

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII PRIVIND EFICIENTIZAREA SOLUȚIILOR DE CONVERSIE ȘI STOCARE A ENERGIEI REGENERABILE

Doctorand:
Ing. Andreea-Mădălina LUPAȘCU

Conducător științific:
Prof.Univ.Dr.-Ing.Habil. Valentin NĂVRĂPESCU

BUCUREȘTI
2021

Cuprins

1 INTRODUCERE 4

2 STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL MANAGEMENTULUI PRODUCERII ȘI DISTRIBUȚIEI ENERGIEI REGENERABILE 4

3 SURSE DE ENERGII REGENERABILE. DOMENII ȘI CRITERII DE EVALUARE A OPORTUNITĂȚILOR DE PRODUCERE A ENERGIEI ELECTRICE DIN SURSE REGENERABILE 5

4 CONVERSIA ENERGIEI FOTOVOLTAICE ÎN ENERGIE ELECTRICĂ 5

4.1 Caracteristici și principii de conversie 5

4.2 Parametrii electrici ai celulei fotovoltaice 5

4.3 Eficiența energetică a celulelor fotovoltaice 6

4.4 Modelul simulativ al unei celule fotovoltaice 7

4.5 Rezultate experimentale 9

4.6 Concluzii 12

5 REGULATOR ÎNCĂRCARE BATERII. ROLUL ȘI LOCUL VARIATOARELOR DE TENSIUNE CONTINUĂ ÎN SISTEMELE FOTOVOLTAICE. 13

5.1 Generalități. 13

5.2 Soluția tehnică propusă pentru convertorul c.c.-c.c. utilizat în conversia energiei fotovoltaice 13

5.3 Modelul simulativ al convertorului c.c.-c.c. 14

5.4 Rezultate experimentale 16

5.5 Concluzii 17

6 STOCAREA ENERGIEI PRODUSE DE CENTRALE FOTOVOLTAICE. PRINCIPII. ELEMENTE DE STOCARE. EFICIENȚA STOCĂRII. 18

6.1 Generalități 18

6.2 Tipuri de baterii de acumulatoare utilizate în stocarea energiei electrice 18

6.3 Dimensionarea bateriilor de acumulatoare 18

6.4 Rezultate experimentale privind dimensionarea și funcționarea bateriei de acumulatoare din centrala fotovoltaică ICPE ACTEL 19

6.5 Simularea și modelarea matematică a bateriilor de acumulatoare utilizate în stocarea energiei electrice produse de surse regenerabile 22

6.6 Concluzii 23

7 UTILIZAREA CONVERTOARELOR STATICE ÎN SISTEMELE DE CONVERSIE A ENERGIEI REGENERABILE. PRINCIPII. DEFINIȚII. CLASIFICĂRI. 23
7.1 Generalități. Rolul convertoarelor statice în sistemele fotovoltaice 23
7.2 Soluția tehnică propusă pentru convertorul cc-ca utilizat în conversia energiei fotovoltaice..... 24
7.2.1 Principiul de comandă PWM al invertoarelor trifazate 25
7.2.2 Calculul de dimensionare al convertorului cc-ca utilizat în centrala fotovoltaică..... 25
7.3 Modelul simulativ al convertorului cc-ca 26
7.4 Rezultate experimentale 29
7.5 Concluzii 32
8 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE. 32
8.1 Concluzii generale 32
8.2 Contributii originale 36
8.3 Perspective ulterioare de dezvoltare 38
9 LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE ȘI PARTICIPĂRI CONFERINȚE 39
10 BIBLIOGRAFIE 41

1 INTRODUCERE

Lucrarea de cercetare intitulată "**Contribuții privind eficientizarea soluțiilor de conversie și stocare a energiei regenerabile**" vine ca o necesitate în cadrul sectorului energetic care se confruntă în prezent cu o criză globală generată de dezvoltarea continuă a societății umane, care, implicit conduce la creșterea consumului de energie electrică. Repercursiunile sunt din ce în ce mai vizibile și se traduc în schimbări climatice, creșterea nivelului de poluare și diminuarea resurselor de combustibili fosili.

În acest context, principalele preocupări atât la nivel național, cât şi la nivel mondial sunt implementarea și utilizarea sistemelor care furnizează energie electrică cu ajutorul surselor regenerabile și în special creșterea ratei de producere a energiei prin intermediul acestora.

Principalul obiectiv al tezei de doctorat îl reprezintă cercetarea sistemelor de generare a energiei electrice utilizând ca sursă regenerabilă soarele. Chiar dacă în ultimii ani energia fotovoltaică a luat amploare, captarea și transformarea energiei solare în energie electrică constituie, încă, o provocare.

Teza urmărește studierea și dezvoltarea soluțiilor optime privind sistemele fotovoltaice în vederea obținerii eficienței maxime în procesul de conversie.

Așadar, prezenta lucrare tratează un subiect de actualitate, și anume eficiența energetică, care a fost, este și va fi un obiectiv strategic în conversia energiei.

Teza de doctorat, și-a propus de asemenea, să cerceteze și să trateze problemele legate de stocarea energiei electrice.

2 STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL MANAGEMENTULUI PRODUCERII ȘI DISTRIBUȚIEI ENERGIEI REGENERABILE

Criza sanitară cu care ne confruntăm în ultima vreme a accentuat și a prioritizat creșterea protecției mediului din întreaga lume la schimbările climatice. [1]

Potrivit studiilor oamenilor de știință, coraborate cu Strategia Uniunii Energetice, pentru combaterea schimbărilor climatice sunt necesare creșterea eficienței energetice, diminuarea emisiilor de gaze ce au efect de seră și maximizarea producerii, precum și a consumului de energie electrică provenită din sisteme regenerabile. [2] [3]

Raportându-ne la situația din Europa, obiectivul propus pentru anul 2050 este neutralitatea emisiilor de gaze cu efect de seră, obținând astfel îmbunătățiri pe mai multe planuri, precum agricultură, investiții în hidrogen cu rol în domeniul energetic, reducerea emisiilor de carbon din stocul imobiliar, reducerea poluării și decarbonarea sectorului energetic.

Conform Pactului Verde European, ținta propusă până în anul 2030 este reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră cu 50-60% raportat la nivelul din 1990 iar ca până în 2050 să devină primul continent neutru în ceea ce privește emisiile de carbon. [4]

Chiar dacă producția și consumul energiei electrice generate de surse regenerabile sunt în creștere la nivel UE, în vederea obținerii rezultatelor propuse sunt necesare și esențiale continuarea eforturilor și utilizarea energiei regenerabile în pondere din ce în ce mai mare. [5]

3 SURSE DE ENERGII REGENERABILE. DOMENII ȘI CRITERII DE EVALUARE A OPORTUNITĂȚILOR DE PRODUCERE A ENERGIEI ELECTRICE DIN SURSE REGENERABILE

Termenul de energie regenerabilă este asociat tipurilor de surse de energie nepoluante și care nu afectează mediul înconjurător, provenite din resurse naturale care se reînnoiesc în decursul unui interval de timp relativ scurt. Rolul sistemelor de producere a energiei regenerabile este generarea energiei electrice, a căldurii și a combustibililor pentru transport.

Clasificarea surselor de energie regenerabilă poate fi realizată astfel: solară, eoliană, hidroenergia, geotermală, biomasa. [1] [5] [6]

4 CONVERSIA ENERGIEI FOTOVOLTAICE ÎN ENERGIE ELECTRICĂ

4.1 Caracteristici și principii de conversie

Conversia fotovoltaică reprezintă conversia radiației solare în energie electrică iar în prezent constituie un element cheie în strategiile energetice din lume fiind principala formă de energie disponibilă pe termen lung cu efect negativ minim asupra mediului înconjurător. [7]

Importanța acestei forme de energie este dată de numeroasele avantaje pe care are:

- Sursă inepuizabilă;
- Acesibilitate gratuită;
- Disponibilitate geografică în toate zonele populate;
- Nu dăunează mediului.

4.2 Parametrii electrici ai celulei fotovoltaice

Schema electrică completă aferentă unei celule fotovoltaice, exemplificată în figura 4.1, ia în calcul apariția rezistențelor electrice nedorite (parazite), notate cu r_s și a posibilelor scurgeri prin izolația celulei, notate r_p. [7] [8] [9]

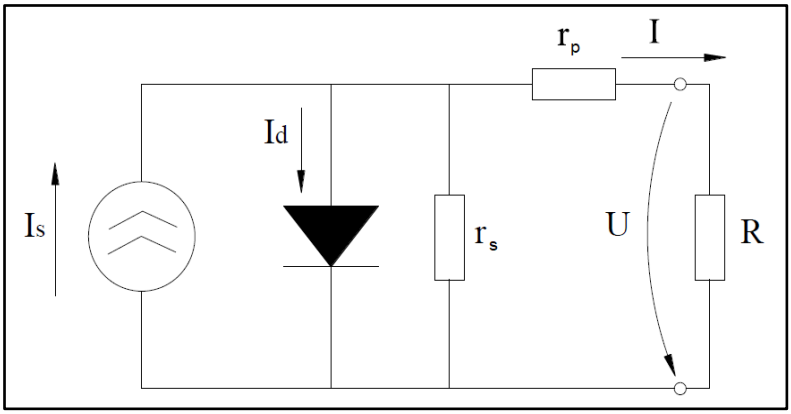


Figura 4.1 Schema electrică amănunțită a unei celule fotovoltaice [8]

- În prezența rezistenței r_p:

$$I = I_s - I_0 \cdot e^{\frac{q(U+I\cdot r_p)}{nkT}} \tag{4.1}$$

- În prezența rezistenței r_s:

$$I = I_s - I_0 \cdot e^{\frac{qU}{nkT}} - \frac{U}{r_s} \tag{4.2}$$

- În prezența ambelor rezistențe:

$$I = I_s - I_0 \cdot e^{\frac{q(U+I\cdot r_p)}{nkT}} - \frac{U+I\cdot r_p}{r_s} \tag{4.3}$$

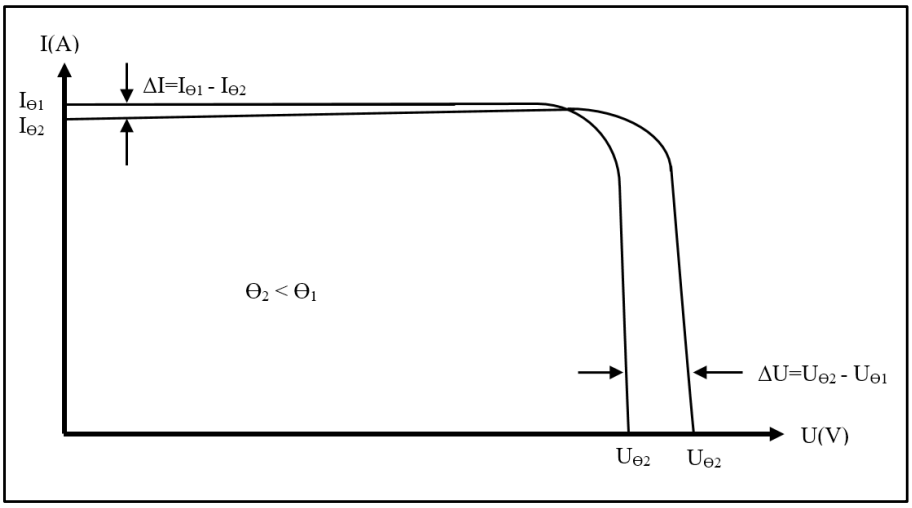


Figura 4.2 Influența temperaturii asupra funcționării celulelor fotovoltaice [10]

Conform graficului din figura 4.2, se poate observa că odata cu creșterea temperaturii mediului în care este utilizată o celulă fotovoltaică, crește aparent curentul debitat I, dar tensiunea U de ieșire scade substanțial, ceea ce ne sugerează ideea că, odată cu creșterea temperaturii scade randamentul celulei fotovoltaice. [8] [10]

4.3 Eficiența energetică a celulelor fotovoltaice

După cum se poate observa în figura 4.1, o primă concluzie referitoare la creșterea eficienței energetice a unei celule fotovoltaice, respectiv a unui sistem fotovoltaic, este legată de tehnologia de construcție a acestora cu diminuarea semnificativă a valorilor r_p și prin maximizarea r_s.

În același sens este foarte importantă și mentenanța celulelor fotovoltaice în sensul micșorării r_p, respectiv creșterii r_s.

Un factor inportant ce influențează eficiența energetică, este randamentul final, notat cu Y_f. Acesta este descris ca fiind raport între energia generată în curent alternativ și puterea nominala a panourilor fotovoltaice P_{max}.

$$Y_f = \frac{E_g}{P_{max}} \tag{4.12}$$

4.4 Modelul simulativ al unei celule fotovoltaice

În programul MATLAB am simulat funcționarea unei celule fotovoltaice.

