin folosirea modelului matematic al PV (MM-PVS2)(rel 3.38), conducerea sistemului în punctul de putere maximă presupune calculul curentului optim, I_{OPTIM} , la un nivel de insolație dat.

La o putere radiantă P_S , puterea electrică debitată de PV este (vezi rel.3.50b):

$$P = U \cdot I = 41 \cdot \left(\cos \frac{3.14}{8} \cdot I \frac{883}{P_S} \right)^{0.15} \cdot I \quad (4.7.36)$$

Curentul optim, corespunzător puterii maxime, se obține prin anularea derivatei puterii în raport cu I:

$$\frac{dP}{di} = 0 \quad (4.7.37)$$

cu soluția:
$$I_{OPTIM} = 3.9482 \times 10^{-3} P_S \quad (4.7.38)$$

Rezultatul obținut este deosebit de util, în sensul că la orice nivel de radiație caracterizat prin puterea radiantă P_S , se cunoaște valoarea curentului optim I_{OPTIM} . Dependența curentului optim de P_S este liniară, (Fig. 4.50).

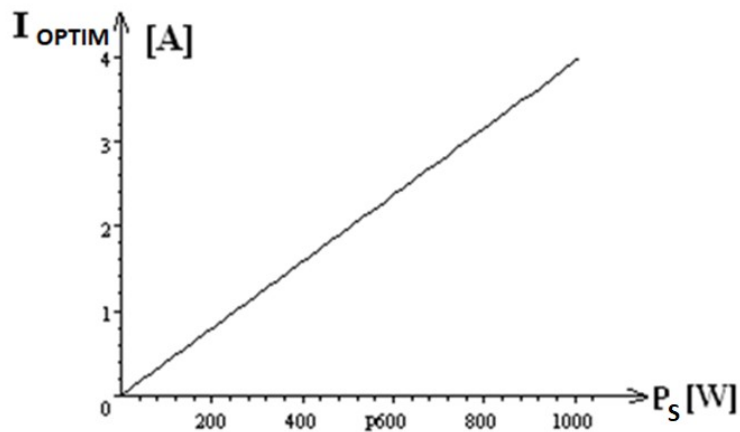


Fig.4.50. Dependența curentului optim de puterea radiantă

Tensiunea optimă la PV devine:

$$U_{OPTIM} = 41 \cdot \left(\cos \frac{3.14}{8} \cdot 3.9482 \times 10^{-3} P_S \frac{883}{P_S} \right)^{0.15} \quad (4.7.39)$$

rezultând rezistența optimă:

$$R_{OPTIM} = \frac{U_{OPTIM}}{I_{OPTIM}} = \frac{32.232}{3.9482 \times 10^{-3} P_s} \quad (4.7.40)$$

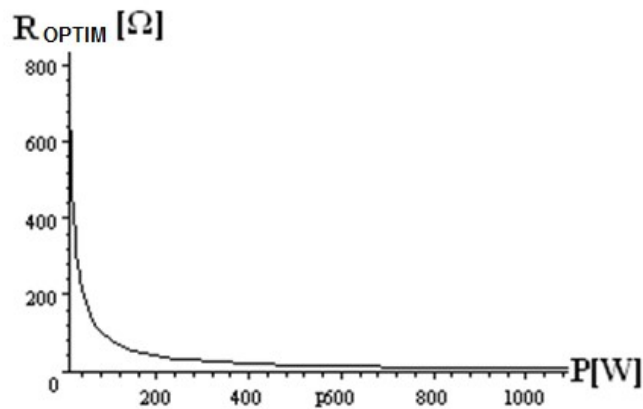


Fig.4.51. Dependența rezistenței optime de puterea radiantă

La valori mari ale nivelului de insolație, ($1000[W/m^2]$), rezistența optimă are valoarea cea mai mică: $R_{OPTIM}=8.1637[\Omega]$, iar la valori mici, ($100[W/m^2]$), $R_{OPTIM}=81.637[\Omega]$

Așadar, la variații mari ale nivelului de insolație se impune o rezistență de sarcină într-un domeniu larg: $[8 \div 900][\Omega]$

Rezultatele de mai sus stau la baza realizării sistemului de conducere bazat pe modelul matematic al MM-PVS2, reprezentat în (Fig. 4.52).

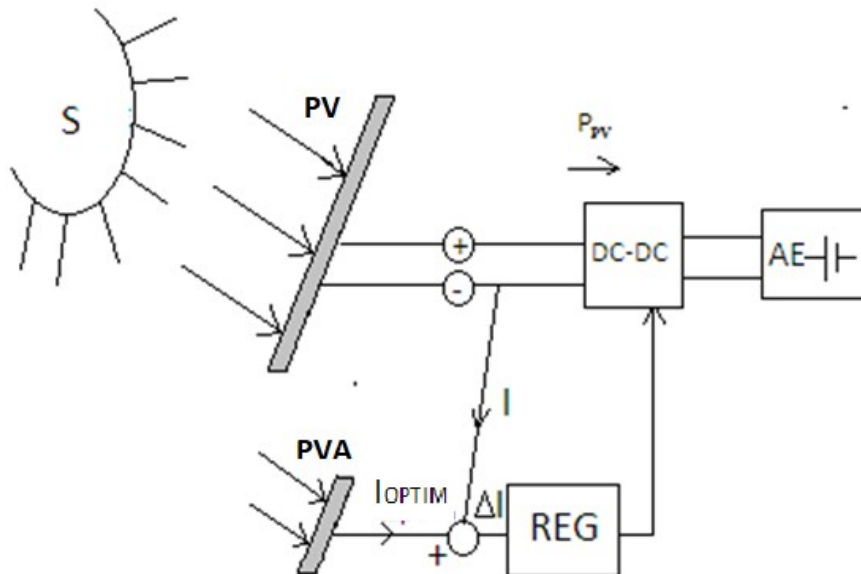


Fig.4.52. Sistem de conducere cu I_{OPTIM} mărime de referință

Curentul optim I_{OPTIM} se compară cu cel real I și se obține eroarea ΔI :

$$\Delta I = I_{OPTIM} - I, \quad (4.7.41)$$

ce va fi folosită ca și mărime de intrare în regulatorul REG.

Mărimea de ieșire a regulatorului este unghiul de comandă al tiristoarelor convertorului de putere DC-DC, convertor care transferă puterea de la PV la AE prin corelarea celor două tensiuni (de la PV și de la AE).

Studiu de caz

La timpul $t=1900[s]$ și la rezistența de sarcină $R_{real1}=11[\Omega]$ se obțin mărimile de bază (vezi tabelul 4.8):

$$\text{-tensiunea reală : } U_{real} = 34.660 \quad [V] \quad (4.7.42)$$

$$\text{-curentul real : } I_{real} = 3.151 \quad [A] \quad (4.7.43)$$

$$\text{-puterea utilă : } P_{real} = 109.210 \quad [W] \quad (4.7.44)$$

Coordonatele punctului de putere maximă sunt:

$$U_{OPTIM} = 32.232 \quad [V] \quad (4.7.45)$$

$$I_{OPTIM} = 3.4817 \quad [A] \quad (4.7.46)$$

$$P_{OPTIM} = 112.220 \quad [W] \quad (4.7.47)$$

La timpul $t=1950[s]$ curentul optim devine: $I_{OPTIM2}=3.4762[A]$ și deci rezultă:

$$\Delta I = I_{OPTIM2} - I_{REAL1} = 3.4762 - 3.151 = 0.3252[A] \quad (4.7.48)$$

Procedând analog cazului precedent K devine:

$$K = \frac{\Delta R_{OPTIM}}{\Delta I_{OPTIM}} = \frac{R_{OPTIM}(1950) - R_{OPTIM}(1900)}{I_{OPTIM}(1950) - I_{OPTIM}(1900)} = \frac{9.2722 - 9.2575}{3.4762 - 3.4817} = -2.6727 \quad (4.7.49)$$

și rezistența de sarcină se calculează ca:

$$R_{real2} = R_{real1} \pm K \cdot \Delta I = 11. - 2.6727 \cdot 0.3252 = 10.131[\Omega] = R(1950) \quad (4.7.50)$$

Cu această valoare a rezistenței de sarcină R_{real2} din intersecția caracteristicii externe a PV cu dreapta $U=R \cdot I$ se obține:

$$U(1950) = 41 \cdot \left(\cos \left(\frac{3.14}{8} \cdot I \cdot \frac{883}{\left(\frac{883}{3} \left(2 + \sin \left(\frac{3.14(3600-1950)}{3600} \right) \right) \right)} \right) \right)^{0.15} = R(1950) \cdot I = 10.131 \cdot I \quad (4.7.51)$$

rezultând:

curentul $I(1950)=3.3132[A]$ și respectiv tensiunea $U(1950)=33.565[V]$.

Puterea debitată rezultă:

$$P(1950) = U(1950) \cdot I(1950) = 33.565 \cdot 3.3132 = 111.21[W] \quad (4.7.52)$$

Pe un interval de timp $\Delta t=550[s]$ se obțin rezultatele din tabelul 4.15 :

Tabelul 4.15. Rezultatele obținute cu rezistențe de sarcină modificate după I_{OPTIM}

Timp[s]	Popt[W]	Preal[W]	Ropt[Ω]	Rreal[Ω]	Iopt[A]	Ireal[A]	Uopt[V]	Ureal[V]
2000	111.79	111.79	9.292	9.261	3.468	3.474	32.231	32.178
2050	111.47	111.47	9.319	9.290	3.458	3.463	32.232	32.181
2100	111.08	111.08	9.351	9.290	3.446	3.457	32.231	32.125
2150	111.08	110.62	9.351	9.339	3.432	3.441	32.232	32.143
2200	110.1	110.1	9.435	9.386	3.415	3.424	32.232	32.146
2250	109.51	109.5	9.487	9.434	3.397	3.406	32.232	32.142
2300	108.85	108.84	9.544	9.486	3.377	3.387	32.232	32.132
2350	108.13	108.12	9.608	9.543	3.354	3.366	32.232	32.122
2400	107.34	107.33	9.678	9.605	3.330	3.342	32.232	32.109
2500	106.49	106.48	9.755	9.673	3.303	3.317	32.232	32.094
2550	105.58	105.58	9.839	9.746	3.275	3.291	32.231	32.078

Reprezentarea grafică a acestor mărimi este dată în (Fig. 4.53 – Fig. 4.56):

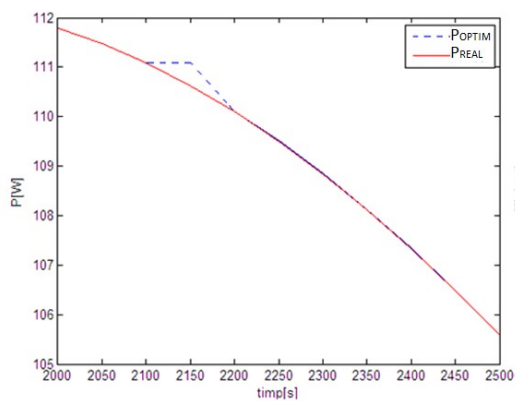


Fig.4.53. Evoluția puterilor în timp

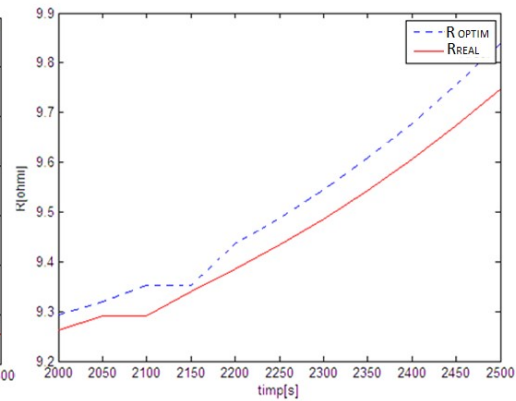


Fig.4.54. Evoluția rezistențelor în timp

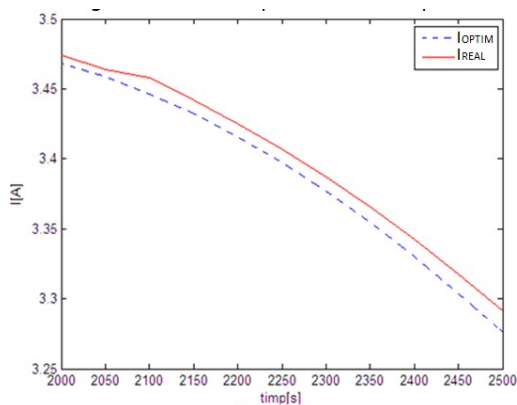


Fig.4.55. Evoluția curenților în timp

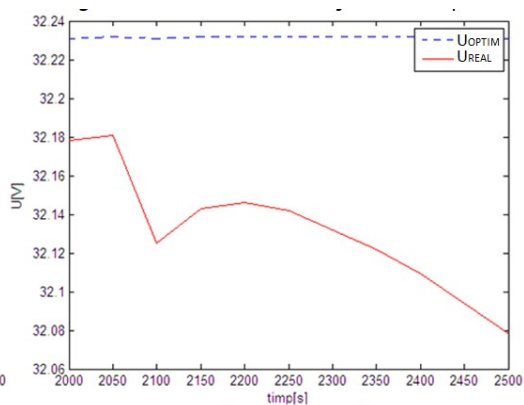


Fig.4.56. Evoluția tensiunilor în timp

Valorile reale ale rezistenței de sarcină se apropie de cele optime pe tot intervalul de timp analizat, iar acest fapt conduce la captarea unei energii solare maxime. Puterea electrică măsurată la intervale de timp $t=50[s]$ este apropiată de cea optimă, (maxim disponibilă). La începutul intervalului sunt mici diferențe între valoarea optimă și cea reală, diferențe ce pot fi atribuite valorii inițiale a rezistenței de sarcină care nu este egală cu cea optimă.

Modelarea caracteristicilor externe $U(I)$ a PV [Gan 2012] dă posibilitatea găsirii coordonatelor punctului de putere maximă, la intervale de timp date și pe baza acestora se estimează valoarea rezistenței de sarcină care realizează o captare maximă a energiei solare.

4.8. Concluzii

Din simulările efectuate s-au putut observa regimurile de funcționare clasice folosite în conducerea sistemelor electroenergetice solare. Aceste regimuri nu asigură funcționarea în punctul de putere maximă, pierderile de energie, la puteri mari, fiind semnificative. Prin metoda de conducere propusă, anularea derivatei puterii, se asigură o funcționare în punctul P_{OPTIM} , energia solară captată fiind maximă. Din simulările prezentate se observă variația în timp a curentului în AE, la modificarea gradului de insolație. Prin modificarea insolației se modifică puterea dată de PV și deci valoarea curentului de încărcare a AE.

Funcționarea în punctul de putere maximă este esențială și aceasta se realizează prin modificarea potrivită a sarcinii în timp. O conducere eficientă a sistemului se realizează prin monitorizarea puterii electrice debitate și modificarea succesivă a sarcinii, astfel că în timp se va obține o funcționare oscilantă în jurul punctului de putere maximă.

S-a demonstrat că metoda micilor perturbații în unele cazuri nu asigură determinarea coordonatelor punctului MPP.

Metoda originală propusă, anularea derivatei puterii, asigură determinarea mărimilor de referință U_{OPTIM} și I_{OPTIM} . Cu aceste mărimi de referință se prezintă un sistem de conducere care duce sistemul în zona energetică maximă.

5. STAND PENTRU VERIFICĂRI EXPERIMENTALE

În cadrul capitolului se prezintă standul experimental realizat, destinat identificării experimentale a modelelor matematice propuse, analizei funcționării optime a PV și respectiv validării rezultatelor.

5.1. Considerații preliminare

Standul experimental realizat având schemele bloc prezentate în (Fig. 5.1 și Fig. 5.8), are în componența sa o arie de 6 panouri fotovoltaice PV de putere (Fig. 5.3), care sunt conectate la un modul convertor DC-DC, care la rândul lui este conectat la un reostat inteligent. Standul mai conține un panou fotovoltaic auxiliar (PVA), de același tip și putere ca și panourile utilizate în circuitul de forță, utilizat în principal pentru determinarea mărimilor optime I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , P_{OPTIM} .