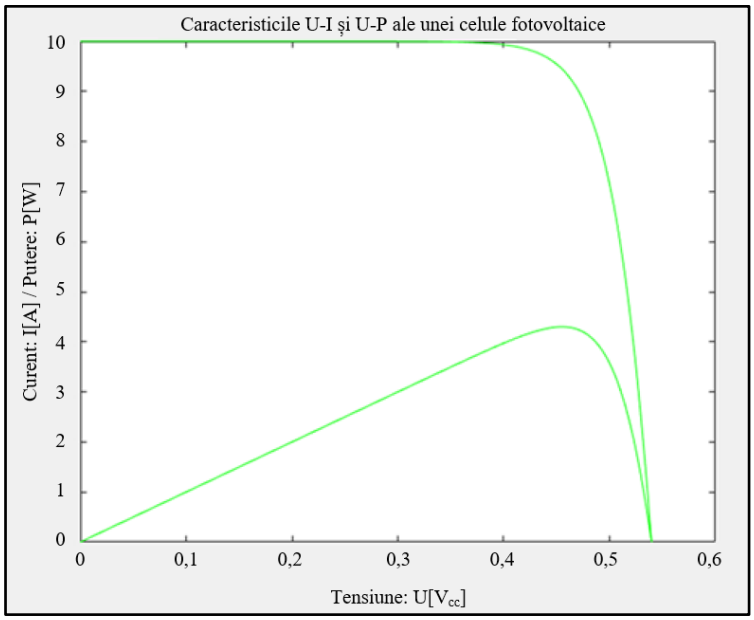


Figura 4.3 Model simulativ pentru o celulă fotovoltaică de referință (ideală)

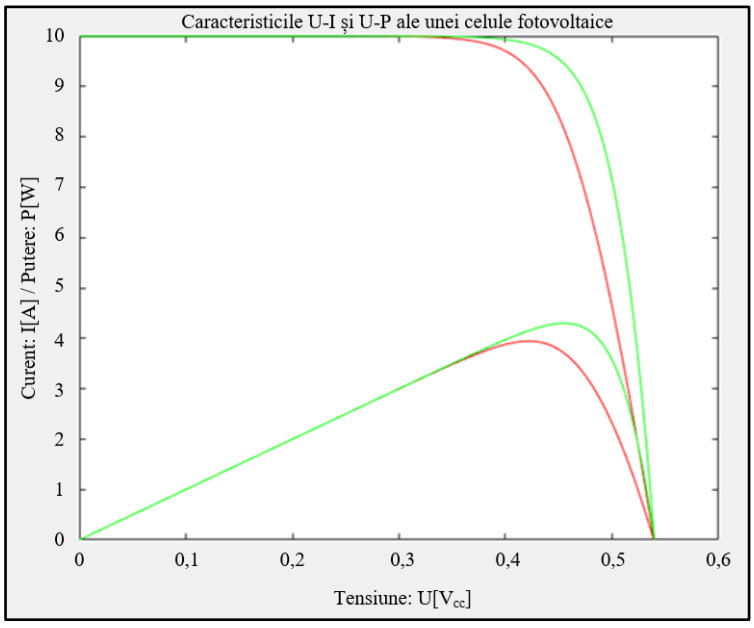


Figura 4.4 Model simulativ pentru o celulă fotovoltaică cu rezistența parazită mărită

Se observă abateri de la curbele de referință I=f(u), respectiv P=f(u) marcate cu culoare verde.

Aria cuprinsă între cele două curbe P=f(u) reprezintă pierderile care conduc la diminuarea eficienței energetice a celulei prin creșterea valorii r_p.

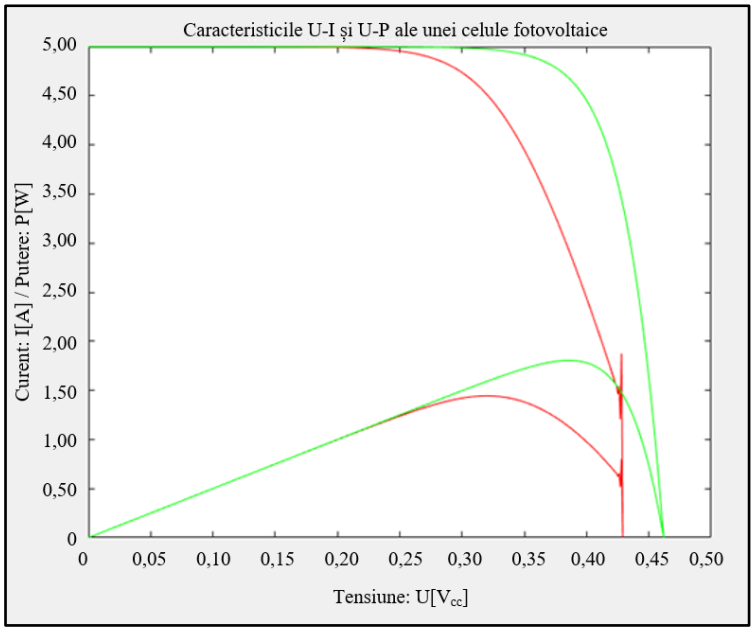


Figura 4.5 Model simulativ pentru o celulă fotovoltaică cu rezistența de șuntare micșorată

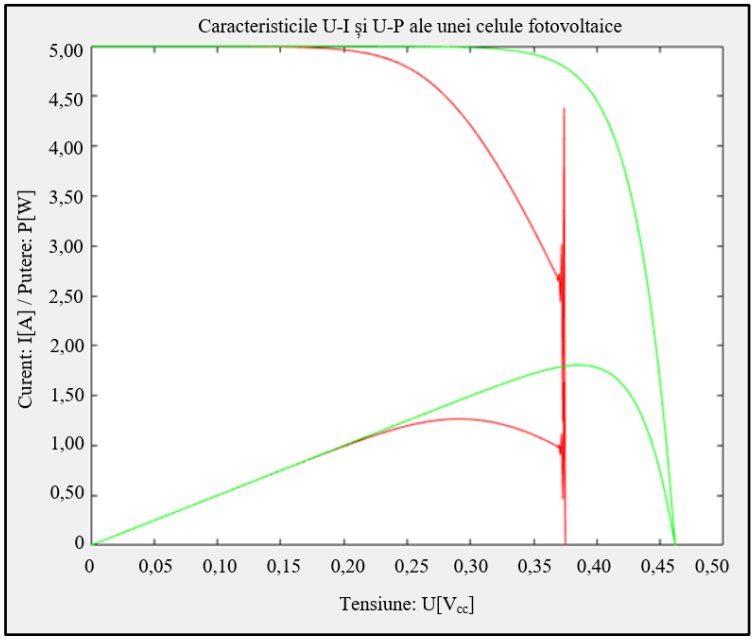


Figura 4.6 Model simulativ pentru o celulă fotovoltaică cu rezistența parazită mărită și rezistența de șuntare diminuată

În consecință cele trei aspecte dezvoltate teoretic mai sus s-au accentuat, astfel că:

- Diminuarea drastică a randamentului, respectiv a eficienței energetice funcționării celulei fotovoltaice prin creșterea ariei între cele două curbe P=f(u);
- Diminuarea drastică a tensiunii de mers în gol a celulei;
- Regimul periodic amortizat amplificat prin creșterea suprareglajului puterii debitate.

4.5 Rezultate experimentale

Validarea aspectelor teoretice studiate și dezvoltate atât în prezentul capitol cât și în cele ce urmează, s-a realizat având la dispoziție centrala fotovoltaică de la sediul ICPE ACTEL SA, unde îmi desfășor activitatea. Centrala a fost proiectată și achiziționată în cadrul a două proiecte de cercetare cu fonduri europene, iar schema bloc de principiu este prezentată în figura 4.7.

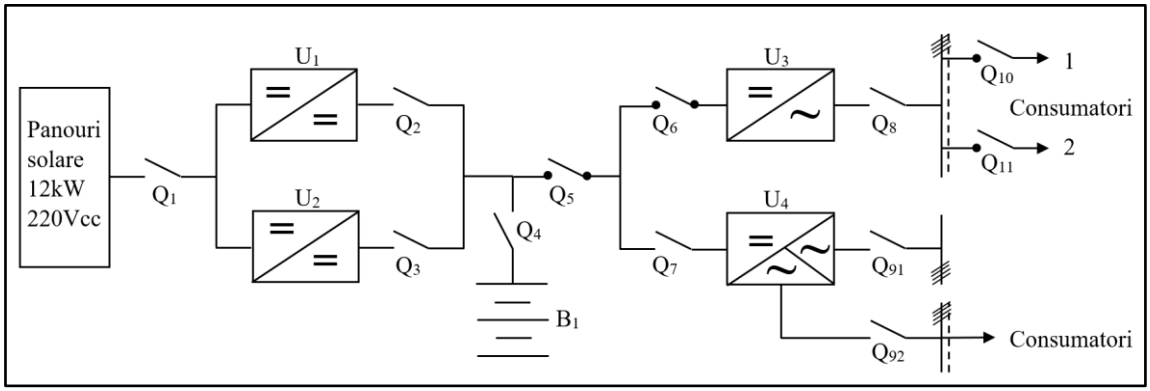


Figura 4.7 Schema bloc de principiu centrală fotovoltaică – SIPAMASRE și SICEEIF

O vedere de ansamblu a structurii cuprinzând panourile fotovoltaice, ce reprezintă o componentă a centralei, precum și a tabloului electric la care sunt legate aceste panouri sunt prezentate în figura 4.8.a și 4.8.b.



Figura 4.8.a Panourile fotovoltaice – componentă a centralei fotovoltaice ICPE ACTEL SA

Pentru caracterizarea panourilor fotovoltaice din centrala ICPE ACTEL și pentru validarea studiului simulativ prezentat în lucrare am realizat un set de măsurători la ieșirea centralei.

S-au măsurat în condiții de iradianță diferită tensiunea la ieșirea panourilor fotovoltaice și curentul de sarcină pentru sarcină variabilă realizată cu consumatori reali din dotarea societății.

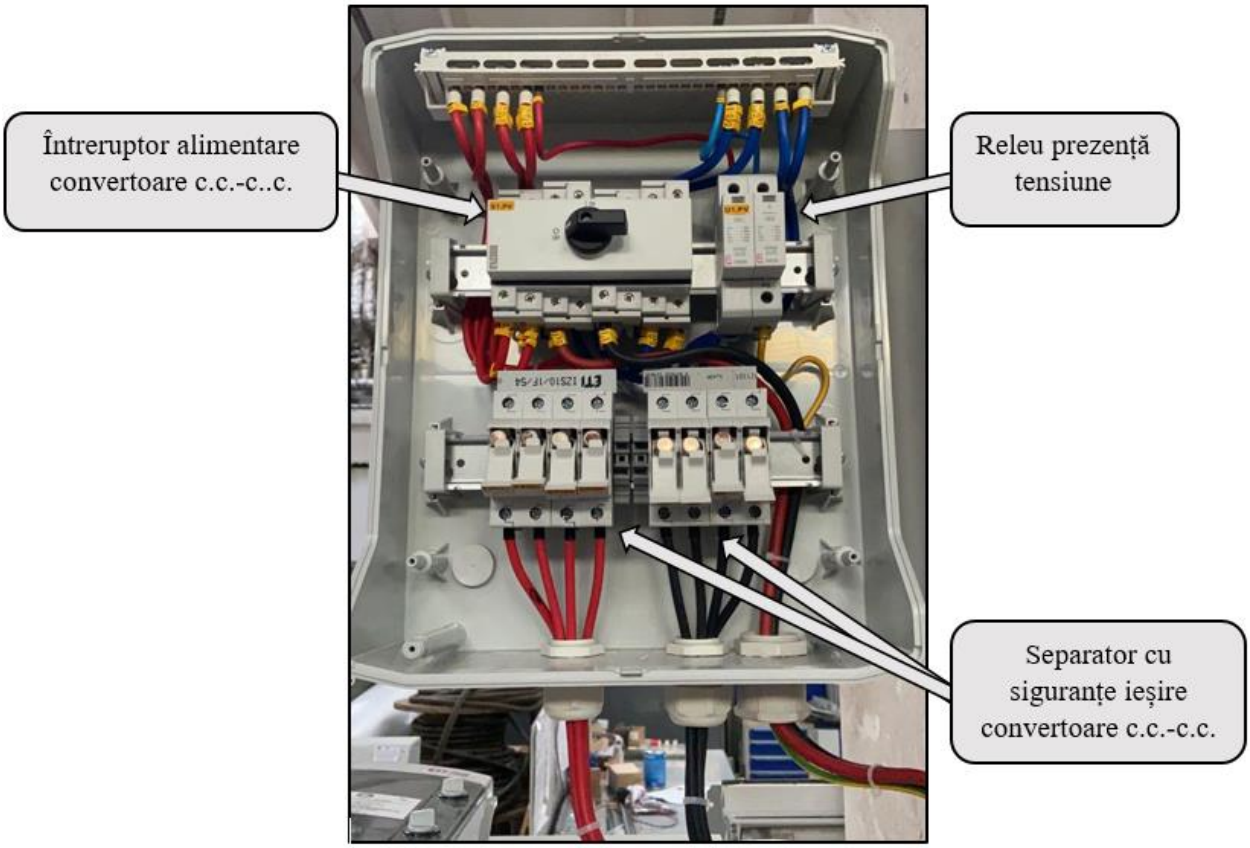


Figura 4.8.b Panoul electric – componentă a centralei fotovoltaice ICPE ACTEL SA

Tabelul 4.1

Nr. Crt.	Iradianță	Ucc (V)	Is (A)
1	Iradianță mai mare (zi însorită)	221	0
2		219	9,6
3		217	11,9
4		215,7	13,15
5		213,5	16,55
6		203	25,5
7		190	30,9
8	Iradianță mai mică (zi mai puțin însorită)	221	0
9		218,8	9,5
10		216,5	11,4
11		215,2	12,9
12		210	15,4
13		198	20,1
14		188	24,2

În figura 4.9 sunt exemplificate caracteristicile experimentale U=f(I) aferente centralei fotovoltaice ICPE ACTEL, valori măsurate la ieșirea panourilor fotovoltaice.

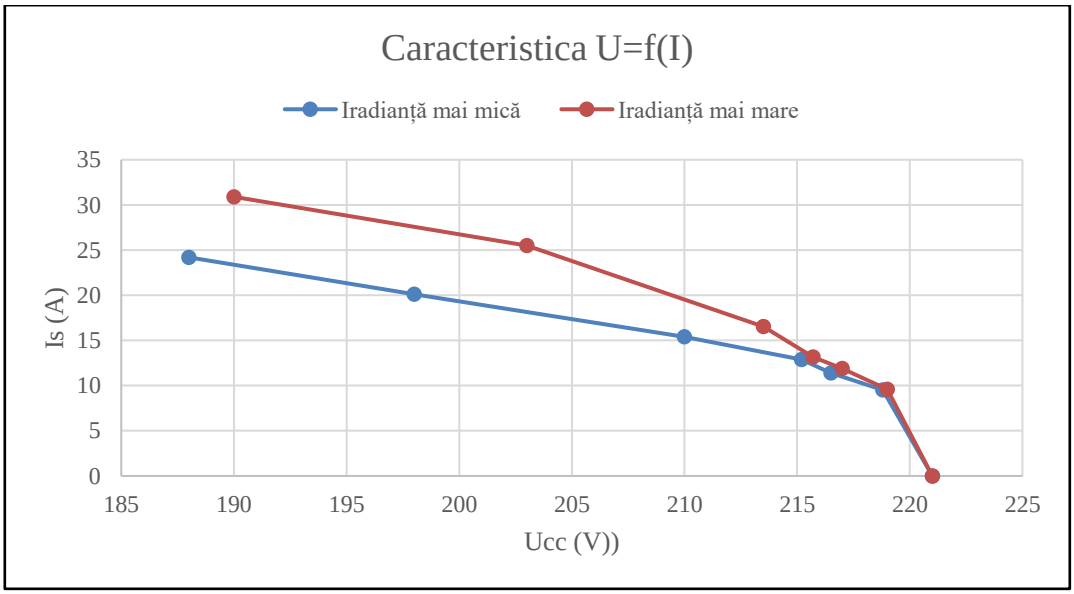


Figura 4.9 Caracteristica experimentală U=f(I)

Caracteristicile din figura 4.9 sugerează următoarele concluzii:

- Valoarea tensiunii de mers în gol, indiferent de iradianță, este aceeași;
- Centralele fotovoltaice, fiind construcții noi, valorile rezistenței serie, respectiv rezistenței paralel din schema echivalentă a centralei fotovoltaice, au valori ideale;
- Caracteristicile experimentale din figura 4.9 întregesc teoria privitoare la modelul matematic al celulelor fotovoltaice;

O problemă nouă în caracterizarea celulelor fotovoltaice este comporatrea acestora în regim dinamic. În acest sens am studiat comportarea celulelor fotovoltaice la cuplarea și decuplarea sarcinii. Rezultatul acestei comportări este reprezentat în graficele din figura 4.10, respectiv 4.11.

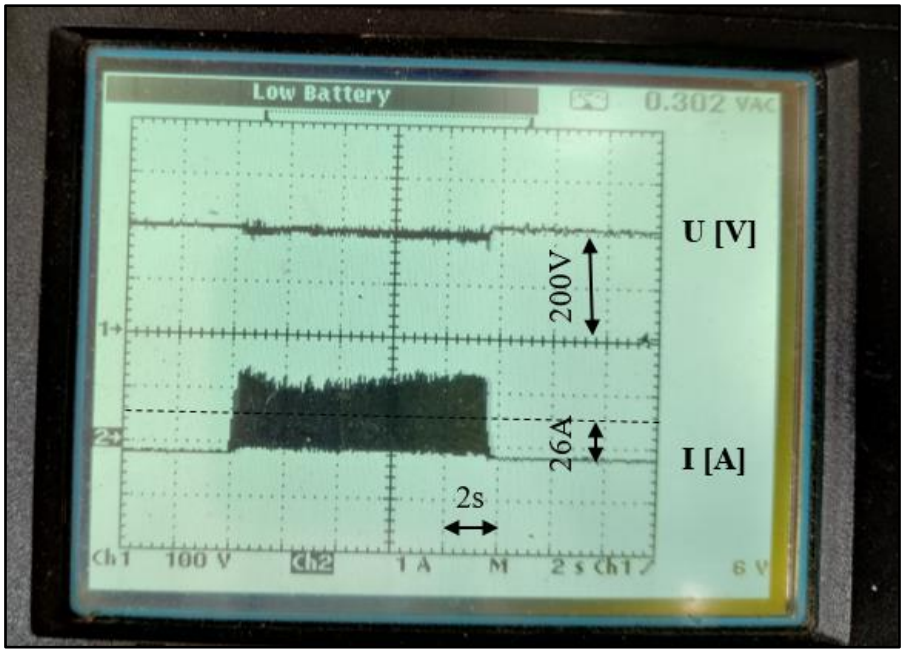


Figura 4.10 Comportarea celulei fotovoltaice funcționând în gol la cuplarea unei sarcini

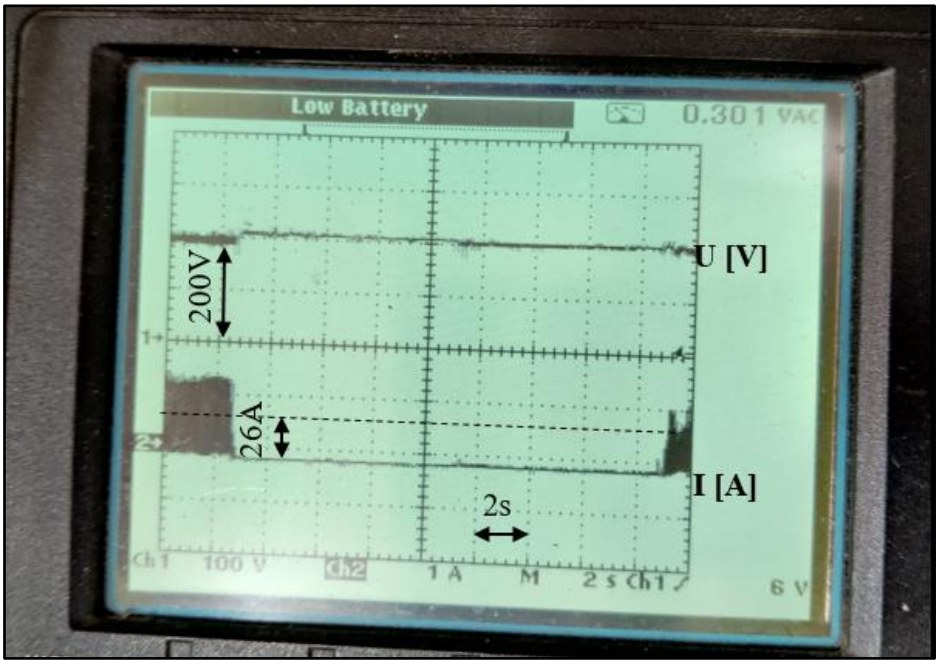


Figura 4.11 Comportarea celulei fotovoltaice funcționând în sarcină la decuplarea acesteia

Caracteristicile U=f(t), I=f(t) din graficele de mai sus, conduc la următoarele concluzii:

a) Am asociat regimurilor de cuplare / decuplare a sarcinii și regimurile dinamice legate de modificarea iradianței pe parcursul unei perioade scurte de timp;
b) Din graficele de mai sus se desprind următoarele:
   - La cuplarea, respectiv decuplarea sarcinii, la valoarea nominală a curentului debitat de panourile fotovoltaice, tensiunea la ieșirea panourilor scade cu circa 10V, sugerând caracterul unei surse de tensiune;
   - Răspunsul sursei este de tip aperiodic, timpul de răspuns fiind de circa 0,4s.
c) Timpul de creștere, respectiv de cădere a tensiunii la decuplare/cuplare sarcină este circa 0,32s;
d) Componenta alternativă, riplul tensiunii la ieșirea centralei fotovoltaice este de aproximativ 0,3V, această valoare fiind nesemnificativă în cadrul sistemului.

4.6 Concluzii

Obținerea randamentelor sporite se bazează foarte mult pe tehnologiile constructive ale panourilor fotovoltaice cu rezistențe parazite minime și de șuntare maxime.

Creșterea eficienței energetice ale sistemelor fotovoltaice se bazează atât pe creșterea randamentelor celulelor fotovoltaice, dar și elementele ajutătoare privind concentarea radiației luminoase pe suprafața panourilor fotovoltaice precum și mentenanța atentă a acestora.

Simularea funcționării celulelor fotovoltaice s-a realizat pornind de la schema echivalentă a acestora, parametrii departajanți fiind cei legați de construcția panourilor fotovoltaice (r_s și r_p).

Măsurătorile efectuate pe o centrală fotovoltaică au validat modelele simulative și au întărit aspectele calitative și cantitative privind soluțiile de creștere a eficienței energetice pentru celulele fotovoltaice, în structura panourilor, respectiv sistemelor fotovoltaice.

5 REGULATOR ÎNCĂRCARE BATERII. ROLUL ȘI LOCUL VARIATOARELOR DE TENSIUNE CONTINUĂ ÎN SISTEMELE FOTOVOLTAICE.

5.1 Generalități.

Regulatorul de încărcare al bateriei este din punct de vedere constructiv un convertor de tensiune de tip c.c./c.c. și reprezintă "creierul" sistemului, ce asigură: ierarhizarea și siguranța operațiilor pe care trebuie sa le garanteze sistemul de stocare a energie, parametrii solicitați de consumator, corelarea regimurilor de încărcare/descărcare (prin intermediul blocului de control), blocare în cazul unor abateri.

5.2 Soluția tehnică propusă pentru convertorul c.c.-c.c. utilizat în conversia energiei fotovoltaice

Schema electrică a convertorului c.c.-c.c. propus este descrisă în figura 5.1, cu următoarele mențiuni: [11] [12]

- Funcționare convertor într-un singur cadran deoarece fluxul energetic este în totalitate dinspre panourile fotovoltaice spre circuitul de stocare;
- Funcționare în regim $U_{ieșire} > U_{intrare}$ deoarece , valoarea tensiunii la ieșirea panourilor fotovoltaice este inferioară valorii tensiunii de la bornele bateriei de stocare.

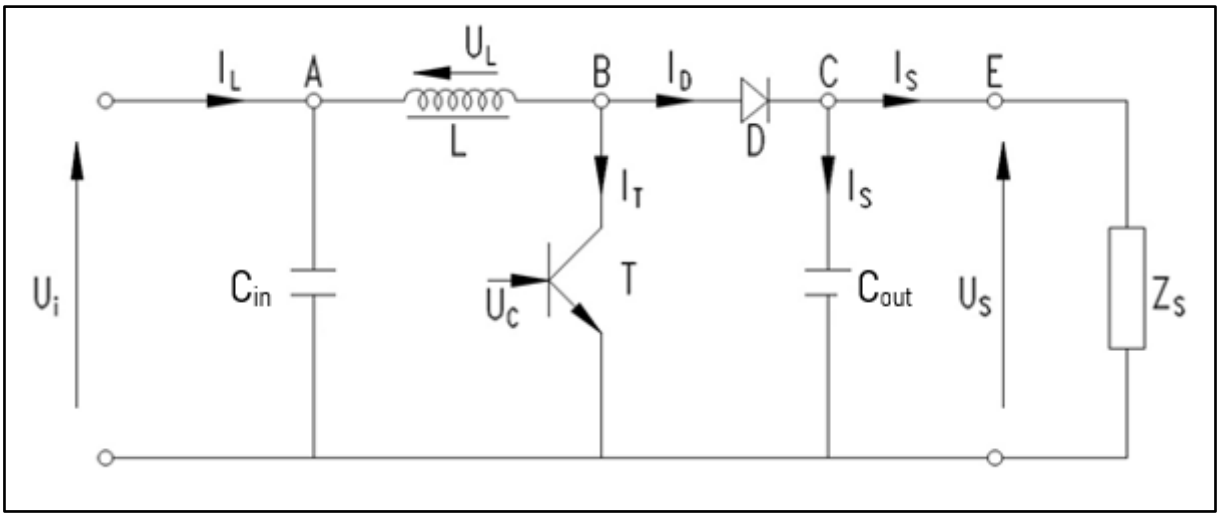


Figura 5.1 Soluție convertor c.c.-c.c.