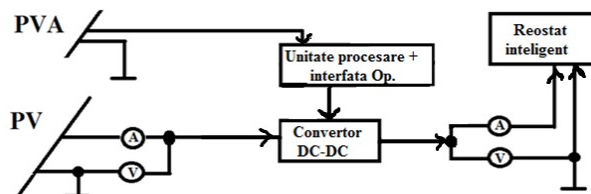


Fig. 5.1 – Schema bloc de principiu a standului experimental

Datele obținute de la PVA (tensiunea și curentul) sunt prelucrate de către unitatea de procesare, care comandă convertorul DC-DC astfel încât să se realizeze funcționarea sistemului în MPP.

Afișarea datelor de interes se face prin intermediul unui display, aflat în componența interfeței operator.

Unitatea de procesare și interfața operator sunt părți componente ale unui controler care va fi prezentat în (§5.3).

Prin determinarea curentului și a tensiunii furnizate de panou, se poate trasa caracteristica externă a panoului PV și se pot calcula parametrii optimi de comandă a convertorului DC-DC, pentru a putea obține maximum de putere la bornele reostatului.

Panourile fotovoltaice sunt de tip Schott Polly și sunt prezentate în §5.2

Reostatul inteligent este prezentat în §5.4

Convertorul DC-DC este de tip BUCK

5.2. Panourile fotovoltaice PV

Panourile fotovoltaice sunt de tip policristalin și sunt produse de firma Schott Polly [Tri 2011], putând debita maxim 230 [W] în condițiile în care $P_s=1000$ [W/m²].

În tabelul 5.1 se prezintă specificațiile de catalog ale panoului Schott Polly 5 [Tri 2011], caracteristica externă a PV fiind prezentată în (Fig. 5.2)

Tabelul 5.1 – Specificații de catalog ale panoului de tip Schott Poly5

Pentru $P_s=1000[W]$	
Putere nominală	240 [W]
Tensiune nominală	30.4[V]
Curent nominal	7,9 [A]
Tensiune circuit deschis (gol)	37,3 [V]
Curent de scurtcircuit	8.52 [A]
Pentru $P_s=800[W]$	
Putere nominală	172 [W]
Tensiune nominală	27.4[V]
Curent nominal	6,2 [A]
Tensiune circuit deschis (gol)	34,1 [V]
Curent de scurtcircuit	6,83 [A]

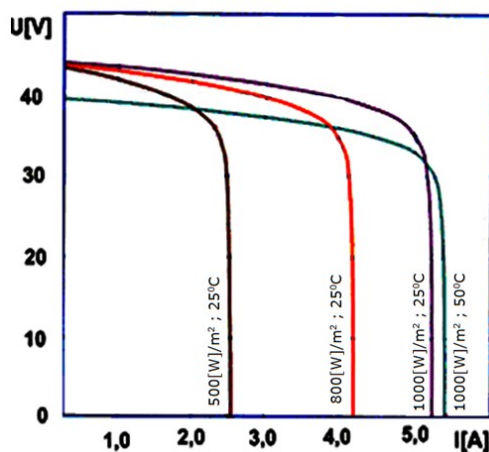


Fig 5.2 – Caracteristicile externe ale panoului PV Schott Polly

Panoul fotovoltaic auxiliar PVA trebuie să fie identic cu panourile PV de putere, pentru a avea aceeași caracteristică externă, fiind utilizat doar pentru ridicarea caracteristicilor externe ale PV utilizat.

În (Fig. 5.3) este prezentat ansamblul de panouri folosite în cadrul standului, panourile fiind amplasate pe un cardru metalic. Se permite atât rotirea transversală cât și cea verticală a panourilor prin acționare electrică pentru a se putea obține întodeauna o poziționare perpendiculară pe razele soarelui(Fig. 5.4).



Fig. 5.3 - Ansamblu de panouri folosit în cadrul standului experimental



Fig. 5.4 - Structura metalică de susținere și rotație a ariei de panouri

5.3. Standul experimental

Standul experimental este alcătuit dintr-un controler conectat la convertorul DC-DC, care este la rândul lui conectat la aria de panouri fotovoltaice, la instrumentele de măsură și la consumatorul rezistiv (un reostat inteligent, capabil să imite comportarea unui consumator). Amplasarea echipamentelor standului este ilustrată în (Fig. 5.5).

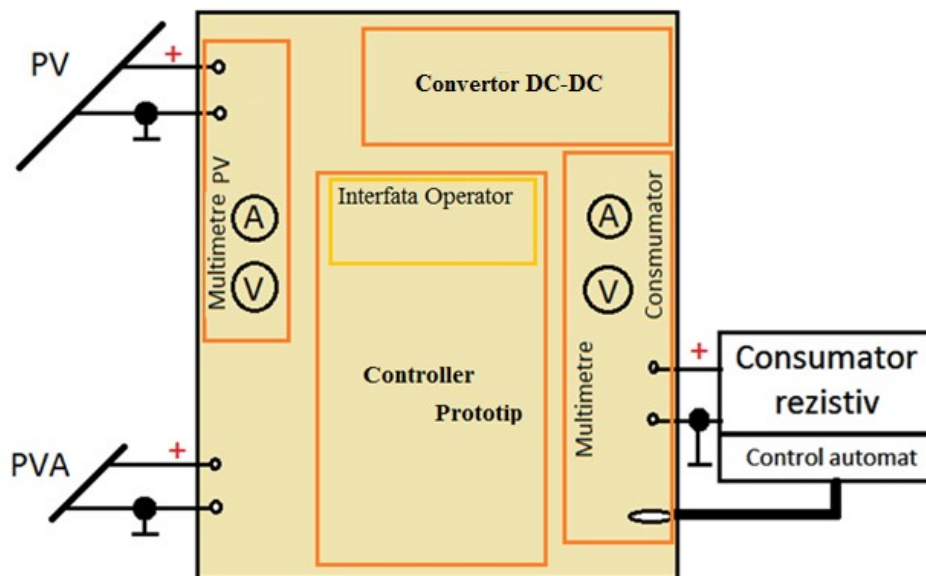


Fig. 5.5 – Elementele componente ale standului experimental

În (Fig. 5.6) se prezintă standul fizic realizat, cu aparatura de măsură și control utilizată.

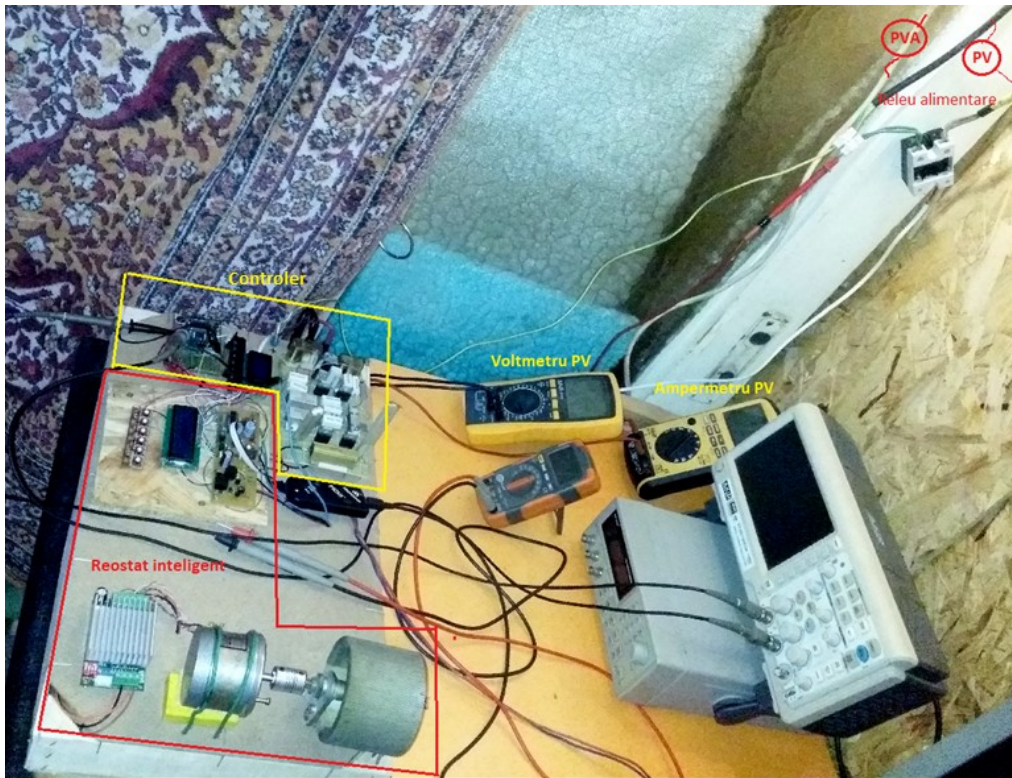


Fig. 5.6 - Amplasarea echipamentelor de măsură și control în cadrul standului experimental

Schema bloc de conexiuni a controlerului este prezentată în (Fig. 5.8)

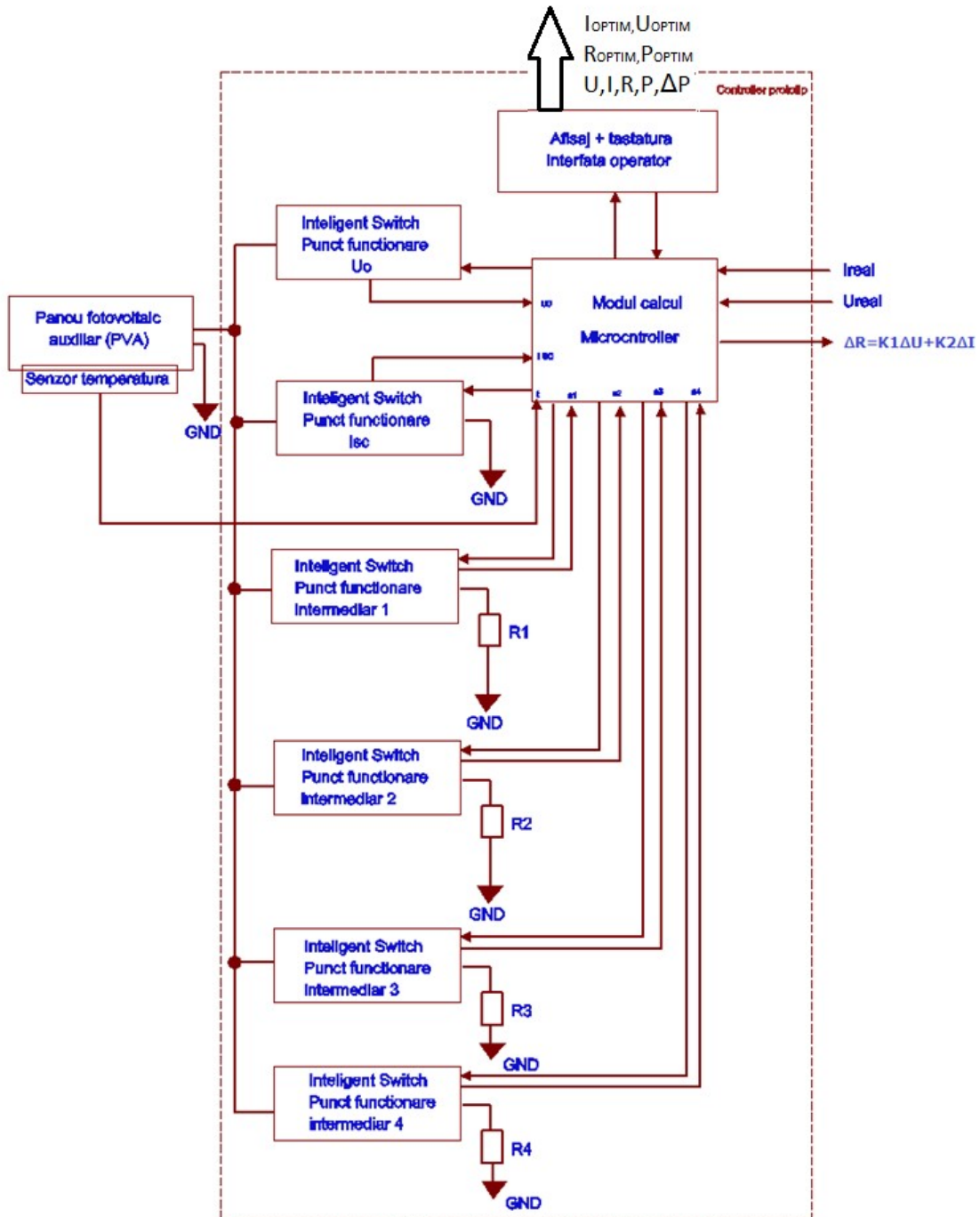


Fig. 5.8 - Schema bloc de conexiuni (simplificată) pentru controler

Microcontrolerul utilizat este produs de firma Microchip, model **PIC16F887** utilizând o arhitectură pe 8 biti, [PIC16F887].

Blocul Intelligent switch – este partea de forță a montajului și este realizat cu un circuit integrat BTS555, [BTS 555]. Acesta este produs de firma Infineon și se prezintă ca un tranzistor inteligent capabil să suporte curenți mari. Circuitul este dotat cu un pin de diagnostică (feedback) care furnizează un curent proporțional cu cel absorbit de circuitul comandat. Circuitul poate funcționa la tensiunea maximă de 34 [V] și permite trecerea prin acesta a unui curent de maxim 165 [A].

Controlerul prototip realizat fizic este prezentat în (Fig. 5.9) și (Fig. 5.10).

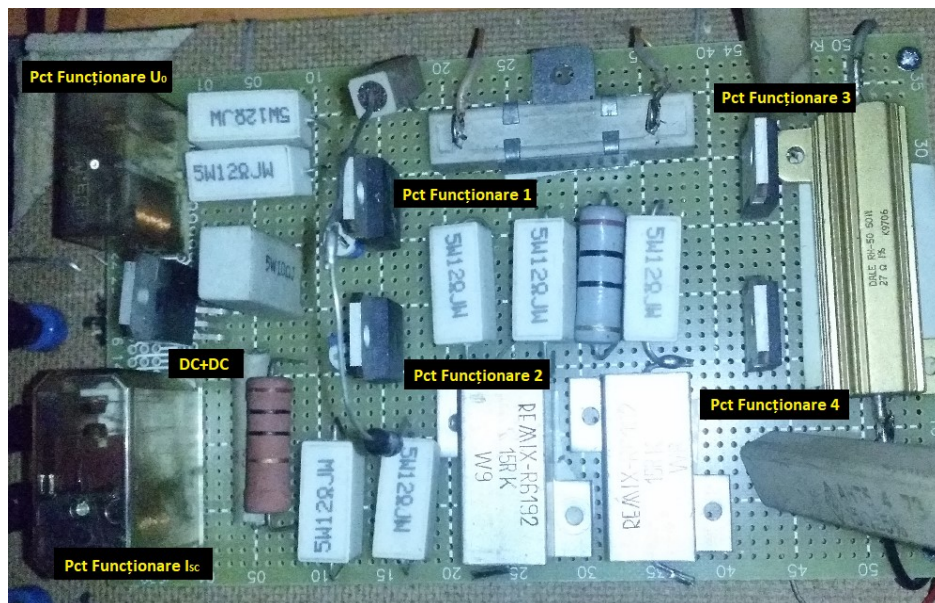


Fig. 5.9 – Partea de forță a controlerului



Fig. 5.10 – Partea de comandă a controlerului

Convertorul DC-DC are rolul de a adapta tensiunea de la ieșirea panoului PV în vederea funcționării în MPP.

5.4. Reostatul inteligent

Reostatul inteligent este un reostat de putere comandat printr-un motor pas cu pas (M), care își modifică rezistența după o caracteristică Rezistență – Timp dată, și este prevăzut cu o interfață operator prin care se poate seta exact valoarea rezistenței dorite și curba de modificare a acesteia.

Schema bloc a reostatului inteligent construit este prezentată în (Fig. 5.11) iar realizarea fizică a acestuia este reprezentată în (Fig. 5.12 – 5.14).

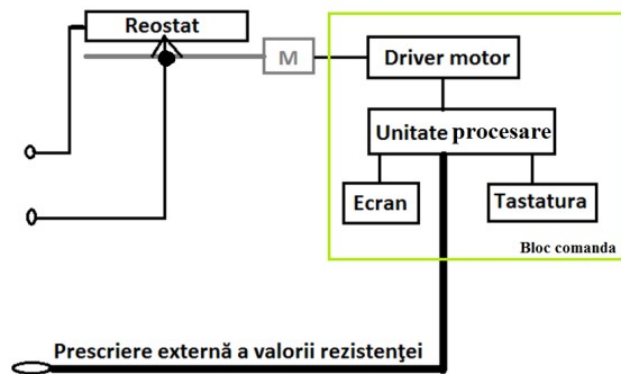


Fig. 5.11 – Schema bloc a reostatului inteligent, programabil.

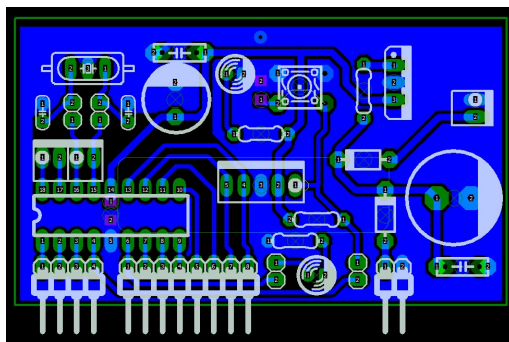


Fig. 5.12 – Layout-ul plăcii de comandă (controlerul) reostatului

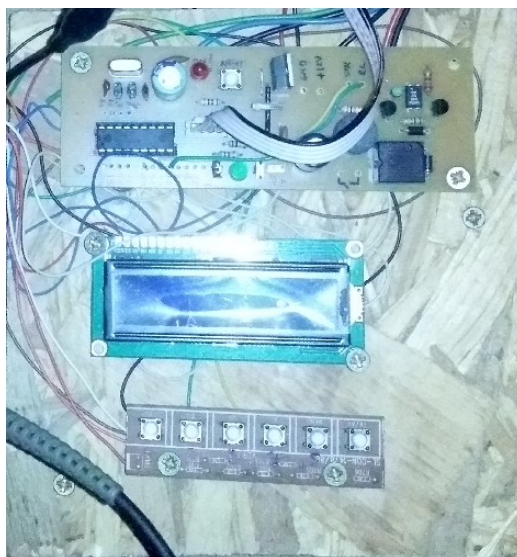


Fig. 5.13 – Partea de comandă a reostatului



Fig. 5.14 – Partea de forță a reostatului inteligent (rezistor, motor pas cu pas și driver motor).

Modificarea valorii reostatului inteligent se realizează cu ajutorul unui motor pas cu pas, care este conectat la rândul lui la blocul de comandă al reostatului.

Blocul de comandă conține un driver pentru motor, o unitate de procesare și o interfață utilizator, dotată cu o tastatură și un display pentru introducerea și monitorizarea parametrilor interni. Acest bloc are rolul de a putea preseta o anumită valoare a rezistenței și de a putea concepe scenarii de modificare a rezistenței de sarcină.

În acest fel reostatul inteligent poate să imite comportarea unei sarcini reale, să își modifice rezistența în pași fiksi sau să se poată prescrie o anumită valoare cu ușurință.

6. REZULTATE EXPERIMENTALE

Standul experimental a fost utilizat pentru a implementa ambele metode considerate: atât metoda clasică a micilor perturbații (MP) cât și metoda propusă în teză, bazată pe MM-PV și anularea derivatei puterii (ADP).

În cadrul capitolului sunt prezentate doar o parte a măsurătorilor efectuate, măsurători semnificative din punct de vedere al studiilor comparative privind metodele analizate.

Au fost realizate analize comparative pentru două scenarii distincte, considerate relevante.

- Analiza comparativă a rezultatelor considerând pași de observare diferiți
- Analiza comparativă a rezultatelor obținute utilizând valori fixe și distincte pentru rezistența de sarcină.
- Au fost determinate experimental caracteristicile externe ale PV

S-a efectuat identificarea experimentală a modelului matematic al PV la temperatura T constantă.

Determinarea mărimilor I_{OPTIM} și U_{OPTIM}

Pentru a putea determina mărimile I_{OPTIM} și U_{OPTIM} , (coordonatele MPP) este necesar să se folosească un montaj care furnizează microcontrolerului mărimile U, I , pentru fiecare dintre punctele de funcționare considerate.

Au fost considerate 6 puncte de funcționare de pe caracteristica externă $U=f(I)$, necesare determinării MPP, folosind MM-PVS1, stabilite după cum urmează:

- 1) La funcționarea în gol, $I=0$, se măsoară valoarea lui U_0 prin intermediul unei intrări analogice din microcontroler, folosită cu rol de măsurare a tensiunii (echivalent cu conectarea unui voltmetru la bornele PVA).
- 2) La funcționarea în scurtcircuit, $U=0$, se măsoară curentul de scurtcircuit I_{SC} prin intermediul blocului corezpunzător al controlerului.
- 3) Pentru a obține încă 4 puncte de funcționare se conectează la bornele PVA câte un rezistor de putere corespunzător fiecărui punct de funcționare, pentru a crea o sarcină intermediară valorilor ideale I_0 și I_{SC} . Se măsoară curentul și tensiunea la bornele sistemului PVA prin intermediul blocurilor controlerului (1,2,3,4) (Fig. 5.8).

Mărimile astfel determinate se înlocuiesc în MM-PV (Rel 3.36) rezultând constantele a, b, c, d, f, g .

S-au făcut măsurători pentru determinarea a două modele matematice, MM-PV la temperatura T (vezi §3.4.1) și MM-PVS1 la o temperatură dată (vezi §3.4.2).

6.1. Analiza comparativă a rezultatelor considerând pași de observare diferiți

În tab 6.1 sunt prezentate datele experimentale obținute cu cele 2 metode (MP și ADP), considerându-se un interval de timp $t=[100 \div 2400][s]$:

- Pe baza MM-PVS1 s-au obținut: U_{opt} , I_{opt} , P_{opt} , R_{opt}

Metoda optimală de reglare bazată pe anularea derivatei puterii presupune utilizarea unei scheme bloc de tipul celei prezentate în (Fig. 4.1).

Prin blocul de calcul (BC), pe baza modelului matematic al PV (MM-PV), s-au determinat prin metoda anulării derivatei puterii (ADP) coordonatele punctului de putere maximă (MPP), curentul optim I_{OPTIM} și tensiunea optimă U_{OPTIM} . Cunoscând coordonatele punctului de putere maximă (MPP), se poate capta maximum de putere la un nivel de insolație dată. Din punct de vedere energetic se realizează un surplus în varianta propusă de aproximativ 10% a energiei electrice obținute din conversia fotovoltaică

- Prin metoda micilor perturbații s-au obținut : P_{mp} , R_{mp} , I_{mp} , U_{mp}

Metoda micilor perturbații (MP) are la bază schema din (Fig. 4.1), din care se elimină PVA și BC, rezultând o schemă bloc reprezentată în (Fig. 6.1).

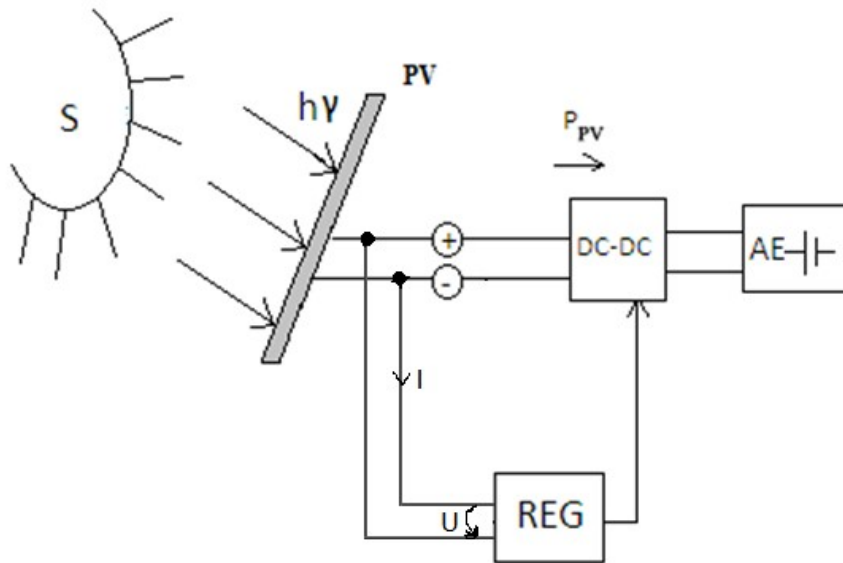


Fig.6.1 Sistem de reglare a PV pentru funcționarea în zona MPP

Prin comanda tiristoarelor convertorului DC-DC se obțin diverse puncte de funcționare în jurul punctului MPP și, prin urmare, puterea debitată va fi întodeauna sub puterea maximă, deoarece coordonatele acestui punct, cu această metodă nu sunt cunoscute.

Măsurătorile s-au efectuat considerând următoarele valori pentru pașii de observare: **A) 100 [s]**, **B) 50 [s]** respectiv **C) 5 [s]**.

A) Rezultatele măsurătorilor utilizând un pas de observare de 100[s]:

Rezultatele experimentale obținute prin cele două metode considerate MP(mărimi notate cu indicele „mp” și ADP (mărimile notate cu indicele „opt”), **pentru intervalul de timp $t=[100\div 2400]$ [s]**, sunt prezentate în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 Puterile, tensiunile și curenții mășurați pentru un pas de 100 secunde

Timp [s]	P _{opt} [W]	P _{mp} [W]	R _{opt} Ω	R _{mp} Ω	I _{opt} [A]	I _{mp} [A]	U _{opt} [V]	U _{mp} [V]
100	94,071	70,133	13,880	19,151	2,336	9,926	32,244	36,651
200	81,485	76,424	12,764	16,757	2,539	2,148	32,244	35,782
300	84,670	81,918	12,283	14,870	2,638	2,359	32,243	34,897
400	87,783	86,790	11,848	13,222	2,735	2,575	32,333	33,870
500	93,516	90,738	11,802	11,760	2,828	2,791	33,221	32,659
600	93,695	93,471	11,101	10,576	2,918	2,986	32,243	31,433
700	96,447	95,452	10,785	9,756	3,003	3,141	32,244	30,507
800	99,035	97,130	10,503	9,161	3,084	3,270	32,243	29,821
900	101,442	98,448	10,254	8,658	3,158	3,386	32,243	29,186
1000	103,642	99,613	10,036	8,263	3,227	3,386	32,243	28,680
1100	100,451	99,815	9,647	7,913	3,288	3,577	31,587	28,183
1200	107,382	101,422	9,687	7,673	3,343	3,650	32,244	28,886
1300	108,881	101,442	9,553	7,370	3,389	3,724	32,243	27,333
1400	110,132	103,182	9,446	7,364	3,428	3,757	32,244	27,554
1500	112,074	94,813	9,443	6,320	3,428	3,888	32,521	24,467
1600	111,812	107,922	9,303	11,343	3,480	3,098	32,243	34,980
1700	112,241	55,417	9,269	3,477	3,493	4,007	32,244	13,880
1800	112,382	46,577	9,257	34,980	3,498	1,166	32,242	40,363
1900	112,236	40,760	9,269	40,284	3,493	1,017	32,244	40,521
2000	111,802	37,643	9,304	43,774	3,480	0,939	32,243	40,593
2100	111,090	42,031	9,363	38,980	3,458	1,050	32,243	40,477
2200	110,113	43,514	9,447	37,556	3,427	1,088	32,244	40,426
2300	108,862	42,538	9,556	38,446	3,389	1,063	32,245	40,440
2400	107,355	43,119	9,690	37,860	3,342	1,079	32,244	40,405

Din rezultatele obținute privind puterile: P_{opt}- puterea optimă, obținută prin metoda anulării derivatei puterii (ADP) și respectiv P_{mp} – puterea obținută prin metoda micilor perturbații, se observă ceea ce era și evident, că în toate cazurile P_{opt} > P_{mp}

Se demonstrează astfel eficacitatea metodei propuse, ADP, în comparație cu metoda clasică, metoda MP. Cu metoda propusă se obține un surplus de energie captată de aproximativ 10%.

Graficele corespunzătoare valorilor sintetizate în tab 6.1 sunt prezentate în (Fig. 6.2 – Fig. 6.4) pentru intervalul t=[100-2000][s]:

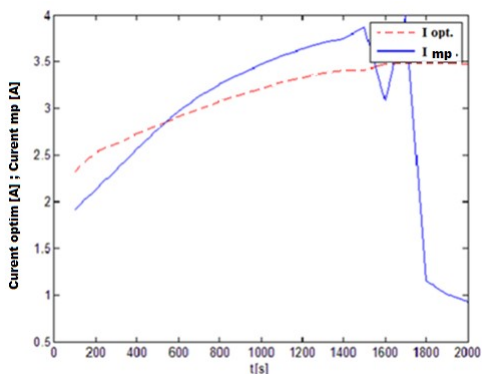


Fig.6.2 Variatiile în timp pentru curentul I_{opt} , I_{mp} pentru $t=[100-2000][s]$

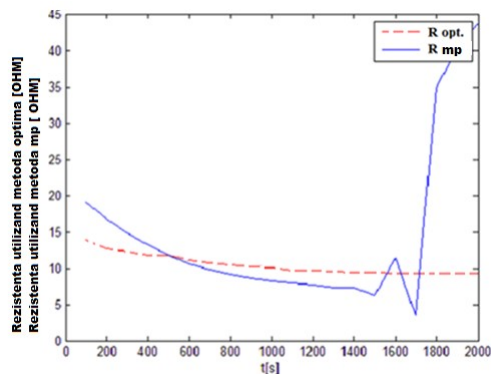


Fig.6.3 Variatiile în timp pentru rezistența R_{opt} , R_{mp} pentru $t=[100-2000][s]$

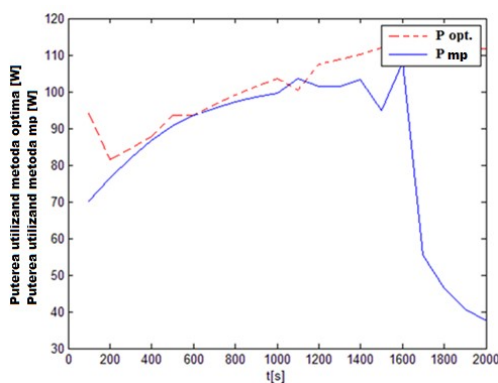


Fig.6.4 Variatiile în timp pentru puterea P_{opt} , P_{mp} pentru $t=[100-2000][s]$

Se observă diferențe relativ mari între valorile I_{opt} , I_{mp} , R_{opt} și R_{mp} și P_{opt} , P_{mp} , în special în intervalul de timp $t= [2000\div 2400] [s]$ (Fig. 6.5 – Fig. 6.8)

În continuare sunt prezentate graficele cu rezultatele obținute pe intervalul de timp $T=2000\div 2400 [s]$ (Fig. 6.5 – Fig. 6.9)

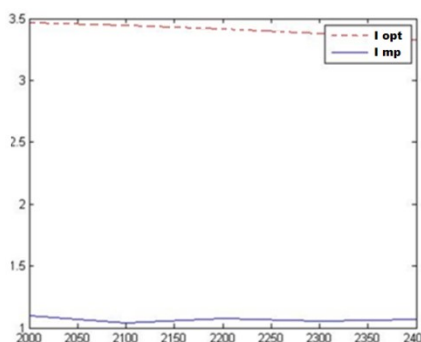


Fig.6.5. Variatiile în timp pentru curentul I_{opt} și I_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$

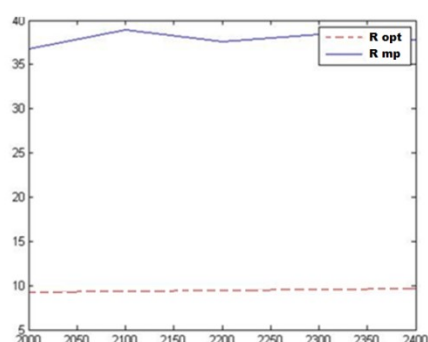


Fig.6.6. Variatiile în timp pentru rezistența R_{opt} și R_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$