Pentru o eficiență energetică maximă am dimensionat elementele schemei electrice din figura 5.1, astfel:

- Bobina L, rezistență bobinaj minim, circuit magnetic cu caracteristică B=f(H) aptă să asigure pierderi minime;
- Transistor T de tip IGBT cu frecvența maximă de comutație de cca. 30kHz;
- Condensatoarele C_{in} și C_{out} cu rezistență internă apreciabilă (foarte mare).

5.3 Modelul simulativ al convertorului c.c.-c.c.

În programul PSPICE am simulat funcționarea convertorului c.c.-c.c. prezentat anterior.

După definirea tuturor parametrilor, trecem la realizarea simularilor efective. Schema electrică detaliată prin intermediul căreia s-au realizat simulările este prezentată în figura 5.2, cu mențiunea că tranzistorul de comutație este un MOSFET. În continuare se vor prezenta graficele obținute.

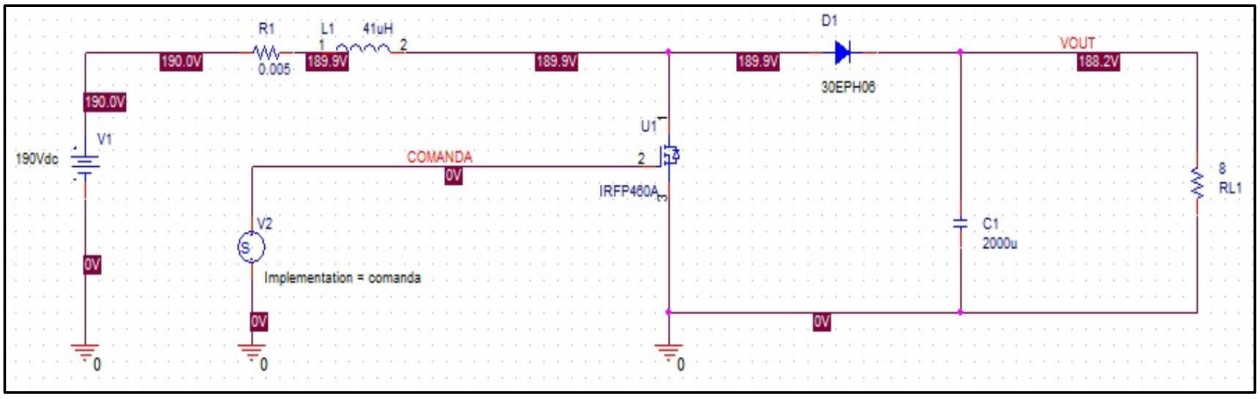


Figura 5.2 Schema electrică simulată

În figura 5.3 prin simulare la o valoare a tensiunii de intrare U_i=190Vcc se obține o variație a tensiunii de ieșire în sarcină în limitele 219, 875V ±0,1%.



Figura 5.3 Rezultat simulare U_i = 190Vcc

În figura 5.4 prin simulare la o valoare a tensiune de intrare U_i=210Vcc se obține o variație a tensiunii de sarcină în limitele 220,435V ±0,1%.

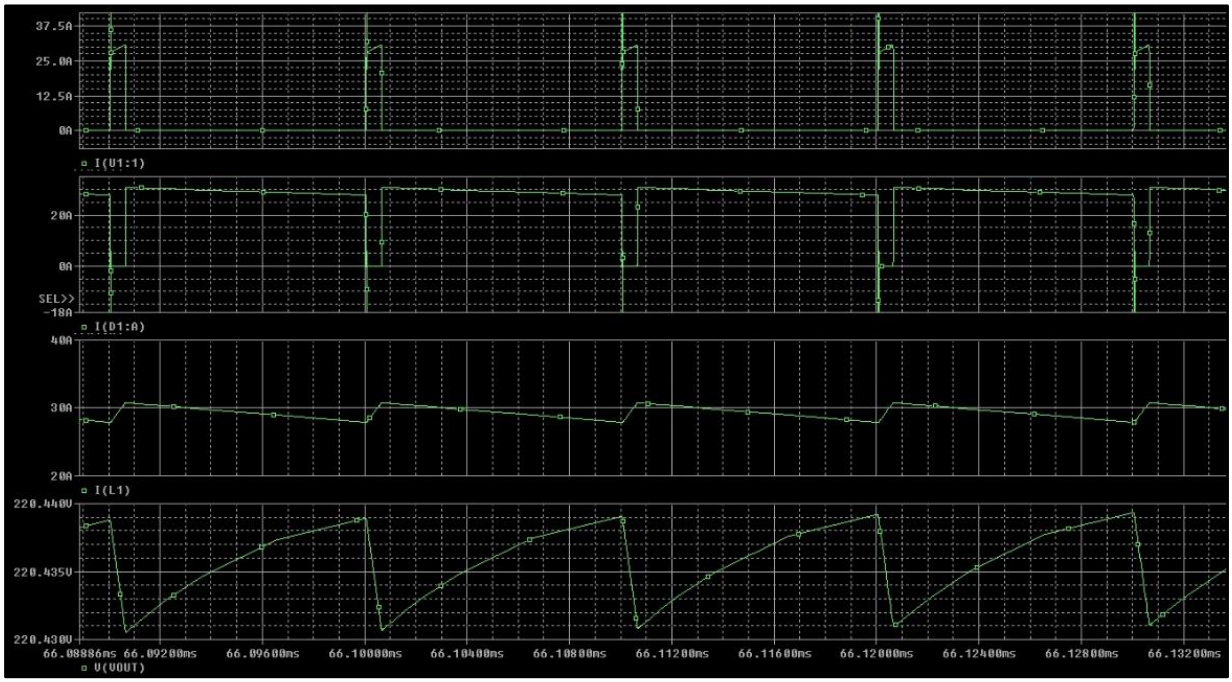


Figura 5.4 Rezultat simulare U_i = 210Vcc

În cadrul simulărilor, în figura 5.3, respectiv figura 5.4 sunt prezentate evoluția în timp în procesul de comutație a tranzistorului T. Pe axa ordonatei sunt reprezentate în ordine următoarele mărimi:

- Curentul prin tranzistorul T, exprimat în amperi;
- Curentul prin dioda D, exprimat în amperi;
- Curentul prin bobina L, exprimat în amperi;
- Tensiunea de ieșire a convertorului, exprimată în volți.

Menționez că abscisa graficului reprezintă mărimea timp exprimată în ns.

Se observă de asemenea, că frecvența de comutație de comutație este:

$$f_c = \frac{1}{T_c} \tag{5.1}$$

Unde:

$T_c = 10^{-8}$s

f_c = 100MHz, frecvența de comutație caracteristică unui tranzistor de tip MOSFET

Putem concluziona că prin alegerea convenabilă a bobinei L, vom putea obține o variație convenabilă a tensiunii de ieșire U_s de 2-3% la o variație mult mai largă a tensiunii de intrare, U_i.

5.4 Rezultate experimentale

Măsurătorile efectuate pe centrala fotovoltaică din dotarea ICPE ACTEL, folosind convertorul c.c.-c.c. U_1 producție ICPE ACTEL, conform figurii 5.5 și o sarcină de circa 8Ω, se regăsesc în tabelul 5.1.

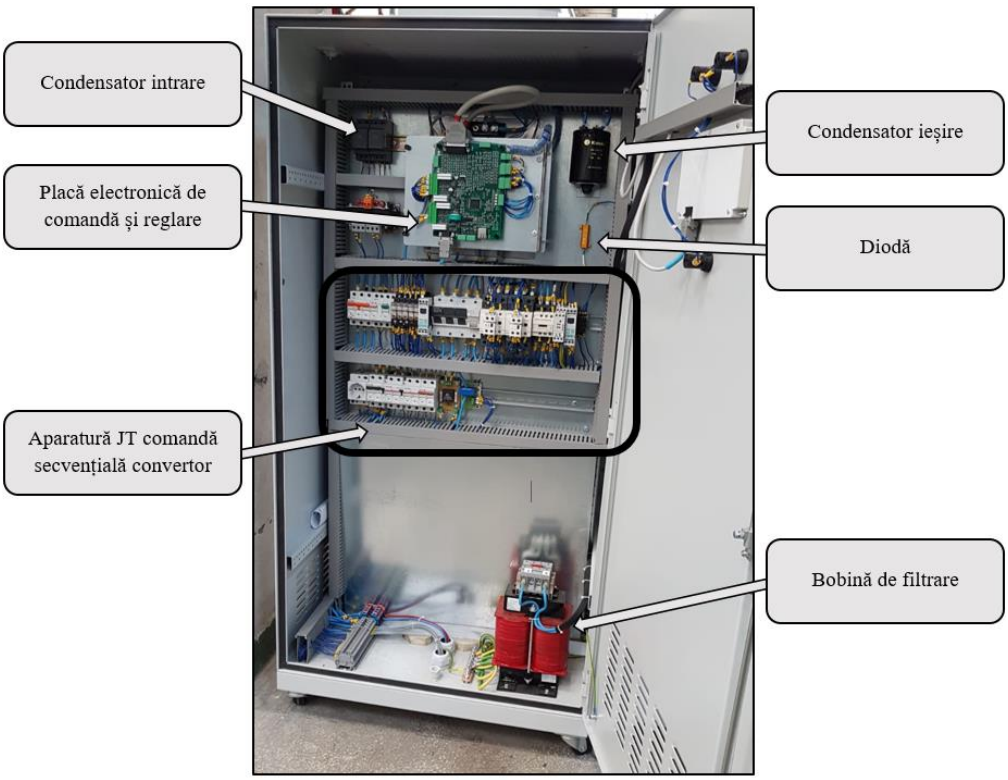


Figura 5.5 Convertor c.c.-c.c.

Tabelul 5.1 Rezultate experimentale

Nr. Crt.	Tensiune intrare U_i [Vcc]	Tensiune ieșire U_s [Vcc]
1.	190,0	219,6
2.	203,0	219,8
3.	213,5	219,9
4.	215,7	220,1
5.	217,0	220,1
6.	219,0	220,2
7.	221,0	220,2

În figura 5.6 este prezentată variația tensiunii de ieșire U_s funcție de tensiunea de intrare U_i în convertorul cc-cc.

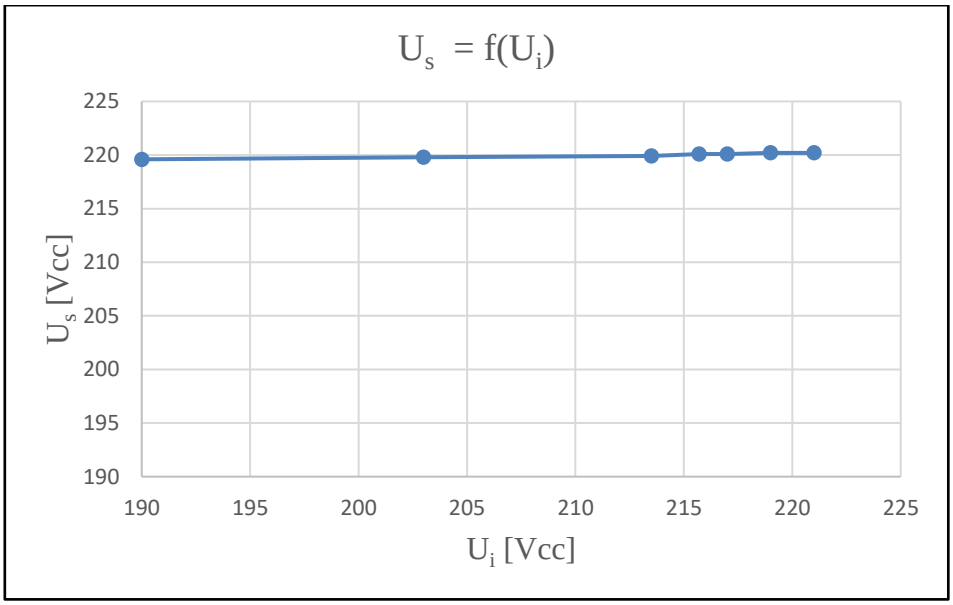


Figura 5.6 Variația tensiunii de ieșire funcție de tensiunea de intrare

Se observă din tabelul 5.1, respectiv din graficul $U_s=f(U_i)$ prezentat în figura 5.6, că variatorul c.c.-c.c. utilizat la o sarcină apropiată de valoarea nominală își demonstrează:

- Caracterul stabilizator al tensiunii de ieșire care se aplică pe circuitul bateriei de stocare, respectiv al convertorului c.c.-c.a.;
- Valorile tensiunii de ieșire U_s la sarcina de aproximativ 8kΩ, ne arată că punctul de funcționare (U_s, I_s) este acela al puterii maxime dezvoltate de panourile fotovoltaice;
- Valorile măsurate ale U_s s-au efectuat în lipsa bateriei de acumulatori, cel mai bun filtru pentru orice sursă de curent continuu și se apropie foarte mult de valorile din modelele simulate.