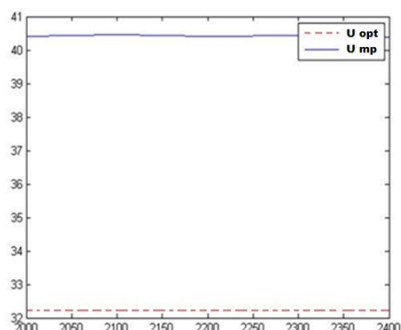


Fig.6.7. Variatiile în timp pentru tensiunea U_{opt} și U_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$

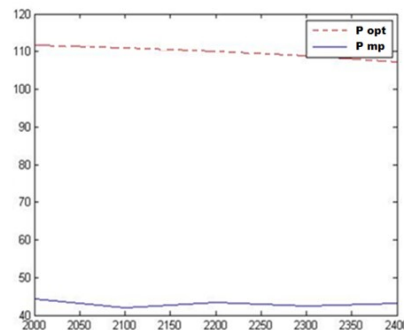


Fig.6.8. Variatiile în timp pentru puterea P_{opt} și P_{mp} pentru $t=[2000-2400][s]$

În (Fig. 6.9) se prezintă deplasarea punctului de funcționare în intervalul de timp 2000÷2400 [s] și anume din punctul inițial P(2000) în P(2100), P(2200), P(2300), P(2400), toate îndepărtate față de zona de MPP, acest lucru demonstrând că metoda micilor perturbații nu asigură o funcționare în MPP

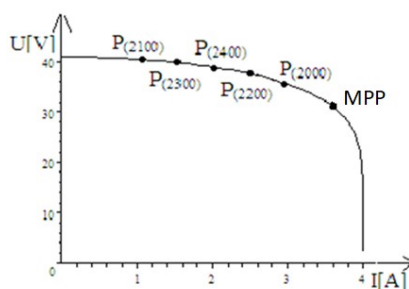


Fig.6.9. Deplasarea punctului de funcționare

B) Rezultatele măsurătorilor utilizând un pas de observare de 50[s]:

Rezultatele experimentale obținute prin cele două metode considerate, MP respectiv ADP, pentru intervalul de timp $t=[1900÷2500][s]$, sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2. Puterile, tensiunile și curenții masurați din 50 în 50 secunde

Timp[s]	$P_{opt}[W]$	$P_{mp}[W]$	$R_{opt}[\Omega]$	$R_{mp}[\Omega]$	$I_{opt}[A]$	$I_{mp}[A]$	$U_{opt}[V]$	$U_{mp}[V]$
1900	112,232	109,222	9,269	11,012	3,493	3,163	32,244	34,672
1950	112,052	110,442	9,284	10,512	3,488	3,255	32,244	34,064
2000	111,802	111,232	9,304	10,012	3,480	3,346	32,243	33,362
2050	111,482	111,442	9,331	9,512	3,470	3,436	32,244	32,548
2100	111,092	110,932	9,363	9,012	3,458	3,522	32,243	32,608
2150	111,092	110,622	9,363	9,512	3,444	3,424	32,244	32,429
2200	110,112	110,092	9,447	9,312	3,427	3,452	32,244	32,008
2250	109,522	109,512	9,499	9,412	3,409	3,425	32,244	32,095
2300	108,862	108,862	9,556	9,512	3,389	3,396	32,244	32,169
2350	108,142	108,082	9,620	9,412	3,366	3,402	32,244	31,885
2400	107,352	107,312	9,690	9,512	3,342	3,372	32,244	31,940
2450	106,502	106,352	9,767	9,412	3,315	3,375	32,244	31,629

2500	105,592	105,462	9,851	9,512	3,287	3,343	32,243	31,663
------	---------	---------	-------	-------	-------	-------	--------	--------

Graficele corespunzătoare sunt prezentate în (Fig. 6.10 – Fig. 6.13):

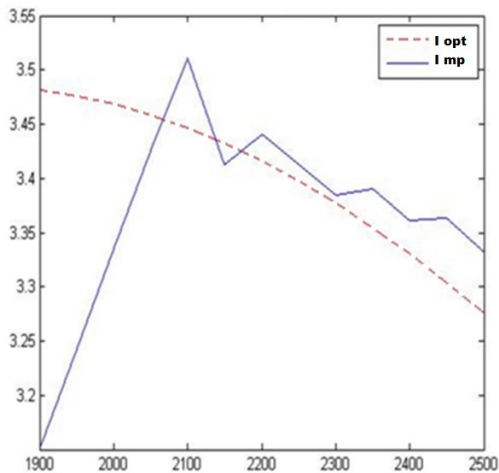


Fig.6.10. Variațiile în timp pentru curentul I_{opt} și I_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$

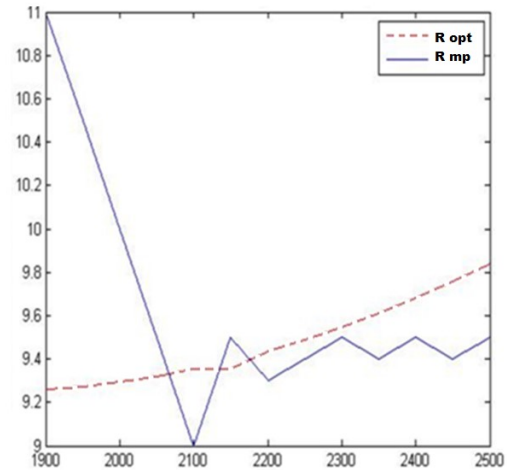


Fig.6.11. Variațiile în timp pentru rezistența R_{opt} și R_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$

Din variația curentilor și a rezistenței de sarcină se observă că diferența între cele 2 metode este mai redusă pentru acest pas mai mic de observare.

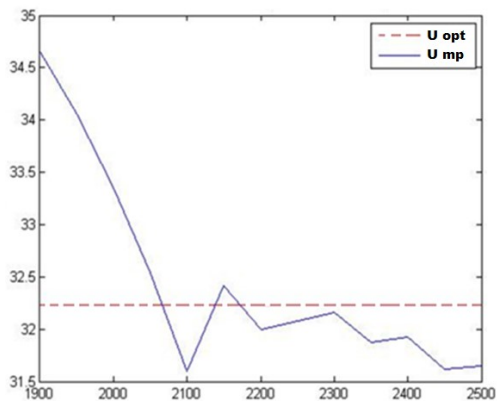


Fig.6.12. Variațiile în timp pentru tensiunea U_{opt} și U_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$

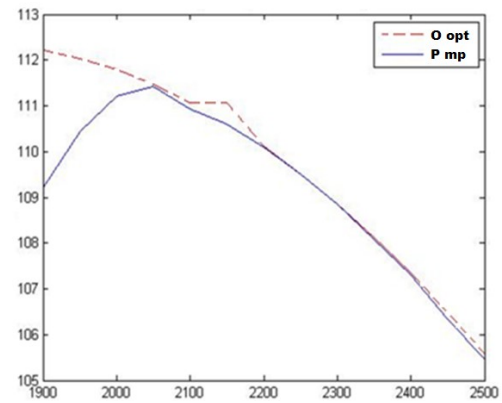


Fig.6.13. Variațiile în timp pentru puterea P_{opt} și P_{mp} pentru $t=[1900-2500][s]$

Aceeași observație este valabilă și pentru tensiune și putere

C) Rezultatele măsurătorilor utilizând un pas de observare de 5[s]:

Rezultatele experimentale obținute prin cele două metode considerate, MP respectiv ADP, **pentru intervalul de timp $t=[2510÷2580][s]$** , sunt prezentate în tabelul 6.3.

Tabelul 6.3 Mărimile optime la PV măsurate din 5 în 5 secunde

T [s]	P_{opt} [W]	P_{mp} [W]	R_{opt} [Ω]	R_{mp} [Ω]	I_{opt} [A]	I_{mp} [A]	U_{opt} [V]	U_{mp} [V]
2510	105,412	105,402	9,869	9,910	3,282	3,158	32,244	34,468
2515	105,312	105,282	9,878	9,713	3,279	3,176	32,244	34,471
2520	105,222	105,212	9,887	9,912	3,276	3,173	32,244	33,465
2525	105,112	105,182	9,842	9,714	3,282	3,184	32,155	32,325
2530	105,022	105,062	9,905	9,511	3,270	3,173	32,244	32,452
2535	104,922	105,162	9,914	10,112	3,267	3,179	32,243	32,465
2540	104,832	105,402	9,924	9,516	3,264	3,162	32,244	32,446
2545	104,732	105,403	9,933	9,912	3,261	3,172	32,243	32,439
2550	104,632	105,402	9,942	9,913	3,258	3,163	32,244	32,442
2555	105,412	105,401	9,869	9,912	3,282	3,178	32,244	31,448
2560	105,412	105,402	9,869	9,911	3,282	3,176	32,244	31,456
2565	105,412	105,401	9,869	9,912	3,282	3,175	32,244	31,453
2570	105,412	105,402	9,869	9,914	3,282	3,173	32,244	31,448
2575	105,412	105,402	9,869	9,912	3,282	3,172	32,244	31,443
2580	105,412	105,405	9,869	9,913	3,282	3,175	32,244	31,451

Se observă din variațiile curenților și a rezistenței de sarcină, că și la acest pas de observare mai redus apar diferențe sensibile între cele două metode.

Rezistențele măsurate experimental R_{mp} , nu sunt egale cu cele optime

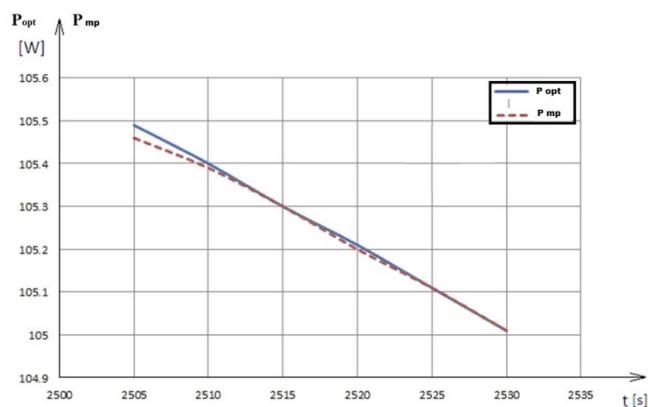


Fig.6.14. Evoluțiile puterii P_{opt} , P_{mp} în timp

În (Fig. 6.14) sunt reprezentate evoluțiile lui P_{opt} , P_{mp} . Se observă că la acest pas de observare redus diferența dintre cele două metode este mai mică în ceea ce privește puterea.

Concluzii:

Se observă că prin micșorarea pasului de observare de la 100[s] la 50[s], respectiv 5[s], rezultatele măsurătorilor arată că punctele de funcționare se apropie de punctele de optim. La un pas de observare de 5[s] puterea măsurată în punctele de funcționare se apropie foarte mult de puterea optimă, așa cum se observă din (Fig. 6.14).

Prin urmare în aplicațiile curente se recomandă utilizarea de pași de observare mici, de ordinul secundelor.

6.2. Analiza comparativă a rezultatelor utilizând valori constante și distincte pentru rezistența de sarcină

Se utilizează o schemă care presupune doar PV debitând direct pe o rezistență de sarcină (vezi (Fig. 4.3)).

Au fost alese patru valori fixe, distincte ale rezistenței de sarcină, în jurul punctului MPP și anume:

$R_1 = 9,1[\Omega]$; $R_2 = 9,3[\Omega]$; $R_3 = 9,7[\Omega]$ și $R_4 = 9,9[\Omega]$

Prin alegerea acestor valori se urmărește determinarea poziției punctului de funcționare în comparație cu MPP, demonstrându-se astfel că la o alegere potrivită a valorii lui R se pot obține aproximativ aceleași performanțe, nemaifiind necesară electronica de putere(DC-DC).

Se compară puterile obținute, considerând R fix, respectiv R_{opt} , calculat cu metoda propusă ADP.

A) Rezistența de sarcină are valoarea $R_1 = 9,1[\Omega]$

Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în tabelul 6.4.

Tabelul 6.4. Puterile, tensiunile și curenții la $R_1 = 9,1[\Omega]$

Timp [s]	P_{opt} [W]	P [W]	R_{opt} [Ω]	R_1 [Ω]	I_{opt} [A]	I [A]	U_{opt} [V]	U [V]
2505	105,502	104,832	9,859	9,1	3,284	3,405	32,243	30,896
2510	105,412	104,722	9,869	9,1	3,281	3,404	32,244	30,881
2515	105,312	104,612	9,878	9,1	3,278	3,402	32,244	30,864
2520	105,222	104,502	9,887	9,1	3,276	3,400	32,244	30,875
2525	105,122	104,382	9,896	9,1	3,273	3,398	32,244	30,831
2530	105,022	104,272	9,905	9,1	3,270	3,396	32,244	30,814
2535	104,922	104,162	9,914	9,1	3,267	3,395	32,243	30,798
2540	104,832	104,042	9,923	9,1	3,263	3,393	32,244	30,780

Graficele corespunzătoare sunt prezentate în (Fig. 6.15 – Fig. 6.18).

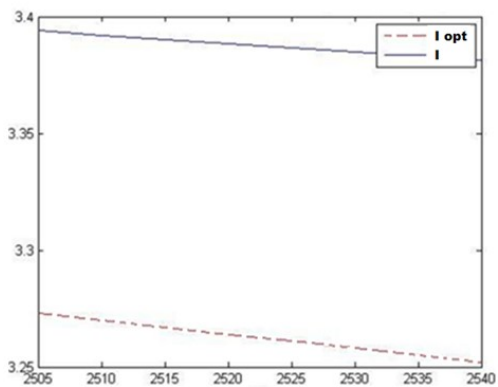


Fig.6.15. Variațiile în timp ale curentului I_{opt} și I la $R_1=9.1[\Omega]$

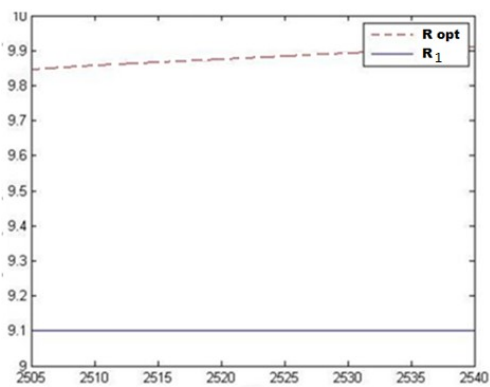


Fig.6.16. Variațiile în timp ale rezistenței R_{opt} și R_1 la $R_1=9.1[\Omega]$

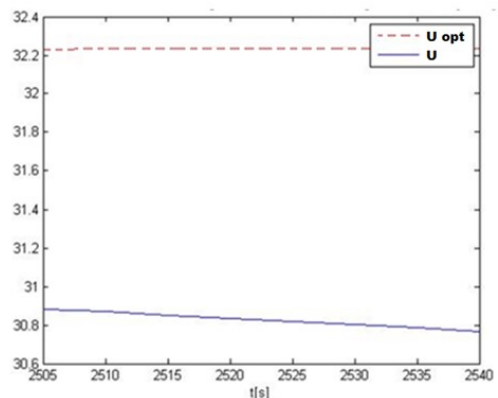


Fig.6.17. Variațiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_1=9.1[\Omega]$

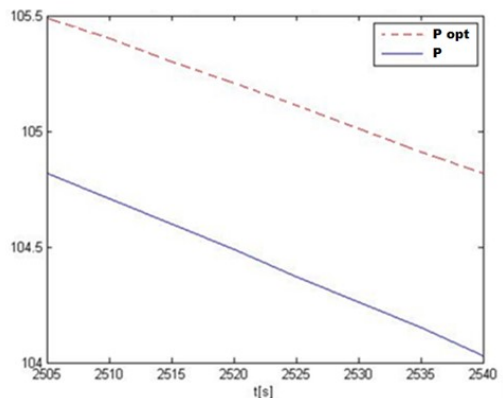


Fig.6.18. Variațiile în timp ale puterii P_{opt} și P la $R_1=9.1[\Omega]$

Pentru toate mărimile : curent, tensiune, rezistență și putere se observă diferențe sensibile

B) Rezistența de sarcină are valoarea $R_2=9.3[\Omega]$

În tabelul 6.5 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $t=[2505\div 2540]$. [s], la $R_2=9.3[\Omega]$.

Tabelul 6.5. Puterile, tensiunile și curenții la $R_2=9.3[\Omega]$

Tim [s]	P_{opt} [W]	P [W]	R_{opt} [Ω]	R_2 [Ω]	I_{opt} [A]	I [A]	U_{opt} [V]	U [V]
2505	105,502	105,152	9,859	9,3	3,284	3,374	32,243	31,282
2510	105,412	105,042	9,869	9,3	3,281	3,372	32,244	31,266
2515	105,312	104,942	9,878	9,3	3,278	3,370	32,244	3,251
2520	105,222	104,832	9,887	9,3	3,276	3,369	32,244	31,235
2525	105,122	104,722	9,896	9,3	3,273	3,367	32,244	31,218
2530	105,022	104,612	9,905	9,3	3,270	3,365	32,244	31,201
2535	104,922	104,512	9,914	9,3	3,267	3,365	32,243	31,186
2540	104,832	104,392	9,923	9,3	3,263	3,362	32,244	31,169

Graficele corespunzătoare sunt prezentate în (Fig. 6.19 – Fig. 6.22):

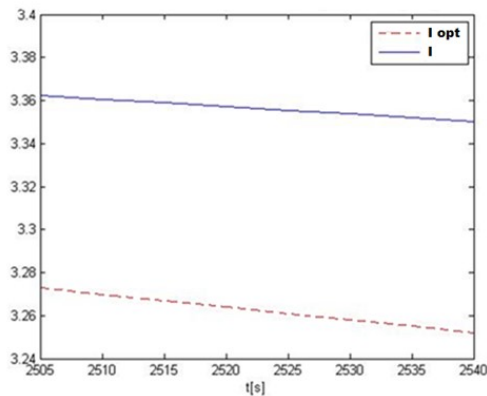


Fig.6.19. Variatiile în timp ale curentului I_{opt} și I la $R_2=9.3[\Omega]$

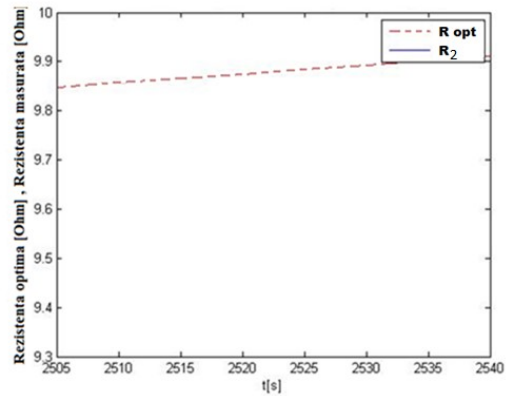


Fig.6.20. Variatiile în timp ale rezistenței R_{opt} și R_2 la $R_2=9.3[\Omega]$

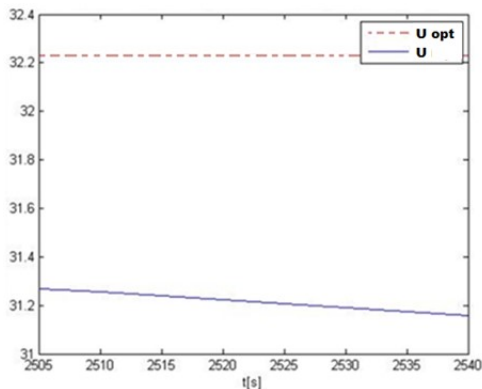


Fig.6.21. Variatiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_2=9.3[\Omega]$

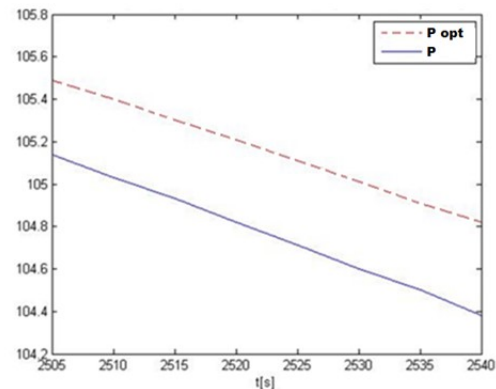


Fig.6.22. Variatiile in timp ale puterii P_{opt} și P la $R_2=9.3[\Omega]$

Se observă o micșorare a diferenței de putere.

C) Rezistența de sarcină are valoarea fixă de $R_3=9,7[\Omega]$

În tabelul 6.6 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $t=[2505\div 2540]$ [s] la $R_3=9,7[\Omega]$.

Tabelul 6.6. Puterile, tensiunile și curenții la $R_3=9,7[\Omega]$

Timp [s]	P_{opt} [W]	P [W]	R_{opt} [Ω]	R_3 [Ω]	I_{opt} [A]	I [A]	U_{opt} [V]	U [V]
2505	9,859	105,472	9,859	9,7	3,284	3,309	32,243	31,996
2510	105,412	105,382	9,869	9,7	3,281	3,307	32,244	31,981
2515	105,312	105,282	9,878	9,7	3,278	3,306	32,243	31,967
2520	105,222	105,182	9,887	9,7	3,276	3,304	32,244	31,951
2525	105,122	105,082	9,896	9,7	3,273	3,303	32,245	31,937
2530	105,022	104,982	9,905	9,7	3,270	3,301	32,244	31,922
2535	104,922	104,882	9,914	9,7	3,267	3,300	32,243	31,906
2540	104,910	104,87	9,918	9,7	3,251	3,298	32,232	31,879

Graficele corespunzătoare sunt prezentate în (Fig. 6.23 – Fig. 6.26):

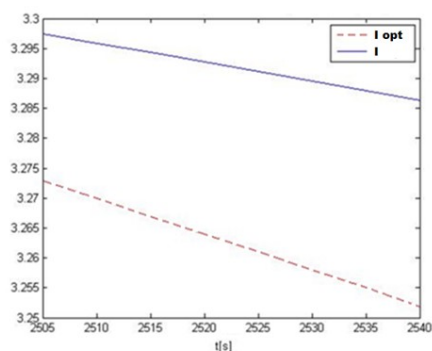


Fig.6.23. Variatiile în timp pentru curentul I_{opt} și I la $R_3=9,7[\Omega]$

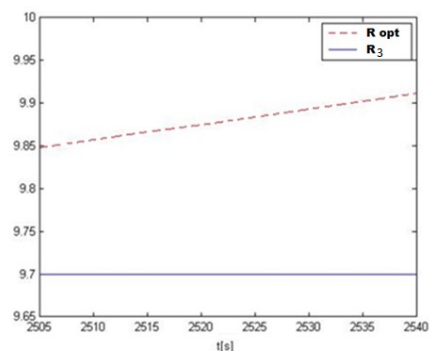


Fig.6.24. Variatiile în timp pentru rezistența R_{opt} și R_3 la $R_3=9,7[\Omega]$

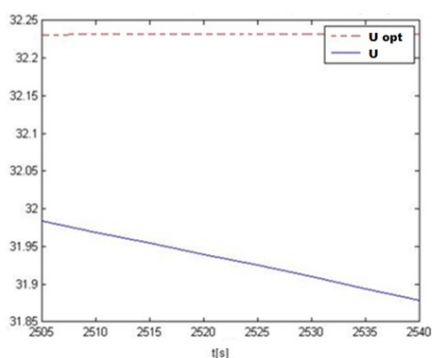


Fig.6.25. Variatiile în timp ale tensiunii U_{opt} și U la $R_3=9,7[\Omega]$

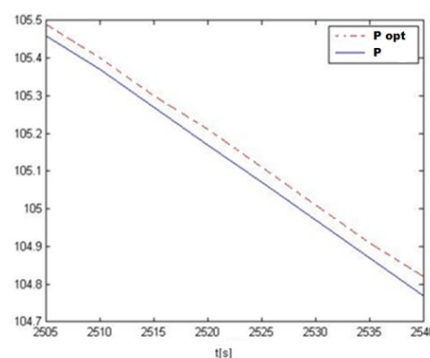


Fig.6.26. Variatiile în timp ale puterii P_{opt} și P la $R_3=9,7[\Omega]$

Se observă o apropiere semnificativă a valorilor puterilor (Fig. 6.26).

D) Rezistența de sarcină are valoarea fixă de $R_4=9,9[\Omega]$

În tabelul 6.7 sunt prezentate rezultatele obținute într-un interval de timp $t=[2510\div 2540]$ [s] la $R_4=9,9[\Omega]$.

Tabelul 6.7. Puterile, tensiunile și curenții la $R_4=9,9[\Omega]$

Timp [s]	P_{opt} [W]	P [W]	R_{opt} [Ω]	R_4 [Ω]	I_{opt} [A]	I [A]	U_{opt} [V]	U [V]
2510	105,412	105,402	9,869	9,9	3,281	3,274	32,244	32,313
2515	105,312	105,312	9,878	9,9	3,278	3,273	32,244	32,299
2520	105,222	105,212	9,887	9,9	3,276	3,271	32,244	32,285
2525	105,122	105,122	9,896	9,9	3,273	3,270	32,244	32,269
2530	105,022	105,022	9,905	9,9	3,270	3,268	32,244	32,254
2535	104,922	104,922	9,914	9,9	3,267	3,267	32,243	32,240
2540	104,832	104,822	9,923	9,9	3,263	3,265	32,244	32,225

Graficele aferente sunt prezentate în (Fig. 6.27 – Fig. 6.30):

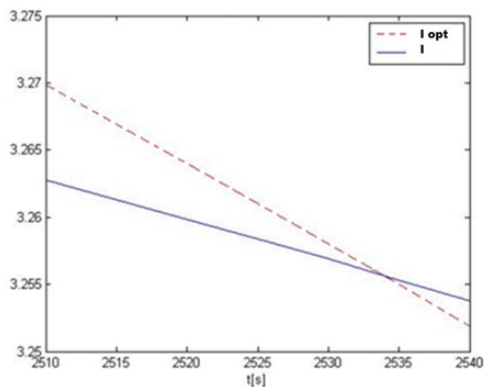


Fig.6.27. Variațiile în timp pentru curenții I_{opt} și I la $R_4=9,9[\Omega]$

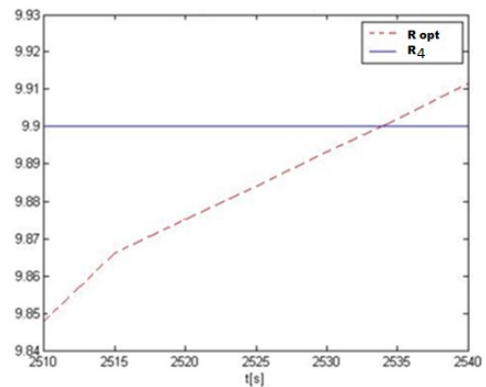


Fig.6.28. Variațiile în timp pentru rezistența R_{opt} și R_4 la $R_4=9,9[\Omega]$

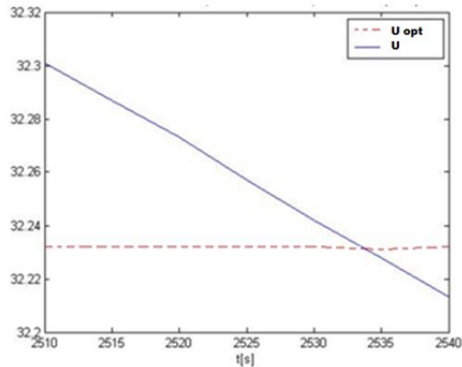


Fig.6.29. Variatiile în timp pentru tensiunea U_{opt} și U la $R_4=9.9[\Omega]$

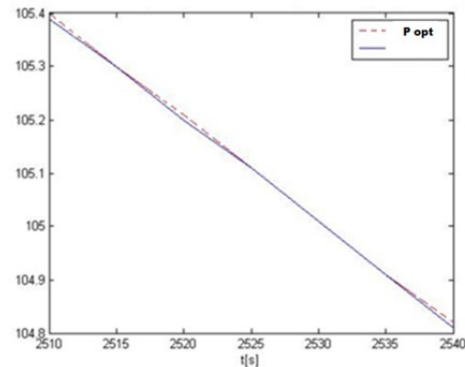


Fig.6.30. Variatiile în timp pentru puterea P_{opt} și P la $R_4=9.9[\Omega]$

Se observă că pentru $R_4=9.9[\Omega]$ valorile obținute pentru putere sunt practic aceleași.

Concluzie:

Din cele analizate se poate observa *importanța alegerii valorii rezistenței de sarcină în realizarea unei puteri maxime.*

Chiar în situațiile în care rezistența de sarcină poate fi prescrisă la anumite valori, se poate renunța la electronica de putere.

6.3. Identificarea modelului matematic MM-PV

6.3.1 Determinarea caracteristicilor externe ale PV

Identificarea MM-PV implică într-o primă etapă determinarea caracteristicilor externe ale PV prin stabilirea coordonatelor unor puncte de funcționare specifice.

Astfel caracteristica externă experimentală, se determină conform celor considerate în §3.3 pe baza măsurătorilor pe stand, folosind un anumit număr de puncte de funcționare.

Determinarea caracteristicii $U(I)$, se poate face utilizând o schemă de montaj de tipul celei prezentate în (Fig. 6.31),

Determinare experimentală a caracteristicilor externe:

1. *Functionarea în gol: (Punctul A, (Fig. 6.32))*

Se măsoară tensiunea $U_0 = U_A$ (6.3.1)

(prin deschiderea întrerupătoarelor K_1 și K_2 , din (Fig. 6.31), la curentul $I=0$.)

La $P_s = 975[W], I_A = 0 [A]$, (6.3.2)

se obține $U_0 = 43[V]$, (6.3.3)

2. Regimul de scurtcircuit: (Punctul E, (Fig. 6.32))

Se măsoară curentul:

$$I_{SC}=I_E \quad \text{la} \quad U=0 \quad (6.3.4)$$

Pentru $U_0 = 0[V]$ și $P_s = 975[W]$ (6.3.5)

Se obține $I_E = 5.2[A]$, (6.3.6)

Se cunosc astfel cele două puncte de funcționare extremă: gol (punctul A) și scurtcircuit (punctul E) (Fig. 6.32).

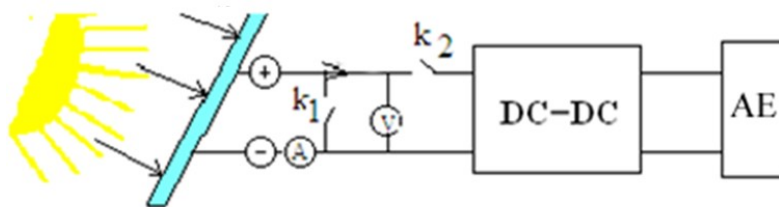


Fig.6.31 Schema de montaj

3. Regimul de funcționare în sarcină:

- Pentru

$$U = 42[V] \text{ se obține } I_B = 1.3 [A] \quad (\text{Punctul B}) \quad (6.3.7)$$

- Pentru $U = 41[V]$ se obține $I_C = 3.4 [A]$ (Punctul C) (6.3.8)

- Pentru $U = 34[V]$ se obține $I_D = 5.0 [A]$ (Punctul D) (6.3.9)

Se obțin astfel 5 puncte de funcționare semnificative, (Fig. 6.32).

Pe baza lor se poate trasa caracteristica externă care este reprezentată în (Fig. 6.33).