5.5 Concluzii

În capitolul de față pe linia conversiei energiei fotovoltaice în energie electrică am tratat aspectele legate de:

- Necesitatea utilizării convertoarelor c.c.-c.c. pentru asigurarea unei tensiuni stabilizate la ieșire, strict necesară pentru circuitul bateriei de stocare și pentru conversia c.c.-c.a.;
- Alegerea soluției tehnice care să asigure funcționarea conversiei energetice fotovoltaică-energie electrică în condiții de eficiență energetică maximă;
- Simularea funcționării convertorului c.c.-c.c. ales în regim de sarcină apropiată de condițiile nominale pentru două situații de variație a tensiunii de intrare;
- Măsurători parametri urmăriți în caracterizarea funcționării convertorului c.c.-c.c. și anume tensiunea de ieșire în condiții de sarcină cvasinominală și verificarea punctului static de funcționare la putere maximă;
- Validarea rezultatelor regimurilor simulate de către măsurătorile experimentale realizate pe o centrală fotovoltaică din dotarea firmei în care îmi desfășor activitatea.

6 STOCAREA ENERGIEI PRODUSE DE CENTRALE FOTOVOLTAICE. PRINCIPII. ELEMENTE DE STOCARE. EFICIENȚA STOCĂRII.

6.1 Generalități

Pornind de la managementul producerii energiei electrice și având în vedere surplusul de energie electrică produsă, în condițiile în care ne confruntăm cu un declin al consumului atât în domeniul industrial cât și în cel casnic, principala preocupare este stocarea excedentului de energie cu scopul de a fi utilizat atunci când este necesar.

Stocarea energiei constituie un element important în seria de funcții pe care trebuie să le asigure o rețea inteligentă. Electricitatea prezintă particularitatea că fără a prevedea un sistem de stocare, ea trebuie consumată în momentul în care se produce, astfel că, fără stocare energia generată trebuie să fie egală cu enegia consumată. [10] [13]

6.2 Tipuri de baterii de acumulatoare utilizate în stocarea energiei electrice

În cazul sistemelor de stocarea cea mai utilizată soluție este cea bazată pe baterii de acumulatoare, care în cadrul acestor aplicații sunt de construcție specială și sunt caracterizate prin numărul mare de cicluri de încărcare – descărcare și de lipsa operațiilor de mentenanță.

Cele mai des întâlnite tipuri de baterii pentru proiectele de stocare a energiei electrice sunt:

1. Plumb (Pb);
2. Nichel – cadmiu (NiCd);
3. Nichel – metal (NiMH);
4. Lithium – ion (Li-ion).

Fiecare tehnologie prezintă avantaje și dezavantaje iar performanțele acestora sunt influențate de mai mulți factori, dintre care: capacitatea de stocare, starea de încărcare, temperatura, ciclurile de încărcare – descărcare, durata de viață. [14-25]

6.3 Dimensionarea bateriilor de acumulatoare

Dimensionarea capacității bateriei de acumulatoare se realizează în funcție de necesarul zilnic de consum și autonomia energetică.

Autonomia energetică se definește prin numărul de zile fără aport solar, pe durata cărora bateria trebuie să furnizeze energie pentru alimentarea sarcinii. [14-27]

$$Capacitate\ baterie = \frac{\sum_{k=1}^{n} L_k\ x\ t_k}{Ubat}, \tag{6.1}$$

unde,

C_k = consumul necesar [kWh]

t_k = timpul necesar furnizării de energie [ore]

U_{bat} = tensiunea nominală a bateriei [V]

Cea de-a doua etapă în procesul de dimensionare a unei baterii este stablirea numărului de elemente din componența acesteia, care depinde strict de tensiunea necesară și de capacitatea bateriei.

Construcția bacului de baterii se realizează fie din conexiuni serie, paralel sau serie-paralel. Conectarea acumulatorilor în serie permite mărirea tensiunii pe care o generează bateria. Numărul de elemente, notat cu N, se stabilește astfel:

$$N = \frac{U_n}{u_n} \ , \tag{6.2}$$

unde:
U_n = tensiunea nominală a consumatorului
u_n = tensiunea nominală a unui element

Conectarea bateriilor în paralel, spre deosebire de legarea în serie, contribuie la obținerea unui capacități mai mari. Formula de calcul pentru numărul de elemente necesar este:

$$N = \frac{C_t}{C_{elem}} \ , \tag{6.3}$$

unde:
C_t = capacitatea necesară a bancului de baterii
C_{elem} = capacitatea unui element

6.4 Rezultate experimentale privind dimensionarea și funcționarea bateriei de acumulatoare din centrala fotovoltaică ICPE ACTEL

Măsurătorile experimentale s-au realizat pe bateria tip UCG250-12, formată din 18 celule 250Ah, 12V fiecare, prin intermediul căreia am evidențiat experimental trei dintre caracteristicile principale ale bateriei în ceea ce privește caracterizarea fenomenului de stocare:

- Dependența $C_{Ah} = f(t_{descărcare})$, descărcarea se realizează la curent constant timp de zece ore; tabelul 6.1 și figura 6.1;
- Dependența $C_{Ah} = f(I_{descărcare})$, descărcarea se realizează într-un timp de două ore; tabelul 6.2 și figura 6.2;
- Dependența $U_{baterie} = f(t_{descărcare})$, descărcarea se realizează la curent constant; tabelul 6.3 și figura 6.3;

Tabelul 6.1 – Dependența capacității bateriei în funcție de timpul de descărcare

Nr. Crt.	$I_{descărcare}$ [A]	Capacitate baterie [Ah]	$t_{descărcare}$ [h]
1.	25,00	250,00	0
2.	25,00	241,45	2
3.	25,00	232,93	4
4.	25,00	224,43	6
5.	25,00	215,90	8
6.	25,00	207,40	10

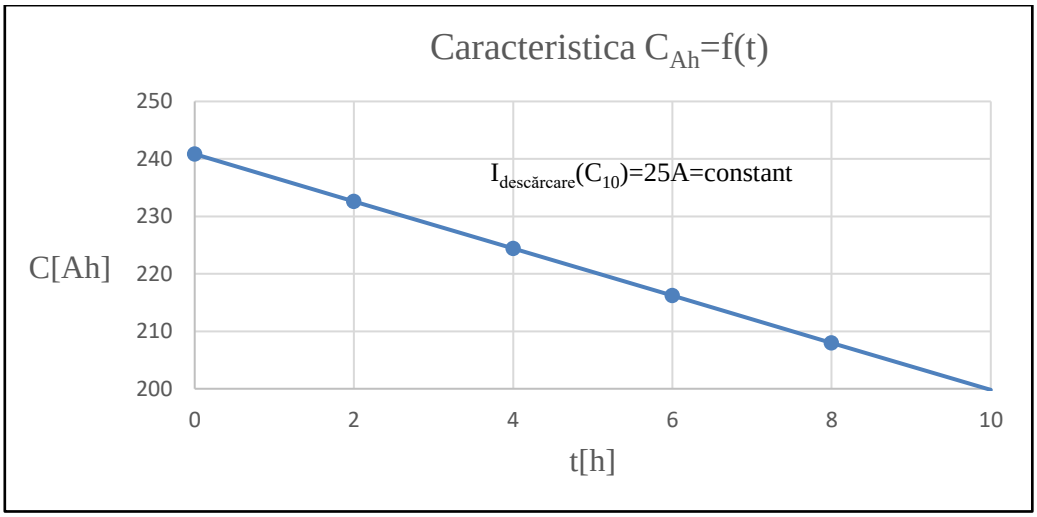


Figura 6.1 Dependența C_{Ah} funcție de timp

Tabelul 6.2 – Dependența capacității bateriei în funcție de curentul de descărcare

Nr. Crt.	Capacitate baterie [Ah]	$I_{descărcare}$ [A]	Timp descărcare [h]
1.	250,00	0,00	2
2.	230,80	22,50	2
3.	198,00	55,00	2
4.	186,00	82,50	2
5.	180,00	110,00	2

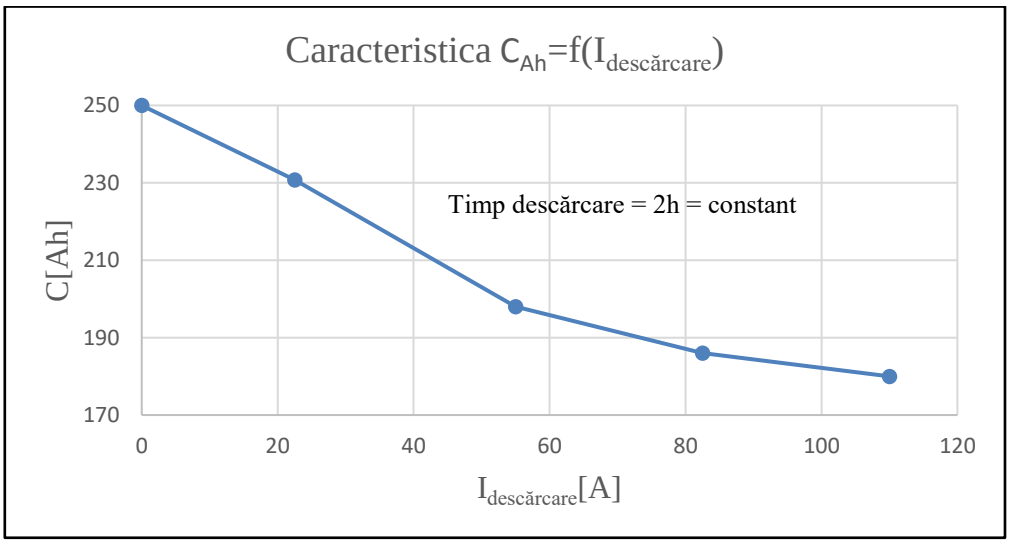


Figura 6.2 Dependența capacității C_{Ah} funcție de curentul de descărcare

Tabelul 6.3 – Dependența tensiunii bateriei de acumulatoare în funcție de timpul de descărcare

Nr. Crt.	$I_{descărcare}$ [A]	Tensiune baterie [V]	$t_{descărcare}$ [h]
1.	25,00	242,64	0
2.	25,00	225,22	2
3.	25,00	216,36	4
4.	25,00	209,16	6
5.	25,00	202,86	8
6.	25,00	195,48	10

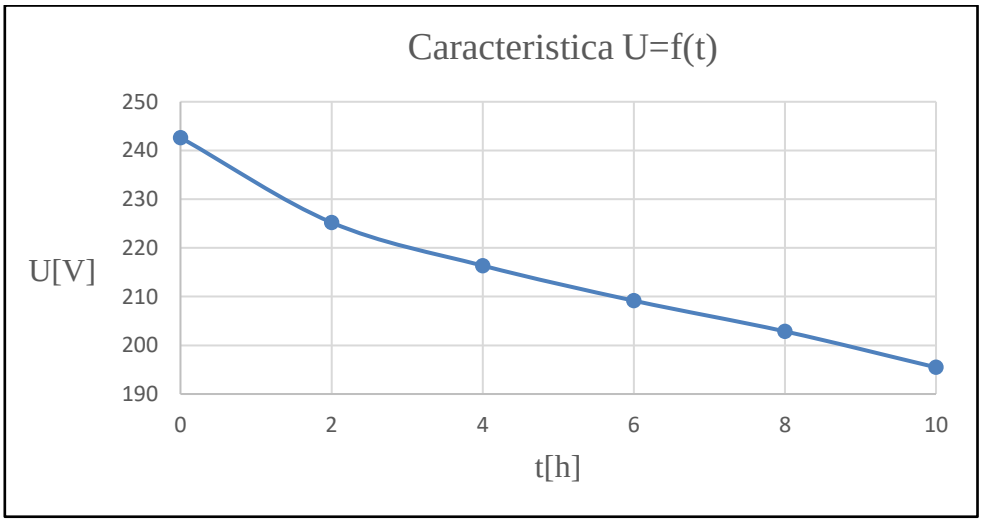


Figura 6.3 Dependența tensiunii bateriei funcție de timp

Din examinarea celor trei caracteristici rezultă următoarele:

- Caracteristicile au aluri asemănătoare în ceea ce privește dependența capacității funcție de timp la curent de descărcare constant în regim C10, respectiv funcție de curentul de descărcare atunci când timpul de descărcare este constant, respectiv dependența tensiunii la bornele bateriei funcție de timpul de descărcare la curent de descărcare constant;
- Pierderea însemnată a capacității unei baterii de acumulatoare are loc la creșterea importantă a curentului de descărcare;
- Indiferent de simetrie este foarte important în procesul de descărcare să nu se depășească în jos valoarea tensiunii 1.8V/element, dat fiind faptul că procesele electrochimice la nivelul bateriei în acest caz pot fi ireversibile;
- În procesul de stocare este foarte important că acesta să se producă sub prezența protecțiilor tensiune-curent-timp;

6.5 Simularea și modelarea matematică a bateriilor de acumulatoare utilizate în stocarea energiei electrice produse de surse regenerabile

Experimental, pentru evidențierea dependenței dintre tensiunea la bornele bateriei în circuit deschis și starea de încărcare, respectiv starea de descărcare relativă a acesteia am folosit bateria de acumulatoare de 250Ah, 220Vcc (18 baterii de 12Vcc fiecare).

Rezultatele experimentale se regăsesc în tabelul 6.4 și în graficele din figurile 6.4 și 6.5.