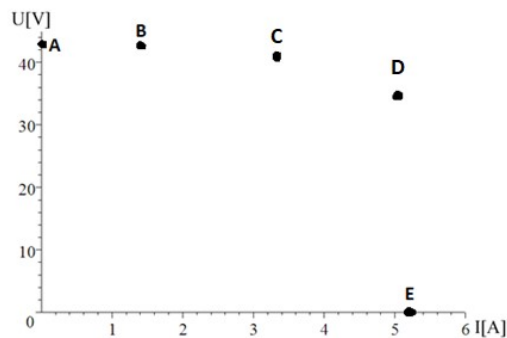


Fig.6.32 Punctele de funcționare obținute experimental

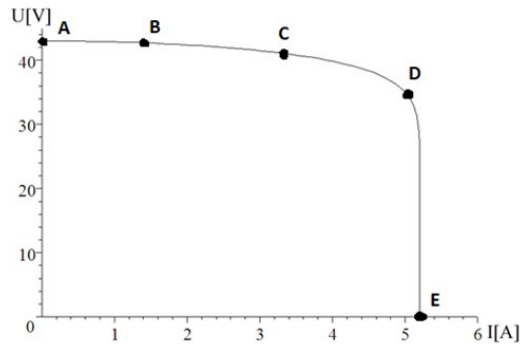


Fig.6.33 Caracteristica externă modelată experimental

6.3.2 Identificarea modelului matematic MM-PV, la temperatura T constantă

Modelul matematic MM-PV propus, o expresie de forma (vezi rel 3.6):

$$U(I) = (d - T \cdot f) \cdot \left(\cos\left(\frac{a \cdot I - g \cdot T}{P_s^b}\right) \right)^c \quad (6.3.10)$$

unde:

a,b,c,d,f,g sunt parametri modelului, iar acestia se determină din caracteristicile externe experimentale (Fig. 6.33). (De remarcat că notația **e** lipsește din această enumerație deoarece softul de calcul matematic utilizat consideră **e** definit ca și constanta lui Euler-Mascheroni) **T** este temperatura panoului fotovoltaic, **P_s** este puterea radiantă solară, **U** este tensiunea la borne, **I** este curentul debitat

Temperatura T măsurată este de 25 °C, sau în grade Kelvin:

$$T = [273.15 + 25][K]. \quad (6.3.11)$$

Din caracteristica externă experimentală se determină parametri modelului, adică a,b,c,d,f și g considerând următoarele regimuri de funcționare:

Funcționarea în gol:

Pentru a determina influența temperaturii asupra caracteristicilor externe, este nevoie de două seturi de măsurători, la două temperaturi diferite, pentru a se putea identifica parametrii d și f.

S-au făcut măsurători la două temperaturi și anume 25°C respectiv 30°C.

Se utilizează valorile mărimilor obținute în §6.3.1, punctul 1, corespunzătoare regimului de funcționare în gol:

$$P_s = 975[W], I = 0 [A], U_0 = 43[V] \quad (6.3.12)$$

1) Pentru temperatura **T=25°C** se obține ecuația:

$$44. = d - (273.15 + 25.)f \quad (6.3.13)$$

având în vedere că pentru acest regim tensiunea în gol este maximă și se obține la $\cos(X)=1$ (punctul **A**) (vezi rel 6.3.10).

2) Pentru temperatura **T=30°C**,

tensiunea în gol are valoarea: $U_0 = 39[V]$

rezultând a doua ecuație necesară identificării parametrilor d și f :

$$39. = d - (273.15 + 30.)f \quad (6.3.14)$$

S-au obținut astfel pentru cei doi parametri valorile :

$$d = 91 \quad (6.3.15)$$

respectiv

$$f = 0.17 \quad (6.3.16)$$

Regimul de scurtcircuit:

Sunt utilizate valorile obținute pentru acest regim din §6.3.1. punctul 2. Se ajunge astfel la:

$$\left(\frac{a5.3-g(273.15+25.)}{975.b} \right) = \frac{\pi}{2}; \quad (\text{punctul E}) \quad (6.3.17)$$

Regimul de funcționare în sarcină:

Utilizând valorile mărimilor obținute în cadrul §6.3.1 punctul 3, se ajunge la :

$$42 = 40.3 \left(\cos \left(\frac{a1.3-g(273.15+25.)}{975.b} \right) \right)^c; \quad (\text{punctul B}) \quad (6.3.18)$$

respectiv:

$$41 = 40.3 \left(\cos \left(\frac{a3.4-g(273.15+25.)}{975.b} \right) \right)^c; \quad (\text{punctul C}) \quad (6.3.19)$$

și:

$$34 = 40.3 \left(\cos \left(\frac{a5.0-g(273.15+25.)}{975.b} \right) \right)^c - (\text{punctul D}) \quad (6.3.20)$$

Soluționând sistemul de ecuații obținut se obțin pentru parametri următoarele valori:

$$a = 447; b = 1.1; g = 1.2 \times 10^{-4}; c = 7.4 \times 10^{-2}$$

$$d = 91 \quad f = 0.17 \quad (6.3.21)$$

Modelul matematic MM-PV devine astfel:

$$U(I) = (91 - T \cdot 0.17) \cdot \left(\cos \left(\frac{447 \cdot I - 1.2 \cdot 10^{-4} \cdot T}{P_s^{1.1}} \right) \right)^{7.4 \cdot 10^{-2}} \quad (6.3.22)$$

Pe baza lui s-a trasat caracteristica externă reprezentată în (Fig. 6.34)

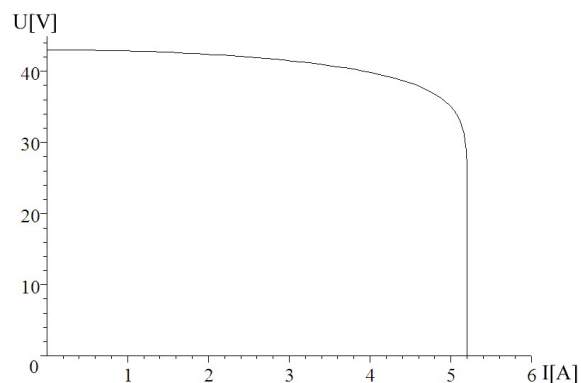


Fig 6.34. Caracteristica externă modelată a MM-PV identificat

6.4. Concluzii

Mărimile obținute cu metoda micilor perturbații, la pași de observare de 100[s], 50[s], respectiv 5[s] au demonstrat faptul că la pași de observare mici, punctele de funcționare se apropie de punctele de optim într-un timp scurt (neajungându-se însă în punctul de optim).

În varianta cu rezistență fixă se poate observa că o alegere corectă a acesteia face ca punctele de funcționare să nu difere prea mult de cele obținute cu metoda micilor perturbații. Alegerea corectă a valorilor rezistenței de sarcină se face doar pe baza cunoașterii cât mai exacte a caracteristicii externe a PV.

Prin analiza comparativă a funcționării PV s-a demonstrat diferența dintre funcționarea în zona MPP, prin metoda micilor perturbații și funcționarea în MPP folosind coordonatele MPP. Se asigură astfel o energie solară suplimentară captată între 3% și 5%.

7. Concluzii generale și contribuții personale

În cadrul acestui capitol sunt prezentate concluziile generale ale lucrării, contribuțiile originale aduse în cadrul tezei, precum și direcțiile posibile de continuare și aprofundare a cercetărilor în domeniul abordat.

7.1. Concluzii finale

În cadrul cercetărilor din teză se abordează domeniul de mare actualitate al energiei resurselor solare, cu particularizare la problematica modelării și conducerii sistemelor cu panouri fotovoltaice (SPV).

Structurarea lucrării presupune o dezvoltare progresivă legată de sistemele de conversie a energiei solare în energie electrică, care se completează continuu, fiecare etapă finalizându-se cu evidențierea unor particularități și concluzii utilizabile în dezvoltările ulterioare.

Pe baza analizei situației actuale a utilizării SPV se pot afirma următoarele :

- Evoluția piețelor energetice cu PV demonstrează faptul că energia solară devine un factor important în balanța electroenergetică globală.
- Sistemele de conducere actuale sunt numai parțial optime din punct de vedere energetic.
- Metoda micilor perturbații folosită în prezent la reglarea funcționării PV asigură o funcționare în zona MPP, nu chiar în MPP.
- Metoda anulării derivatei puterii asigură o funcționare chiar în MPP, asigurându-se astfel un randament de conversie maxim.

Conducerea sistemelor energetice solare (SES) astfel încât funcționarea să fie în zona optimă – energie maximă captată presupune folosirea unor modele matematice (MM) adecvate, modele care să permită în fiecare moment identificarea punctelor de putere maximă (MPP).

Cele două modele matematice simplificate propuse, MM-PVS1 și respectiv MM-PVS2 permit determinarea mai eficientă a mărimilor de optim, I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , P_{OPTIM} , pentru diferite valori ale nivelului de radiație solară (insolație) (P_s).

Utilizarea variației sinusoidale a nivelului de insolație este mai apropiată de realitatea meteo decât situația în care este considerată o variație bruscă a puterii radiante.

Pentru funcționarea în MPP, valoarea rezistenței de sarcină trebuie modificată în strânsă dependență cu valoarea puterii radiante solare.

Considerarea structurilor de bază ale SPV, debitând pe o rezistență de sarcină fixă, direct pe un acumulator electric (AE), sau folosind un convertor DC-DC poziționat între PV și AE a permis determinarea eficienței energetice comparativă a acestora. Pe baza rezultatelor obținute se poate concluziona că o alegere potrivită a AE în raport cu PV poate conduce la o captare maximă a energiei solare și fără utilizarea unui convertor DC-DC interpus între PV și AE.

Funcționarea în MPP se poate realiza numai printr-un reglaj corespunzător, care să modifice reglarea rezistenței de sarcină echivalente de la bornele PV, pe baza unor algoritmi care consideră curentul, puterea sau rezistența corespunzătoare MPP ca mărimi de referință.

La structurile de conducere bazate pe metoda micilor perturbații (MP), nefiind cunoscute coordonatele MPP (I_{OPTIM} , U_{OPTIM}) nu se poate realiza o funcționare în punctele de putere maximă.

În general, structurile de conducere care "caută" punctul de putere maximă,

prin măsurarea puterii debitate, nu sunt capabile să realizeze o captare maximă a energiei solare disponibile.

Prin metoda propusă în teză, metoda anulării derivatei puterii (ADP), care presupune cunoașterea punctului de putere maximă (MPP), se poate realiza o funcționare optimă în sensul captării unei energii maxime, deoarece la bornele PV se poate determina o rezistență de sarcină de valoare optimă. Pe baza cunoașterii mărimilor optimale I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , R_{OPTIM} se poate realiza o funcționare în MPP, randamentul de conversie fiind maxim.

7.2. Contribuții personale

Considerând obiectivele declarate ale acestei lucrări, sunt prezentate principalele contribuții aduse de autor prin cercetările efectuate în cadrul activității doctorale:

- Elaborarea unui studiu critic asupra problemelor de bază ale sistemelor de conversie a energiei solare în energie electrică în vederea conducerii acestora.
- Dezvoltarea și validarea unui model matematic al panoului fotovoltaic, MM-PV, bazat pe funcția "cos", care să permită conducerea optimală a sistemelor energetice solare, prin identificarea coordonatelor punctelor de putere maximă (MPP).
- Realizarea unei metode de determinare a caracteristicii externe bazată pe date experimentale.
- Dezvoltarea și validarea a două modele matematice simplificate, MM-PVS1 și MM-PVS2, în cazul temperaturii T constante.
- Determinarea mărimilor de optim, I_{OPTIM} , U_{OPTIM} , P_{OPTIM} , R_{OPTIM} , pentru un nivel de radiație solară (insolație) P_s constantă, respectiv variabilă sinusoidal în timp.
- Analiza funcționării sistemelor cu panouri fotovoltaice (SPV) în diverse configurații specifice: cu PV debitând pe o rezistență de sarcină de valoare fixă (PV + R), direct pe un acumulator electric (PV + AE) (sarcină neadaptată/adaptată la caracteristica externă a PV), sau folosind un convertor DC-DC, interpus între PV și AE (PV + (DC-DC) + AE).
- Analiza comparativă a funcționării sistemului (PV + (DC-DC) + AE) în zona MPP folosind metoda micilor perturbații (MP), respectiv metoda anulării derivatei puterii (ADP).
- Realizarea unei analize comparative a valorilor puterii debitate, la modificarea rezistenței de sarcină, utilizând metodele MP respectiv ADP.
- Analiza comportării SPV la modificarea rezistenței de sarcină în funcție de diferența de putere (ΔP) pentru diferite valori ale constantei K_p .
- Conceperea unui algoritm de conducere optimal pentru aducerea sistemului în zona energetică maximă.
- Determinarea și analiza variațiilor mărimilor semnificative ale sistemului de conducere a SPV prin adaptarea rezistenței de sarcină la valoarea puterii debitate, astfel încât să se apropie de MPP.
- Analiza unor sisteme de conducere bazate pe metoda ADP, cu mărimi de referință corespunzătoare MPP.
 - Sisteme de conducere cu I_{OPTIM} ca mărime de referință.
 - Sisteme de conducere cu I_{OPTIM} și U_{OPTIM} mărimi de referință.

- Realizarea unui stand experimental, utilizând echipamente / componente reale (panouri fotovoltaice, convertor DC-DC de putere precum și un controler și un reostat inteligent în concepție originală).
- Utilizarea standului experimental realizat în vederea identificării experimentale a modelelor matematice propuse, a analizei funcționării optime a PV și respectiv validării rezultatelor, prin implementarea metodelor considerate (metoda clasică MP și metoda propusă ADP):
 - Determinarea mărimilor I_{OPTIM} și U_{OPTIM} .
 - Analiza comparativă a rezultatelor considerând pași de observare diferiți.
 - Analiza comparativă a rezultatelor utilizând valori constante și distincte pentru rezistența de sarcină.
 - Identificarea modelului matematic MM-PV.
 - Determinarea experimentală a caracteristicilor externe.
 - Identificarea MM-PV la temperatura T constantă.

7.3. Perspective de dezvoltare

Analizele teoretice și practice realizate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele obținute, deschid o serie de perspective și direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniu.

Cercetările viitoare pot fi axate pe dezvoltarea de noi modele pentru alte tipuri constructive de panouri (cu concentratoare cu lentilă Fresnel, panouri hibride, etc.), de noi variante ale strategiilor de conducere optimală, de exemplu pentru a realiza consumul întregii energii furnizate de panou (ex. considerând starea de încărcare unui acumulator parțial descărcat se poate remarca un consum cu mult sub maximul furnizat de panou) prin redirectionarea și valorificarea surplusului de energie prin conectarea altor consumatori potrivit aleși. Deasemenea pot fi extinse performanțele controlerului prin implementarea unor funcții suplimentare, cum ar fi de exemplu cea de măsurare a pierderilor cauzate de gradul de murdărire a panourilor (prin comparare cu parametrii măsurați și salvați la instalarea\ curățarea ariei de panouri) sau procesarea de înfrumusețare în vederea obținerii de date statistice privind puterea captată.

BIBLIOGRAFIE

- [Abu 2017] Abdullah E., Mahmoud M. E., Mahdi E., "Adaptive MPPT for PV systems under partial shadow condition and different loads using advanced optimization techniques", 19'th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, INSPEC 17614701, 19-21 Dec. 2017, ©2017 IEEE
- [Aek 2017] Aekkawat B., Songkiate K., Kobsak S., Wilailak S., "A simplified model for the estimation of energy production of PV module", International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, INSPEC 17285860, 8-10 Mar. 2017, ©2017 IEEE
- [Ais 2017] Aishwarya K., Sangita P., Lalit B., "Implementation of a highly efficient MPPT technique for a PV system using sepic converter", International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), Indore, India, 17-19 August 2017, IEEE, Article ID: INSPEC-17560718
- [Ale 2010] Alexandru C., Pozna C., "Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, vol. 224, no. 6, 2010. pp. 797-811
- [Ale 2013] Alexandru C., Tatu I., "Optimal design of the solar tracker used for a photovoltaic string", Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 5, no. 2, 2013. Article ID: 023133
- [Ale 2013-1] Alexandru C., "Design and optimization of a mono-axial tracking system for photovoltaic modules", Journal of Solar Energy, vol. 2013, Article ID 586302
- [Ahm 2014] Ahmed M. Atallah, Almoataz Y. Abdelaziz, and Raihan S. Jumaah, "Implementation of perturb and observe MPPT of PV system with direct control method using BUCK and BUCKBOOST converters", Department of Electrical power & Machine, Faculty of Engineering, Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering: An international Journal (EEIEJ), Vol. 1, No. 1, Ain Shams University, Cairo, Egypt, 31 Feb 2014
- [Anu 2013] Anusha.K., Chandra.S., Mohan Re., "Design and development of real time clock based efficient solar tracking system", International journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2013, Article ID: 3:1219-1223.
- [Anu 2014] Anuraj, A., Gandhi R., "Solar tracking system using stepper motor", International Journal Electronic and Electrical Engineering, 2014, Article ID:561-566
- [Any 2013] Anyaka.B., Ahiabuike.D., Mbunwe. M., "Improvement of PV Systems Power Output Using Sun-Tracking Techniques", International Journal of Computational Engineering Research, 2013, Article ID: 3:80-98
- [Ara 2010] Araujo J., Hartmann L, "Lead-Acid Battery Modeling and State of Charge Monitoring", IEEE, ©2010, Article ID:978-1-4244-4783-1/10
- [Arb 2009] Arbab.H., Jazi. B., Rezagholizadeh.M., "A computer tracking system of solar dish with two axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow", Renewable Energ, 2009, Article ID:34: 1114-1118.

- [Awa 2017] Awang J., Rozana A., „Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation“, Solar Energy, Volume 148, 15 May 2017, Pages 128-139.
- [Aza 2008] Azab M., “A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems“, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008,Article ID: 571-574
- [Bat 2013] Batayneh. W., Owais. A., Nairoukh. M., “An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system.“, Automatic in Construction, 2013,Article ID: 29:100-106.
- [Ben 2013] Benecke. M., Dyk. E., Vorster.F, “Optical design of low concentrator photovoltaic modules“, Journal of energy in South Africa,2013, Article ID: 24:4-9.
- [Ben 2013-1] Benecke. M., Dyk. E., Vorster.F, “The design and analysis of a vertical receiver LCPV system“, journal of energy in south Africa, 2013,Article ID: 20:16-19.
- [Ben 2017] Bennet M., Mikofski M., “Accurate Modeling of Partially Shaded PV Arrays“,44th Photovoltaic Specialist Conference(PVSC),Washington DC, USA, IEEE, 25-30 Iunie 2017, Article ID: INSPEC-18189000
- [Ben 2017-1] Benaissa M., Hadjeri S., Zidi S., Djilani K., “A Comparative investigation of maximum power point tracking techniques for grid connected PV system under various weather conditions“, 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), Boumerdes, Algeria,IEEE, 29-31 Oct. 2017, Article ID: INSPEC-17429623
- [Bhu 2013] Bhupendra G., Neha S., Brahman S., “Design,Construction and Effectiveness Analysis of Hybrid Automatic Solar Tracking System for Amorphous and Crystalline Solar Cells“, American journal of engineering research, 2013, Article ID:2:221-228.
- [Bir 2017] Biraja P., Nayak A., “Design of MPPT controllers and PV cells using MATLAB Simulink and their analysis“, International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), Navi Mumbai, India,IEEE, 27-28 Jan. 2017, Article ID:INSPEC-16963599
- [BTS 555] Specificatii circuit integrat de putere https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Infineon%20PDFs/BT_S555.pdf
- [Cal 2013] Calabrò E., “An algorithm to determine the optimum tilt angle of a solar panel from global horizontal solar radiation“, Journal of Renewable Energy, 2013, Article ID 307547
- [Cat 2013] Cătălin A., "A Novel Open-Loop Tracking Strategy for Photovoltaic Systems", The Scientific World Journal,2013, Article ID 205396
- [Che 2007] Chenni R., “A detailed modeling method for photovoltaic cells“, Energy, V32,2007, pp. 1724-1730,
- [Chi 2013] Chinnaiyan V., Jerome J.,Karpagam J., “An experimental investigation on a multilevel inverter for solar energy applications“, Electrical Power and Energy Systems, vol. 47, 2013, pp. 157–167
- [Cho 2009] Chong K., Wong C., “General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector“, Solar Energy, vol. 83, no. 3,2009, pp. 298–305
- [Chr 2013] Chrishtopher W., Ramesh R., “Comparative Study of P&O and InC MPPT Alogriths“, American Journal of Engineering Research, 2013, Article ID: 2(12): 402-408.

- [Cos 2017] Darab Cosmin, Turcu A., "Internal model control for MPPT of a solar PV system", International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, IEEE, 6-9 Iunie 2017, Article ID: INSPEC-17028452
- [Cos 2017-1] Darab Cosmin, Abdourraziq S., Abdourraziq M., "Maximum power point tracking applied to PV systems under partial shading conditions", International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), Iasi, Romania, Article ID: INSPEC 17411153, 11-13 Oct. 2017, ©2017 IEEE
- [Dav 2010] Dave F., "Introduction to Photovoltaic Systems Maximum Power Point Tracking", Texas Instruments, 2010, Report number: 446.2010
- [Den 2006] DenHerder T., "Design and Simulation of Photovoltaic Super System Using Simulink", California Polytechnic State University, 2006,
- [Dha 2013] Dhanabal.R., Bharathi.V., Ranjitha.R., "Comparison of efficiencies of solar tracker systems with static panel single axis tracking system and dual axis tracking system with fixed mount", International Journal of Engineering and Technology (IJET), 2013, Article ID: 5:1925-1933
- [Dra 2010] Dragomir T., Petcuț F., Dragomir L., "Maximum Power Point Determination for a Photovoltaic Panel using a Simulink Model", 4th International Workshop on Soft Computing Applications, 15-17 July, Arad, Romania, 2010, p221-224.
- [Ebe 2017] Eber H., Tejada E., Falcon V., "Identification of PV system model for simulation of MPPT controllers", IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Cusco, Peru, Article ID: INSPEC 17286433, 15-18 August 2017, ©2017 IEEE
- [Elm 2014] Elham F., Shahram Javadi, Arsalan Hekmati, "Maximum power extracting in a solar plant with multilevel inverters and fuzzy method", International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK), 2014, NSPEC Accession Number: 14916729
- [Fat 2018] Fatih Hocaoglu, Melih Kurekci, Emre Akarslan, Fatih Serttas, "An Experimental Study on the Modeling of the PV Output", International Conference on Photovoltaic Science and Technologies (PVCon), Ankara, Turkey, Article ID: INSPEC 18248802, 4-6 Iulie 2018, ©2018 IEEE
- [Fer 2014] Ferdaus R., Mohammed M., Rahman S., "Energy efficient hybrid dual axis solar tracking system", Journal of Renewable Energy, 2014, Article ID: 14(1):1-12.
- [Fra 2008] Fracz R., Dmowski A., "Monitoring and Control of Distributed Power Generation Systems such as Photovoltaic System", International PhD Workshop, October 2008, pp. 313-316
- [Fre 2010] Freire N., Estima J., Cardoso M., "Converters Fault-Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications", IEEE, ©2010, Article ID: 978-1-4244-5226-2/10, pag. 397 -402
- [Gan 2010] Gana O., Babescu M., Borza I., Lacatusu F., "Maximum power for an electro-eolian system operating at variable wind speed values", Proceedings of the International scientific conference, 12-13 Nov 2010, Article ID: ISSN -1843-6617

- [Gan 2010-1] Gana O., Lacatusu F., Babescu M., Borza I., "Comportarea sistemului electroenergetic eolian la variatii viteze ale vitezei vantului", Conferinta Stiinta moderna si energia - Producerea transportul si utilizarea energiei, 2010, Article ID: ISSN - 2066-4125
- [Gan 2011] Babescu M., Borza I., Gana O., Lacatusu F., "Based wind energy conversion system", International conference Building Services and Ambiental Confort 20'th edition,7-8 apr 2011, Article ID: ISSN-1842-9494
- [Gan 2011-1] Babescu M., Borza I., Gana O., Lacatusu F., "Maximizarea energiei si aplatizarea fluctuatiilor puterii generate in retea la un sistem electroenergetic eolian", Conferinta Stiinta moderna si energia - Producerea transportul si utilizarea energiei,12-13 mai 2011, Article ID:ISSN - 2066-4125
- [Gan 2012] Gana O., Prostean O., Vasar C., Babescu M., "Modeling and Optimized Control of Photovoltaic Energy Conversion Systems", International Conference SACI, Timisoara, 2012
- [Gan 2012-1] Babescu M., Gana O., Borlea I., Jigria O., "Fundamental aspects concerning Wind Power Sistem Operation Part 1 Mathematical models",Medina Tunisia, IEEE MELECON, 2012, Article ID:ISSN - 978-1-4673-0782-6
- [Gan 2012-2] Babescu M., Gana O., Borlea I., Jigria O., "Fundamental aspects concerning Wind Power Sistem Operation Part 2 Case study",Medina Tunisia, IEEE MELECON, 2012, Article ID: ISSN-978-1-4673-0782-6
- [Gan 2012-3] Babescu M., O. Gana, Coltea, "Fundamental problems related to the control of the wind energy conversion sysytems - Maximum Power extraction and Smoothing the power fluctuations delivered to the grid", Brasov, IEEE XPLORE, 26 Mai 2012, Article ID: ISSN-978-1-4673-1652-1
- [Gan 2012-4] Gana O., Proștean O., Babescu M.,"Maximization of the Energy and Flattening of Fluctuoaions for the Power Generated into the Network at an Wind Drived Electro Energetic System", SOFA 22-24 aug 2012, ISI
- [Gan 2012-5] Valentin M., Gana O., Bocîi L., Popa M.,"The leading of the eolian power systems in order to maximize the power and to flatten the fluctuations of the generated power",IEEE, revistă indexată în: Latindex, Periódica, CREDI, DOAJ, Dialnet, Actualidad Iberoamericana, LivRe.,Article ID:ISSN-1405-0676
- [Gan 2019] Gana O., Babescu M., "Photovoltaic panels modeling and determination of the maximum power point (MPP)", ICAS, Hunedoara, 9-11 mai, 2019
- [Gon 2005] Gonzalez M., "Model of Photovoltaic Module In Matlab", Latin American Congress of Students of Electrical Engineering, 2005.
- [Gui 2012] Guihua L., Runsheng T.,Hao Z., "Optical Performance Of Horizontal Single Axis tracked Solar Panels", International Conference on Future Energy, Environment and materials, 2012, Article ID:16:1744-1752.
- [Him 2018] Himanshu Sekhar Sahu, Shashank Kumar, Sisir Kumar Nayak, "Maximum Power Point Estimation of a PV Array by Using Improve Bisection Method", Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Bangkok, Thailand, Article ID: INSPEC 18025188, 6-9 Iunie 2018 ©2018 IEEE

- [Huy 2013] Huynh D., Nguyen T., Dunnigan M., Mueller M., "Comparison between open and closed loop trackers of a solar photovoltaic system", IConference on Clean Energy and Technology (CEAT), IEEE, 2013, p. 128-133.
- [Ima 2017] Imam A, Choirul I, Ronny D., "Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Technique on Solar Tracking System Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", ASTECHNOVA International Energy Conference (ANFIS), 2017, E3S Web Conf. Volume 43
- [Ion 2012] Ioniță M., Alexandru C., "Dynamic optimization of the tracking system for a pseudo-azimuthal photovoltaic platform", Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 4, 2012, Article ID: 053117
- [Isl 2012] Islam F., Pota H., "Impact of Dynamic PHEV loads on Photovoltaic System", International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012, Article ID: 2(5): 644-654.
- [Isl 2016] Islam F., Prakash K., Mamun K., "Mudliar Design a Optimum MPPT Controller for Solar Energy System", Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 2, No. 3, June 2016, pp. 545 ~ 553
- [Jai 2007] Jain S., Agarwal V., "New current control based MPPT technique for single stage grid connected PV systems", Energy Conversion & Management, V48, pp. 625-644, 2007.
- [Jav 2014] Javier C., Santiago P., Ángel S., "Accurate Simulation of MPPT Methods Performance When Applied to Commercial Photovoltaic Panels", The Scientific World Journal, Article ID: 914212 2014
- [Jee 2010] Jeevandos C., Kumaravel M., Kumar V., "A novel method for the measurement of the C-V characteristic of a solar photovoltaic cell", Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology, May 2010., pp. 371-374
- [Jee 2013] Jee H., Shehab A., "Model Construction of Single Crystalline Photovoltaic Panels for Real-time Simulation", Department of Electrical & Computer Engineering No.2013, Texas A&M University at Qatar, Doha,
- [Jif 2013] Jifeng S., Yongping Y., Yong Z., Zhou J., "A high precision tracking system based on a hybrid strategy designed for concentrated sunlight transmission via fibers." Renewable energy, 2013, Article ID: 57:12-19.
- [Jin 2013] Jing-Min W., Chia-Liang L., "Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual Axis Single Motor for an Optical Sensor Based Photovoltaic System Sensors", Mar 2013, Article ID: 13(3): 3157-3168 PMID: 23467030
- [Jul 2010] Julie A., Steve R., Casey S., "Auburn University's Solar Photovoltaic Array Tilt Angle and Tracking Performance Experiment", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010, Article ID:2010:1-5
- [Kar 2005] Karimov K., Saqib A., Akhter P., Ahmed M., "A simple photo-voltaic tracking system", Solar Energy Materials and Solar Cells, Feb. 2005, Article ID: 87:49-59
- [Ker 2014] Kerekes T., Sera D., Teodorescu R., "Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface", Institute of Energy Technology, 2014
- [Ket 2005] Ketjoy N., "Photovoltaic Hybrid Systems for Rural Electrification in the Mekong Countries", 2005, University of Kassel

- [Kha 2015] Khaliq A., Ikram A., Salman M., "Solar power park : prospects and challenges", Proceedings of IEEE Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technology, 2015, p.1-6
- [Kiv 2012] Kivrak S., Gunduzalp M., "Theoretical and experimental performance investigation of a two-axis solar tracker under the climatic condition of Denizli", *Przeglad Elektrotechniczny*, Turkey, 2012, Article ID: 88(2): 332-336
- [Lia 2008] Lianbing L., Qiang M., Qingyun Z., "MPPT algorithm with stability and rapidity", Chinese Control and Decision Conference, 2008, no.2, pp. 59-72
- [Liq 2013] Liqun L., Han X., Chunxia L., Jing W., "The influence factors analysis of the best orientation relative to the sun for dual-axis sun tracking system", *Journal of Vibration and Control*, 2013, pp. 1-7
- [Lor 2002] Lorenzo. E., Perez. M., Ezpeleta.A., Acedo. J., "Design of Tracking Photovoltaic Systems with a Single Vertical Axis", *Progress in photovoltaic research and applications*, 2002, Article ID:.10:533-543
- [Lui 2018] Luis Garcia-Gutierrez, Michael Bressan, Fernando Jimenez, Salvador de-las Heras, Corinne Alonso, "Design of a Global Maximum Power Point Tracking (GMPPT) for PV array based on precise PV shadow model", 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, Article ID: DOI: 10.1109/ICRERA.2018.8566880, 14-17 Oct. 2018
- [Mah 2013] Mahmood O., "Programmable logic controller based design and implementation of multiple axes solar tracking system", Proceedings of International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power, and Control Engineering (ICECCPCE), 2013, Article ID: 1:101-106
- [Mah 2017] Mahima Sunar, C. Nithya, J. Preetha Roselyn, "Study of intelligent MPPT controllers for a grid connected PV system", International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), Srivilliputhur, India, Article ID: INSPEC 17613730, 23-25 Martie 2017, ©2017 IEEE
- [Mal 2017] S. G. Malla, "Small signal model of PV power generation system", International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), Chennai, India, Article ID: INSPEC 17861014, 21-22 Sept. 2017, ©2017 IEEE
- [Mam 2015] Mamatha G., "Perturb and Observe MPPT Alogrithm Implementation for PV Applications", *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2015, Article ID: 6(2):1884-1887
- [Mar 2012] Marcel S., Tomas C., Artur S., Juraj B., "Solar electricity production from fixed inclined and sun tracking photovoltaic modules in South Africa", 1st Southern African Solar Energy Conference (SASEC), 2012, pp.1-8.
- [Mas 2003] Masakazu I., Kazuhiko K., Keiichi K., Tetsuo K., Hiroyuki S., Kosuke K., "Comparative study of fixed and tracking system of very large-scale PV (VLS-PV) systems in the world deserts", 3rd Proceedings of WCPEC, 2003, Article ID: 30:A2-01.
- [Meh 2010] Mehleri D., Zervas L., Sarimveis H., Palyvos J., Markatos C., "Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays", *Renewable Energy*, vol. 35, no. 11, 2010, pp. 2468-2475