Tabelul 6.4

Nr. Crt.	Starea de încărcare [%]	Tensiunea la borne [V]	
		Regim încărcare	Regim descărcare
1	0	208,80	208,80
2	20	213,41	213,37
3	40	218,03	217,94
4	60	222,62	222,52
5	80	227,23	227,09
6	100	231,84	231,66

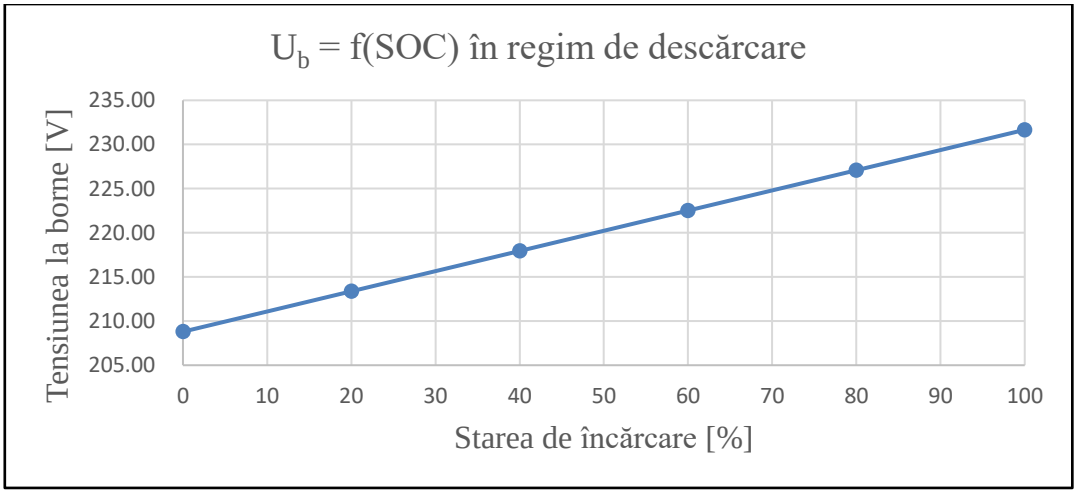


Figura 6.4 Dependența U_b = f(SOC) la descărcarea bateriei de acumulatoare

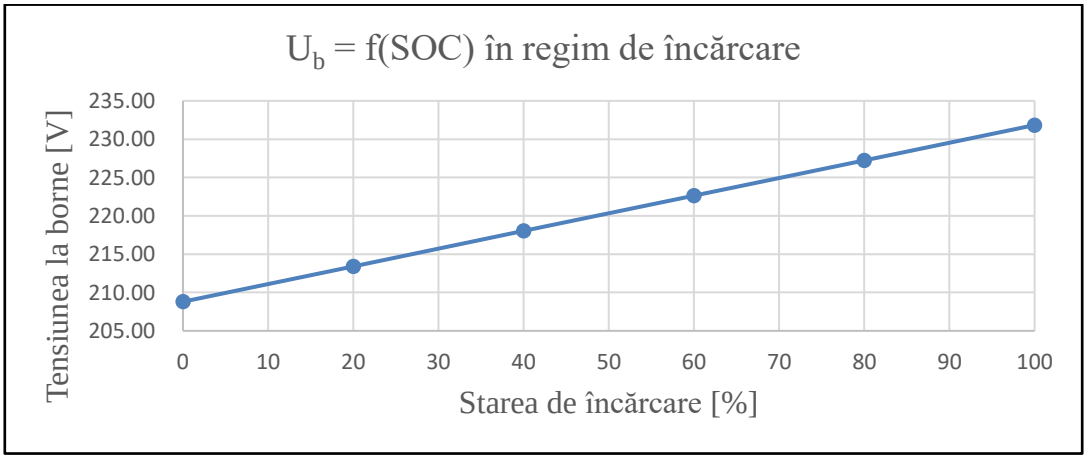


Figura 6.5 Dependența U_b = f(SOC) la încărcarea bateriei de acumulatoare

După cum se poate observa din graficele de mai sus, atât în regimul de încărcare, cât și în regimul de descărcare, tensiunea de la bornele bateriei este direct proporțională cu nivelul de încărcare al acesteia, așadar, în regim de descărcare tensiunea bateriei scade odată cu reducerea nivelului de încărcare și crește odată cu încărcarea bateriei în cazul regimului de încărcare.

6.6 Concluzii

Dintre toate tipurile de baterii existente pe piață, pentru aplicații de stocare în sisteme fotovoltaice, s-au remarcat baterii cu tehnologie Pb, NiCd, NiMH si Li-ion.

Bateriile cu plumb sunt cele mai utilizate baterii în sistemele de stocare a energiei regenerabile având avantajul prețului redus, maturitate tehnologică, rată de autodescărcare mică, fiabilitate, număr mare de cicluri de încărcări-descărcări. Totuși, acest tip de baterii se confruntă și cu o serie de dezavantaje ca densitate specifică redusă și impact negativ asupra mediului.

Bateriile nichel-cadmiu au ca principal avantaj durata de viață mare de până la 1500 cicluri, urmată de timpul rapid de încărcare și de posibilitatea reciclării. Dezavantajele acestei soluții constă în gradul de autodescărcare redus, energia specifică scăzută și prezența efectului de memorie.

Bateriile NiMH în comparație cu bateriile NiCd prezintă o energie specifică mai mare, sunt prietenoase cu mediul înconjurător dar numărul de cicluri de încărcare – descărcare este considerabil mai mic.

Bateriile cu tehnologie Li-ion sunt caracterizate de valoarea superioară a tensiunii pe celulă, de cea mai mare energie specifică, de capacitatea de a suporta un număr mare de cicluri de încărcare – descărcare însă, principalul lor dezavantaj este costul ridicat de achiziție.

Obiectivele modelărilor sunt legate de obținerea unor stocări energetice optime, atât din punct de vedere a eficienței energetice cât și din punct de vedere al minimizării costurilor.

Modelarea bateriei și-a propus teste și măsurători experimentale pentru definirea parametrilor ce caracterizează stocarea energetică.

7 UTILIZAREA CONVERTOARELOR STATICE ÎN SISTEMELE DE CONVERSIE A ENERGIEI REGENERABILE. PRINCIPII. DEFINIȚII. CLASIFICĂRI.

7.1 Generalități. Rolul convertoarelor statice în sistemele fotovoltaice

Convertoarele statice de putere reprezintă echipamente energetice complexe ce realizează conversia statică a energiei electrice, modificând parametrii energiei electrice generate de sursă, precum valorile tensiunilor şi curenţilor, frecvenţa, numărul de faze, etc., ținând cont de cerinţele impuse de receptor. De asemenea, convertoarele statice de putere asigură conversia unor cantități importante de energie.

Convertoarele sunt amplasate între sursa de energie şi consumator, având pentru sursa de energie rol de receptor și rol de sursă de energie pentru sarcină.

7.2 Soluția tehnică propusă pentru convertorul cc-ca utilizat în conversia energiei fotovoltaice

Pentru centrala fotovoltaică din dotarea ICPE ACTEL SA s-a ales pentru convertizorul cc-ca o soluție de invertor trifazat de tensiune, cu comanda PWM, bidirecțional, cu ventile de tip transistor IGBT, a cărui schemă bloc este exemplificată în figura 7.1.

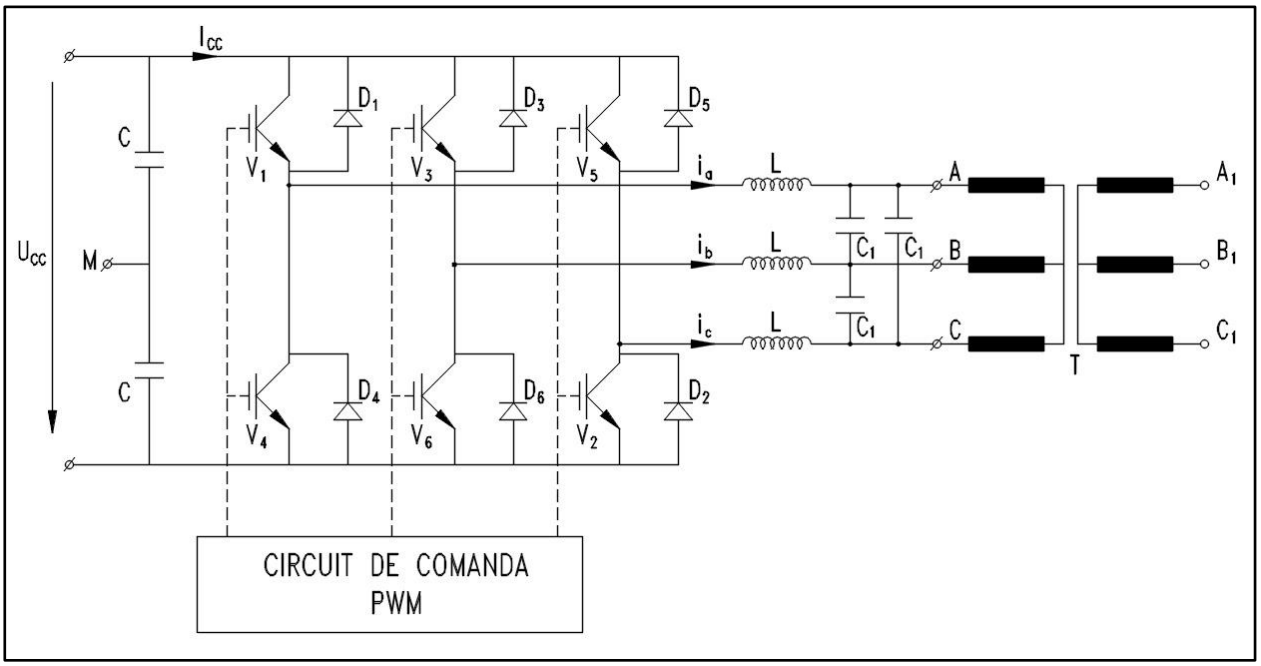


Figura 7.1 Schema electrică de principiu a unui invertor cu comandă PWM

Deși s-ar putea realiza acest tip de invertor trifazat cu 3 invertoare monofazate, nu am ales această soluție pentru că:

- Diferitele sarcini monofazate ar produce o asimetrie a puterilor pe fiecare fază și astfel am putea avea o componentă homopolară importantă;
- S-ar folosi un număr dublu de ventile (tranzistoare de putere);
- Nu întotdeauna avem acces la nulul sarcinilor trifazate.

Am ales varianta unui invertor cu 6 ventile $v_1 \div v_6$ în punte Graetz cu comanda PWM.

Se observă din figura 7.1 că tensiunea U_{AM} are amplitudinea $\frac{U_{cc}}{2}$ când este în conducție tranzistorul v_1, respectiv $-\frac{U_{cc}}{2}$ când se află în conducție tranzistorul v_4.

De aici rezultă că:

$$U_{AB} = U_{AM} - U_{BM} \quad (7.1)$$

$$U_{BC} = U_{BM} - U_{CM} \quad (7.2)$$

$$U_{CA} = U_{CM} - U_{AM} \quad (7.3)$$

7.2.1 Principiul de comandă PWM a invertoarelor trifazate

Comanda convertoarelor cc-ca se bazează pe tehnica modulării în lațime a impulsurilor de comandă a tranzistoarelor de tip IGBT, numită în literatura de specialitate PWM (Pulse Width Modulation). Principiul generării impulsurilor de comandă PWM constă în obținerea unor impulsuri de amplitudine fixă și lățime variabilă, funcție de o tensiune de comandă variabilă, principiu prezentat în figura 7.2.

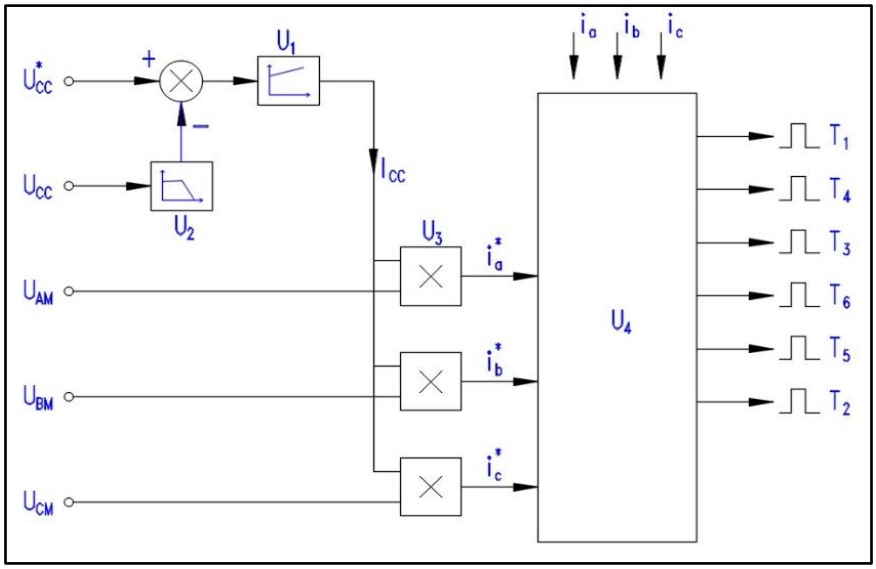


Figura 7.2 Generarea impulsurilor PWM pentru un invertor trifazat

7.2.2 Calculul de dimensionare al convertorului cc-ca utilizat în centrala fotovoltaică

Valoarea puterii instalate a unui grup fotovoltaic este în concordanță cu puterea nominală de ieșire a invertorului, definindu-se ca puterea pe care invertorul este capabil să o transmită continuu în rețeaua națională luând în calcul temperatura de 25°C.

De regulă, la dimensionarea invertorului se ține cont ca puterea de intrare să fie cu 5% mai mare decât puterea normată a acestuia. Referitor la alegerea puterii nominale a invertorului, acesta trebuie să fie ±20% din puterea normată a panourilor fotovoltaice.

Raportul dintre cele două puteri reprezintă factorul de dimensionare a invertorului k_{inv}:

$$k_{inv} = \frac{P_{PV}}{P_{PV\ inv}} = [0{,}83 \ldots 1{,}25] \quad (7.4)$$

Unde:

P_{PV} = Puterea normată a panourilor fotoelectrice la STC;

$P_{PV\ inv}$ = Puterea normată a invertorului.

În procesul de dimensionare a invertorului trebuie să se ia în considerare și asigurarea factorului de putere de minim 0,9. Dacă soluția tehnică privind structura instalației prevede surse separate pentru compensarea puterii reactive, alegerea invertorului nu depinde de necesarul de putere reactivă. În caz contrar, puterea nominală a invertorului trebuie astfel dimensionată încât să reprezinte 110% din puterea normată a panourilor.

În funcție de puterea instalației se poate opta pentru surse monofazate sau trifazate. Pentru puteri mai mari de 5kW este obligatorie utilizarea soluției trifazate care are ca elemente constructive următoarele:

- dispozitiv aferent controlului tensiunii;
- transformator de rețea;
- punte invertoare comandată PWM;
- dispozitiv aferent identificării punctului maxim de putere;
- circuit monitorizare rețea publică;

7.3 Modelul simulativ al convertorului cc-ca

Schema de principiu utilizată în simularea teoretică a unui convertor cc-ca este cea prezentată în figura 7.1, iar cu o comanda adecvată a IGBT-urilor, poate lucra astfel:

- În regim redresor: transferul de putere se face dinspre partea de curent alternativ spre curent continuu asigurându-se un regim sinusoidal pentru curenții de fază ia, ib, ic și un factor de putere egal cu 1;
- În regim de invertor: transferul de putere se face dinspre partea de curent continuu spre partea curent alternativ asigurându-se un regim sinusoidal pentru curenții de fază ia, ib, ic și un factor de putere egal cu 1.

Ne propunem în continuare să analizam regimul invertor. În această situație partea de curent continuu se alimentează cu o tensiune constantă, Vcc, partea de curent alternativ se conectează la sistemul sinusoidal trifazat ea, eb, ec. Partea de curent alternativ poate fi și primarul unui transformator trifazat al cărui secundar să fie conectat la o rețea trifazată.

Schema prezentată în figura 7.1, inclusiv partea de regulator și generare a semnalelor de comandă, a fost simulată în SIMULINK (MATLAB).

Simularea s-a realizat folosind o serie de module din biblioteca SIMULINK și unele create special pentru această simulare.

Fișierul de simulare conține următoarele blocuri:

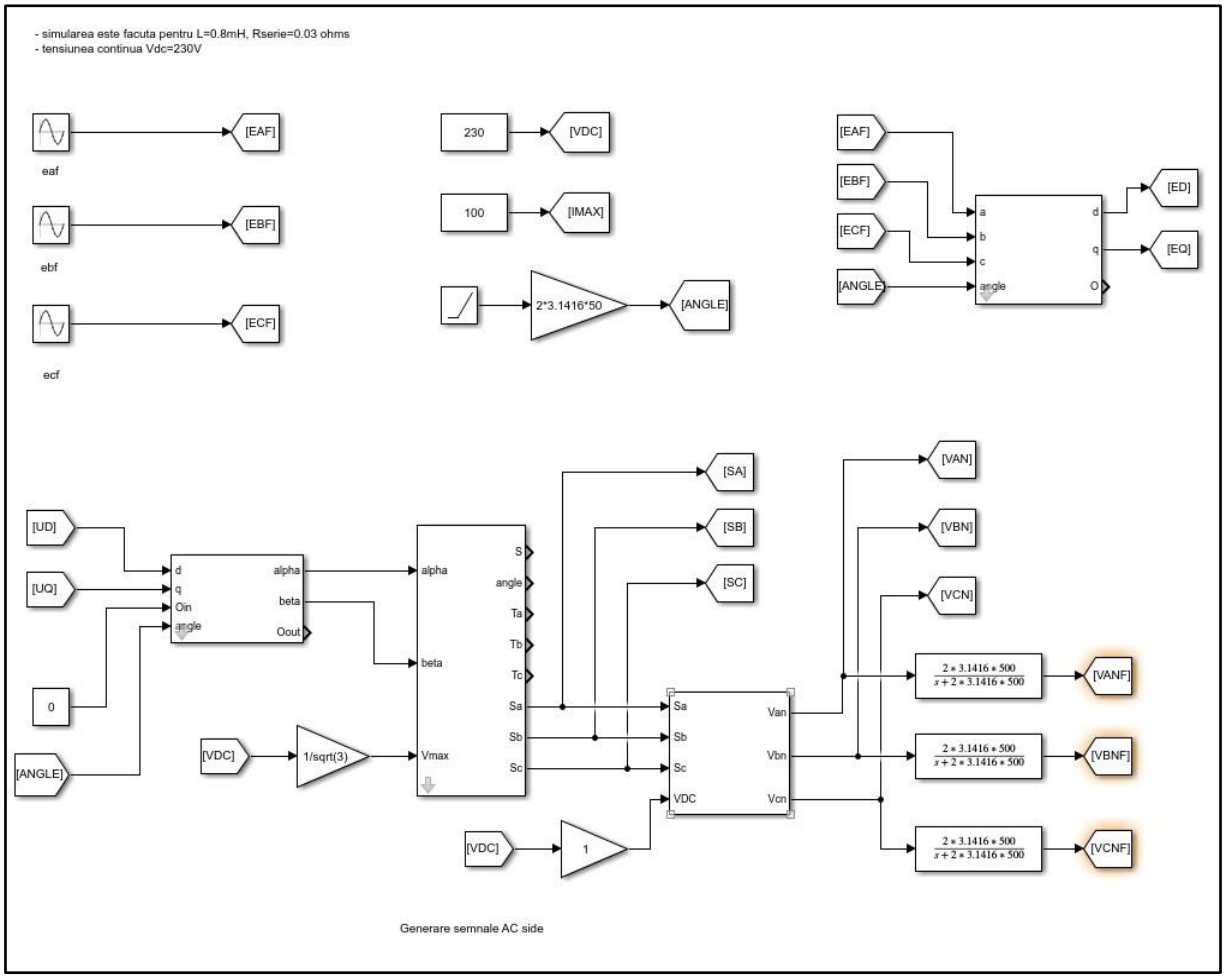


Figura 7.3 Generare semnale AC side

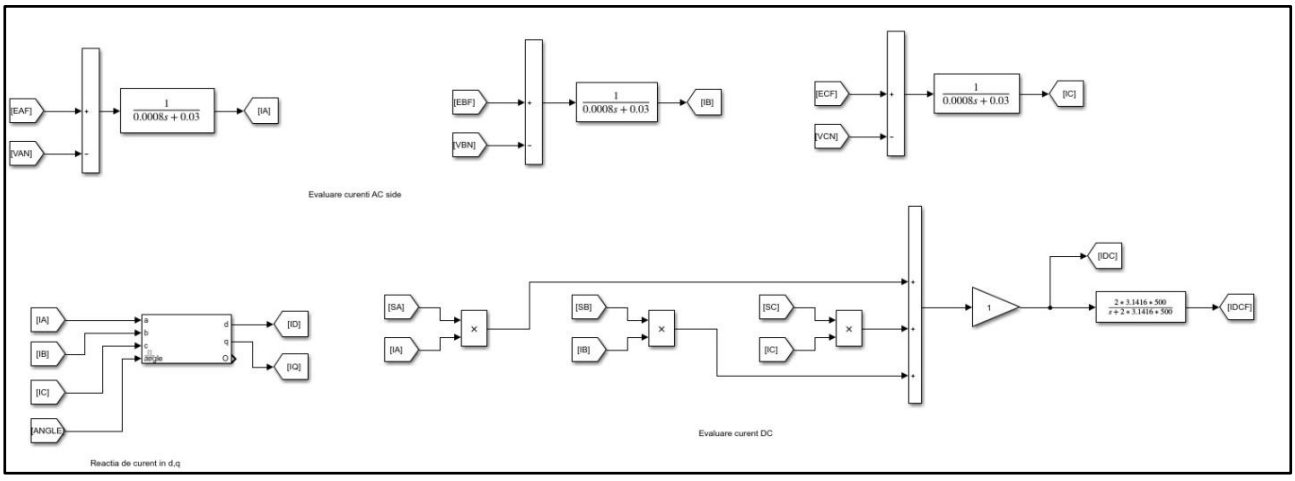


Figura 7.4 Evaluare curenți partea AC și DC

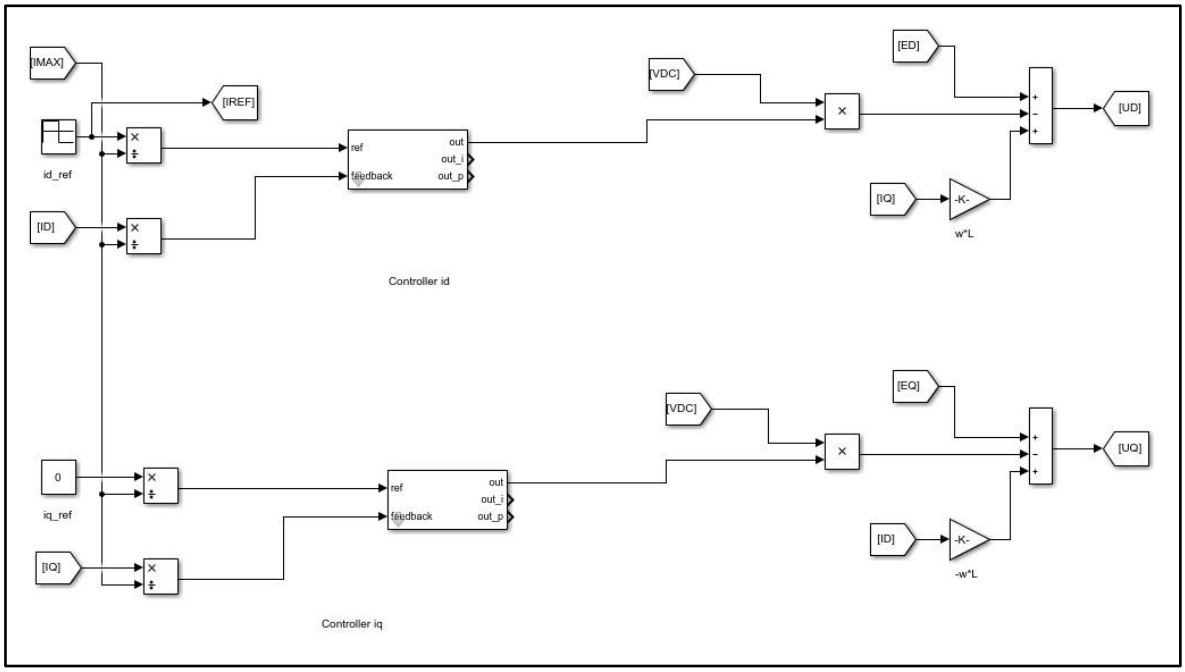


Figura 7.5 Regulatoarele de curent

Rezultatele simulării sunt prezentate în figura 7.6.