- [Meh 2014] Mehmood A., Shaikh A., Waqas A., "Modeling of the solar photovoltaic systems to fulfill the energy demand of the domestic sector of Pakistan using RETSCREEN software", Proceedings of International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE),2014, pp. 19-21
- [Mid 1996] Midya P., Kerin T., Turnbull J., Reppa R., Kimball J., "Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications", Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1996, pp.1710-1716
- [Miq 2012] Miqdam T., Khalil. A., Hussein. K., Feras H., Hakim A., "Effect of Design Variation on Saved Energy of Concentrating Solar Power Prototype", Proceedings of the World Congress on Engineering, 2012, Article ID: 3:1-6.
- [Mir 2017] Mircea Taciuc, "PV cells I-V characteristic. Explicit equation with three parameters and its simplified forms", 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania,Article ID: INSPEC 16836147, 23-25 Martie 2017, ©2017 IEEE
- [Moh 2004] Mohamad A., "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system", Applied Energy, 2004, Article ID:79:345-54.
- [Moh 2014] Mohammed Y., Mohammed F., Abdelkrim M., "A Neural Network Based MPPT Technique Controller for Photovoltaic Pumping System", International Journal of Power Electronics and Drive System, 2014, Article ID:4(2): 241-255.
- [Moh 2017] Mohammed A., "A way to improve maximum power point (MPP) tracking for PV systems", Department of Electrical Engineering, Aligarh Muslim University, Aligarh, India, 2017
- [Moh 2018] Mohamed Elsayed Elnagi Mahmoud, Ahmed A. Zaki Diab, Denis A. Kotin, "Simulation and Experimental Validation of Two-Diode Model of Photovoltaic (PV) Modules", XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia,Article ID: INSPEC 18303739, 2-6 Oct. 2018, ©2018 IEEE
- [Mon 2014] Moniruzzaman H.,Patwary M., Rahman M., "A three level solar panel system with an automated solar tracker",Proceedings of 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2014, pp. 1-7.
- [Mos 2013] Mostefa G., "Design of an Automatic Solar Tracking System to Maximize Energy Extraction", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2013, Article ID: 3:453-460.
- [Mur 2017] Murari A., Soumya D., Pradip S., Biplab S., Anagh G., "P&O algorithm based MPPT technique for solar PV system under different weather conditions", International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Kollam, India,Article ID: INSPEC 17263472, 20-21 Aprilie 2017, ©2017 IEEE
- [Nad 2017] NadiaAL-RousanNor Ashidi MatIsaMohd Khairunaz MatDesa, "Advances in solar photovoltaic tracking systems", Article ID: j.rser.2017.09.077
- [Nai 1990] Al-Naima M., Yaghobian A., "Design and construction of a solar tracking system.", Solar Wind Technol, 1990, Article ID: 7:611-617.

- [Nav 2017] Navjeet S., Mala D., Kamakshi S., "Analysis of a PV system under partially shaded condition using enhanced PV model", 7th International Conference on Power Systems (ICPS), Pune, India, Article ID: INSPEC 17858030, 21-23 Decembrie 2017, ©2017 IEEE
- [Ned 2011] Nedumgatt J., Jayakrishnan K. B., Umashankar S., Vijayakumar D., „Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems-Modeling and Simulation System will be modelled with the help of MATLAB/SIMULINK”, School of Electrical Engineering VIT University Vellore, Hyderabad, India, 16-18 Dec. 2011, INSPEC Number: 12506829
- [Nea 2003] Neamen A., "Semiconductor Physics and Devices", New York, 2003
- [Oi 2003] Oi A., "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", California Polytechnic State University, 2005.
- [Okp 2013] Okpeki K., Otuagoma O., "Design and Construction of a Bi-Directional Solar Tracking system", International Journal of Engineering and science, 2013, Article ID: 2:32-38
- [Oma 2010] Omar N., Verbrugge B., Mulder, "Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application", IEEE, ©2010, Article ID: 978-1-4244-5395-5/10, pp. 2577-2584
- [Osa 2017] Osamede A., Ruaan S., Christo P., "Simulation and analysis of maximum power point tracking in a stand alone PV system: A case study using regression analysis and pulse width modulation", International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Cape Town, South Africa, Article ID: INSPEC 16902204, 4-5 Aprilie 2017 ©2017 IEEE
- [Osa 2017] Osamede A., Ruaan S., Christo P., "Simulation and analysis of maximum power point tracking in a stand alone PV system: A case study using regression analysis and pulse width modulation", International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), 2017, INSPEC: 16902204 2017
- [Pak 2016] Pakkiraiah B., Sukumar G., "Research Survey on Various MPPT Performance Issues to Improve the Solar PV System Efficiency", Hindawi Publishing Corporation Journal of Solar Energy, 2016, Article ID: 8012432
- [Par 2013] Parmar A., Narendrasinh A., Gautam V. "Solar Tracking Techniques and Implementation in Photovoltaic Power Plants", International Journal of Emerging Technology and Advcd Engineering, 2013, Article ID: 2(3 80-89
- [Par 2015] Parmar N., Parmar A., Gautam V., "Analysis and implementation of passive solar tracking system", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, mar 2015, Article ID: 5(1): 138-145
- [Pat 2018] Paththayame U., Lili H., "A Simplified Mathematical Model for PV Cell Simulation", 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Waikoloa Village, HI, USA, Article ID: INSPEC 18288222, 10-15 Iunie 2018, ©2018 IEEE
- [Pha 2017] Phasapon M., Wisut T., "The new simulation model for estimating PV power output", International Electrical Engineering Congress (IEECON), Pattaya, Thailand, Article ID: INSPEC 17285984, 8-10 Martie 2017 ©2017 IEEE

- [Pic 16F887] Specificații tehnice pentru microcontrollerul PIC16F887
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41291d.pdf>
- [Pil 2017] Pilla V., Dushmanta K., Gandikota G., Jagadeswar M., "A Variable Perturbation Logic based Adaptive MPPT Controller design for PV System: a Real-time Implementation", India Council International Conference (INDICON), Roorkee, India, Article ID: INSPEC 18163235, 15-17 Dec. 2017, ©2017 IEEE
- [Pro 1985] Prostean O., "Tehnici de identificare si modelare", 1985, Lito IPTVT,
- [Qua 2005] Quaschnig V., "Understanding Renewable Energy Systems", London Carl Hanser Verlag GmbH, 2005, Article ID: ISBN 1-84407-128-6
- [Rab 2010] Rabiul I., Youguang G., Jian G., "Simulation of PV array characteristics and fabrication of microcontroller based MPPT", International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE, 2010, Article ID: INSPEC-11774040
- [Rah 2013] Rahman S., Ferdaus R., Mannan M., Mohammed A., "Design & implementation of a dual axis solar tracking system", American Academic & Scholarly Research Journal, vol.5, 2013, pp. 47-54
- [Rat 2015] Ratna P., Sapto W., Muhamad R., "Maximum power point tracking for photovoltaic for incremental conductance method", Energy Procedia, vol. 68, 2015, pp. 22-30
- [Rei 2010] Reis F., Brito M., Corregidor V., Wemans J., Sorasio G., "Modeling the performance of low concentration photovoltaic systems", Solar energy materials and solar cells, 2010, Article ID:1:1-5.
- [Ric 2017] Ricardo Moreno, "Detailed modelling and simulation of photovoltaic systems", Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), Bogota, Colombia, Article ID:INSPEC 17042568, 31 May - 2 Iunie 2017 ©2017 IEEE
- [Riz 2008] Rizk J., Chaiko Y., "Solar Tracking System More Efficient Use of Solar Panels", World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, Article ID:17:313-315
- [Rob 2014] Robert B., Reggie C., Elmer D., "Optimization of A Small Scale Dual-Axis Solar Tracking System Using Nanowatt Technology", Journal of Automation and Control Engineering, 2014, Article ID: 2:134-137.
- [Rok 2016] Rokonuzzaman M., Hossam H., "Design and implementation of maximum power point tracking solar charge controller", Sept. 2016, Article ID: INSPEC-16726585
- [Rok 2017] Rokonuzzaman M., Mahmuda K., Hossam H., Shamimul I., "Design of a MPPT Solar Charge Controller in Matlab Simulink GUI Environment", International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS), 22-23 Feb. 2017, MIST, Dhaka
- [Saa 1963] Saavedra A., "Design of a solar tracking servomechanism for a recording instrument of the direct solar irradiation", Scientia, 1963, Article ID: 122: 40-48
- [Sab 2015] Sabir M., "Analysis and Experimentation of a Passive Solar Tracker", MS thesis, University of Khartoum, Sudan, 2015
- [Sad 2018] Sadeq D., Maysam Abbod, Hamed A., "A Modified P&O-MPPT based on Pythagorean Theorem and CV-MPPT for PV Systems", 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, Article ID: INSPEC 18282581, 4-7 Septembrie 2018, ©2018 IEEE

- [Sar 2018] Sarita S., Prasanta B., Sandeep S., "Extraction of maximum power from a solar PV system using fuzzy controller based MPPT technique", Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), Bhubaneswar, India, Article ID: INSPEC 17842459, 28-30 Martie 2018, ©2018 IEEE
- [Sem 1980] Semma P., Imamura M., "Sun tracking controller for multi kW photovoltaic concentrator system.", Proceedings of the 3rd International Photovoltaic Sol Energy Conf, Cannes, France, Article ID:1980.27-31.
- [Sem 2011] Seme S., Štumberger G., "A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and Differential Evolution for dual axis sun tracking purposes", Solar Energy, vol.85, no. 11, 2011, pp. 2757–2770
- [Sem 2011-1] Seme S., Štumberger G., Voršič J., "Maximum efficiency trajectories of a two-axis sun tracking system determined considering tracking system consumption", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26,, 2011, pp. 1280–1290
- [Sen 2014] Sengar S., "Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic System", International Review of Applied Engineering Research, 2014, Article ID:4(2):147-154
- [Sev 2018] Severine B., Jonathan K., "Modelling daily PV performance as a function of irradiation, ambient temperature, soiling, wind speed, and aging - Applied to PV modules operating in Maui", 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Waikoloa Village, HI, USA, Article ID: INSPEC 18288529, 10-15 Iunie 2018, ©2018 IEEE
- [Sim 2001] Simons G., Sethi P., Davis R., DeGroat K., "The Role of Renewable Distributed Generation in California's Electricity System", IEEE PES Summer Meeting, Vol. 1, 2001, pp. 546-547
- [Sin 2013] Singh G., "Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: a review", Energy, vol. 53, 2013, pp. 1–13
- [Sne 2013] Snehal P., Kolte T., "FPGA Based Standalone Solar Tracking System", International Journal of Scientific and Research Publications, 2013, Article ID: I3:1-5.
- [Sob 2012] Sobuj K., Abul B., Maruf A., Fahad B., "Two Ways of rotating Freedom Solar Tracker by Using ADC of Microcontroller", Global Journal of Researches in engineering, 2012, Article ID:12:29-34.
- [Sol 2015] Solar Tracker, Wikiwand, Available: http://www.wikiwand.com/en/Solar_tracker [Accessed: 05 Iun., 2015].
- [Son 2017] Songkiate K., Surasak N., Titiroongruang W., Amornrat L., "Comparison of PV estimation model with measured PV power output", International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, IEEE, ©2017, Article ID:INSPEC 17285882
- [Sub 2017] Subha R., Himavathi S., "MPPT of PV systems under partial shaded conditions using flower pollination algorithm", International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), Coimbatore, India, Article ID: INSPEC 17393701, 3-4 Feb. 2017, ©2017 IEEE
- [Suk 2013] Sukumar K., Khalid A., "Modeling and Control of a Micro-Grid Set Up using Photovoltaic Arrays", The University of West Florida, Pensacola, Article ID:FL-32514/2013

- [Sun 2009] Sungur C., "Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 4, 2009, pp. 1119–1125
- [Sun 2017] Sunitha A., Kumar G., Nidhi P., Jatin V. "Design of High Efficient MPPT Solar Inverter", *International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering (ICMAA 2017)*, MATEC Web Conf, Volume 108, 2017
- [Tah 2017] Tahiri F., Chikh K., Khafallah M., "Modeling and performance analysis of a solar PV power system under irradiation and load variations", *14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Marrakech, Morocco, Article ID: INSPEC 17415479, Electronic ISSN: 2474-0446, 28-31 Martie 2017, ©2017 IEEE
- [Tan 2014] Tania H., Alam M., "Sun tracking schemes for photovoltaic panels", *Proceedings of 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, 2014, pp.1–5
- [Teo 2012] Teodorescu R., Rik W., Doncker D., Liserre M., "Grid Converters for PV and WT Systems", 2012, Aalborg University, Institute of Energy Technology, Denmark, DK-9220 Aalborg SE
- [Tib 2012] Tiberiu T., Oancea D., Kreindler L., "Performance evaluation of a solar tracking PV panel" *U.P.B. Sci. Bull series*, 2012, Article ID:74:3-10
- [Ton 2013] Tony K., Schaefer L., "Flow Rate Optimization Of A Linear Concentrating photovoltaic System", *Journal of solar energy engineering*, 2013, Article ID: 135:10-14
- [Tri 2005] Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Tselepis S., Dimitriou V., "Design and Performance Aspects for low concentration photovoltaics", *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Barcelona, Spain, 2005
- [Tri 2011] TRITEC, "TRITEC International AG - energy for a better world - Produktkatalog", Hauptsitz, Herrenweg 60, 4123 Allschwil/Basel, Schweiz, info@tritec-energy.com
- [Vel 2009] Velicu R., Lateş M., Moldovean G., "Loading cases and forces on azimuthal solar tracking systems with linear actuators", *Proceedings of the IFToMM International Symposium on the Science of Mechanisms and Machines (SYROM '09)*, 2009, pp. 723–733,
- [Vis 2008] Vişă I., Diaconescu D., Duţă A., Popa V., "PV tracking data needed in the optimal design of the azimuthal tracker's control program", *Proceedings of the 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM '08)*, vol. 3, 2008, pp. 449–454
- [Wal 2014] Waleed A., Hassan K., Virk U., "Designing a dual axis solar tracker for optimum power", *Journal of Electrical Engineering*, 2014, Article ID:14(2) :173–178
- [Wie 2014] Wiedjajaa A., Harta S., Josses L., "Solar Panel System for Street Light Using Maximum Power Point Tracking (MPPT) Technique", *International Conference on Advances Science and Contemporary Engineering* victronenergy.com: Which solar charge controller? PWM or MPPT?, Volume 68, 28 June 2014, article 00017

- [Yaw 2018] Yawen L., Zhigang L., Fang Y., "The investigation of solar PV models", Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, Article ID: INSPEC 17898547, 19-22 Feb. 2018 ©2018 IEEE
- [Zak 2017] Zakariae A., Abdelhadi R., Abdelmounaim E., Omar B., "Toward an approach to improve MPPT efficiency for PV system", International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Fez, Morocco, Article ID: INSPEC 16917343, 19-20 Aprilie 2017, ©2017 IEEE
- [Zha 2017] Zhang M., Zhong S., Mao P., Sun Y., Zhang W., "Modelling of PV module and its application for partial shading analysis – part I: model and parameter estimation of PV module", The Journal of Engineering (Volume: 2017, Issue: 13, 2017), Article ID: DOI: 10.1049/joe.2017.0538, ©2017 IET, pag. 1295 - 1298
- [Zhi 2017] Zhiqiang G., Song L., Xuesong Z., Youjie M., Jian Z., "A new maximum power point tracking method for PV system", 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chongqing, China, INSPEC 17041092, Article ID: ISSN: 1948-9447, 28-30 Mai 2017, ©2017 IEEE
- [Zon 2017] Zongchang S., Zhoujun Y., "Improved maximum power point tracking algorithm with cuk converter for PV systems", The Journal of Engineering (Volume:2017, Issue:13, 2017), DOI: 10.1049/joe.2017.0617, IET, Article ID: ISSN: 2051-3305 pag. 1676 - 1681