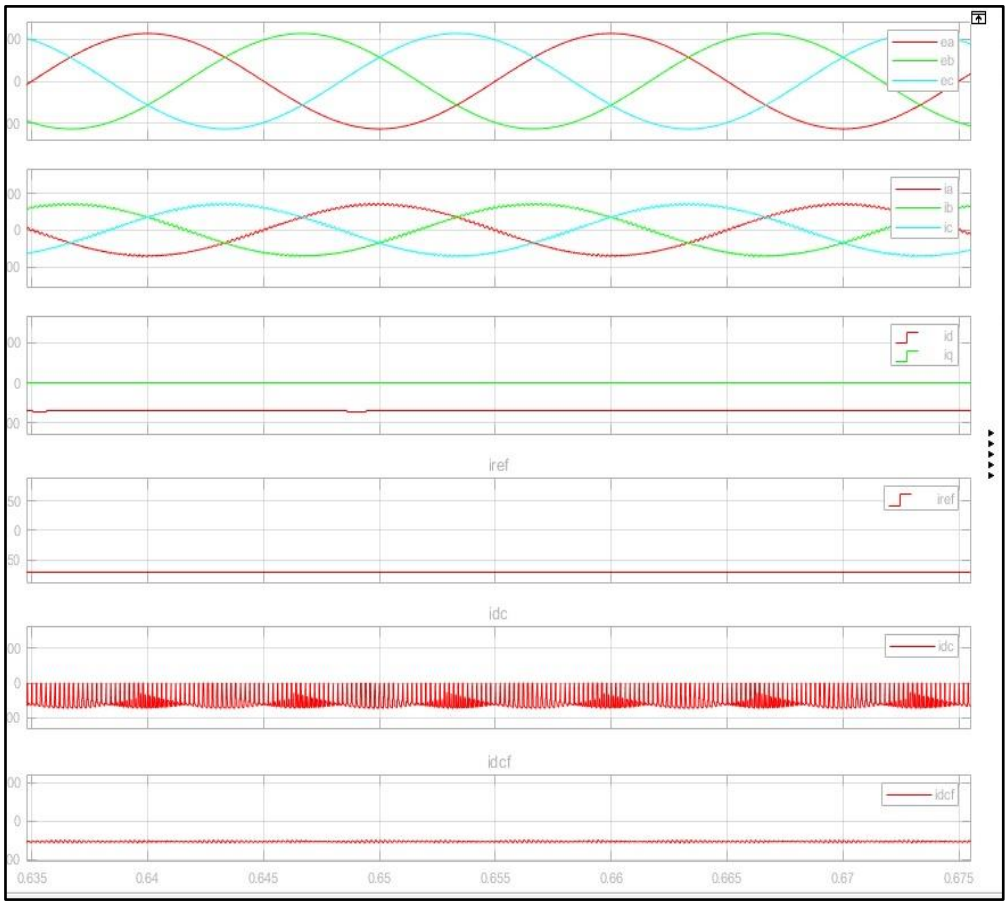


Figura 7.6 Rezultate simulare

În figura de mai sus sunt reprezentate următoarele mărimi:

- În primul grafic tensiunile de faza ea, eb, ec. Valoarea efectivă a acestora este 80V;
- În al doilea grafic curenții de fază ia, ib, ic. Valoarea efectivă a acestora este 49A; Curenții de fază, după cum se poate observa, sunt în antifază cu tensiunile de fază (transferul de putere este dinspre partea de curent continuu spre partea de curent alternativ);
- În al treilea grafic sunt reprezentate componentele id, iq ale curenților din partea de AC (reglarea curentului în partea AC se face cu aceste componente care se obțin prin transformarea Park aplicată componentelor ia, ib, ic). Se observă că id=-70 A, iq=0.06A, ceea ce corespunde unei valori de vârf a curenților de fază egală cu 70A. Semnul minus al lui id și valoarea foarte apropiată de zero a lui iq indică un factor de putere egal cu 1;
- În al patrulea grafic este reprezentată referința curentului pentru regulatorul id (egală cu -70A);
- În al cincilea grafic este reprezentat curentul absorbit de la sursa de curent continu. Este un curent pulsatoriu cu valori cuprinse între 0...-73A și o frecvență de 5kHz (frecvența de chopare a invertorului);
- În al șaselea grafic este reprezentat curentul mediu din partea de curent continuu, egal cu -52A. Semnul minus indică faptul că transferul de putere este dinspre partea de curent continuu spre partea de curent alternativ.

7.4 Rezultate experimentale

Măsurătorile pentru evidențierea rezultatelor experimentale s-au făcut pe convertorul cc-ca producție ICPE ACTEL, tip INV12_220/400, componentă a sistemului fotovoltaic din dotarea societății. Menționez că acest convertor este din punct de vedere constructiv sub forma unui dulap metalic și este prezentat în figura 7.8 de mai jos.

Valorile obținute în urma măsurătorilor sunt prezentate în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1

Nr. Crt.	U_{cc} [V]	I_{cc} [A]	U_{A_1N} [V]	U_{B_1N} [V]	U_{C_1N} [V]	$U_{A_1B_1}$ [V]	$U_{B_1C_1}$ [V]	$U_{C_1A_1}$ [V]
1	235,30	0	245,90	245,80	245,90	425,40	425,23	425,40
2	231,50	51,84	245,10	245,00	245,10	424,05	423,85	424,05
3	229,50	52,28	244,70	244,60	244,80	423,33	423,16	423,50
4	225,30	53,26	237,90	237,70	237,80	411,56	411,22	411,39
5	223,30	53,74	234,80	234,60	234,70	406,20	405,85	406,03

O schemă bloc relevantă pentru exemplificarea măsurătorilor prezentate în tabelul 7.1 este reprezentată în figura de mai jos:

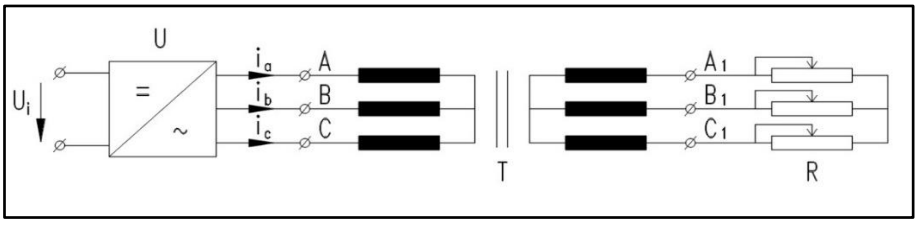


Figura 7.7 Schemă electrică bloc invertor trifazat

În figura 7.7 simbolul R reprezintă rezistența variabilă ce are o valoare cuprinsă între 0÷8Ω, 60A.

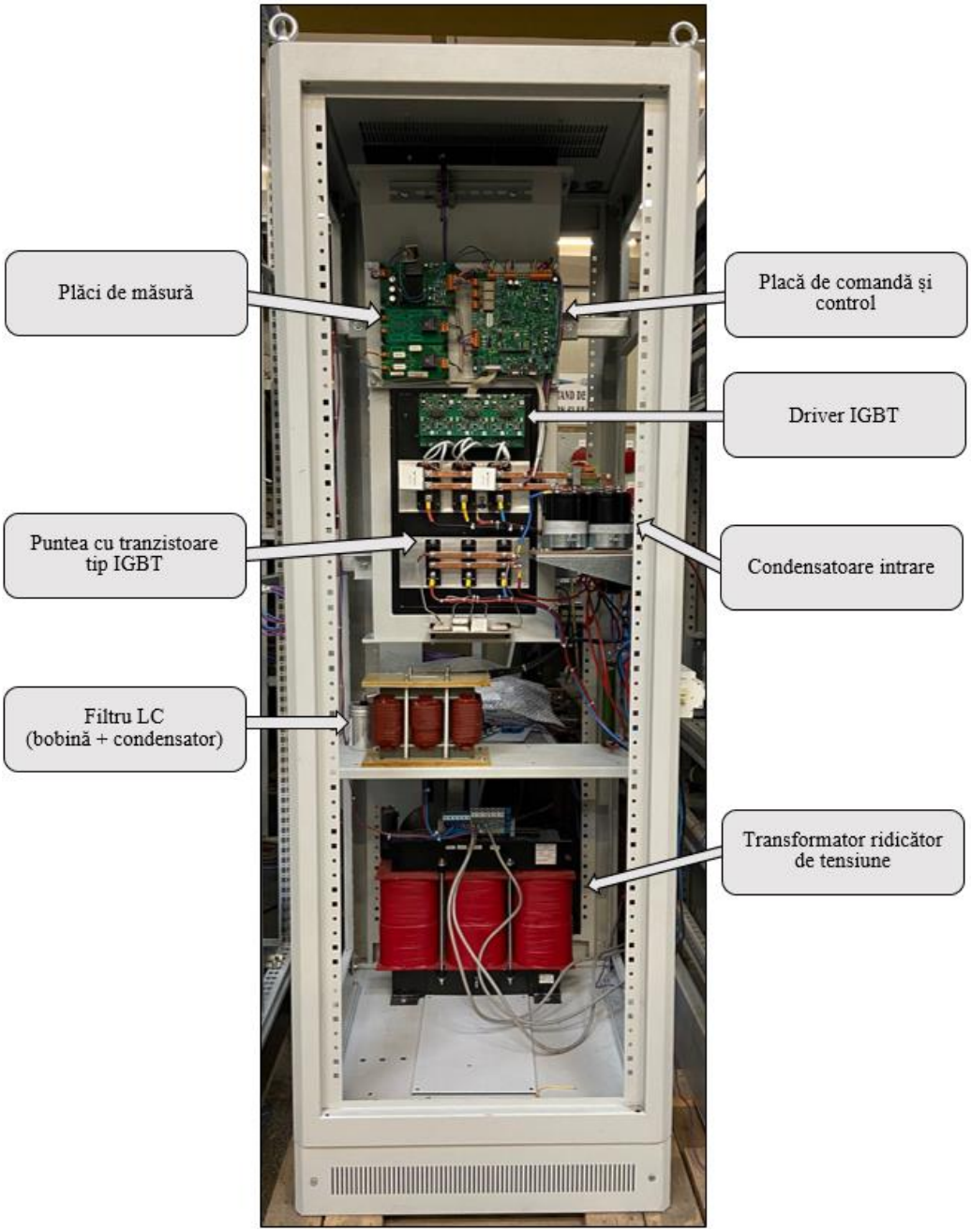


Figura 7.8 Dulap invertor

Mărimile reprezentative U_{cc}, respectiv U_{A_1N} s-au vizualizat prin intermediul unui osciloscop, în figura 7.9 prezentându-se evoluția în timp a mărimilor:

- U_{cc} este tensiunea obținută de la panourile fotovoltaice în tampon cu bateria de acumulatori;
- U_{A_1N} (U_{B_1N}, U_{C_1N}) sunt tensiunile de fază utilizate atât pentru consumatori în situația centralelor off-grid, cât și pentru rețeaua publică de tensiune pentru centralele on-grid.

Pentru evidențierea stabilității în funcționare a centralei fotovoltaice, în figura 7.10 am reprezentat grafic $U_{cc} = f(I_{cc})$, iar în figura 7.11 $U_{A_1N} = f(I_{cc})$.

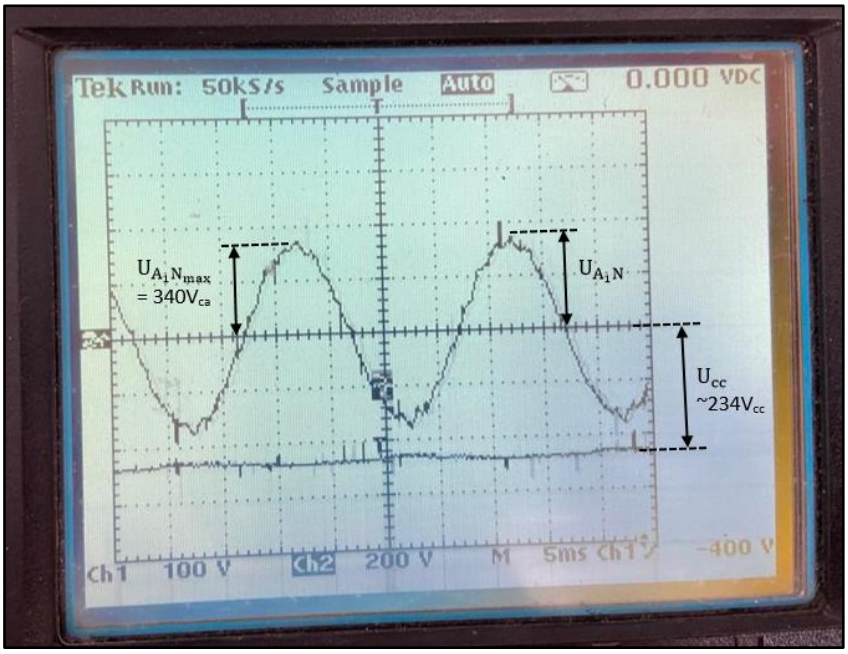


Figura 7.9 Evoluția în timp a tensiunilor măsurate

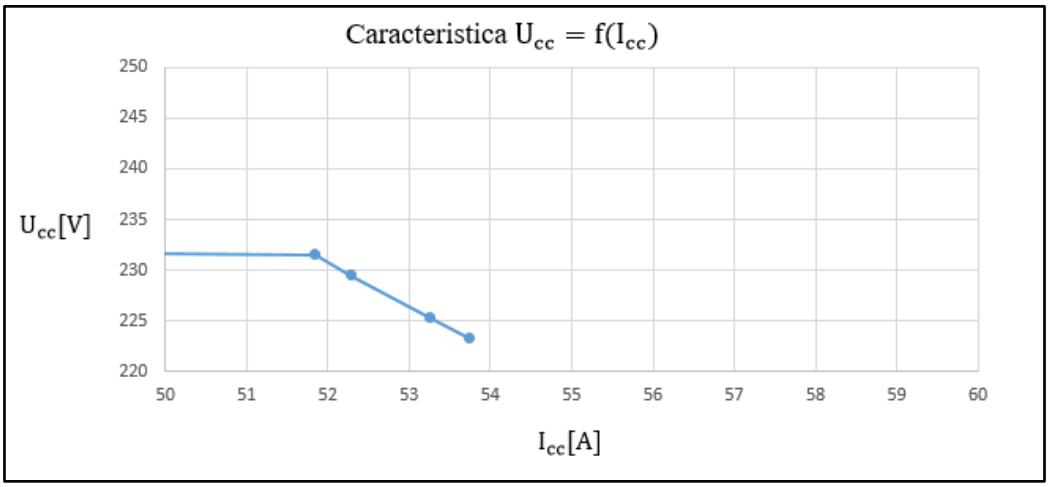


Figura 7.10 Dependența tensiunii de intrare funcție de curentul de intrare

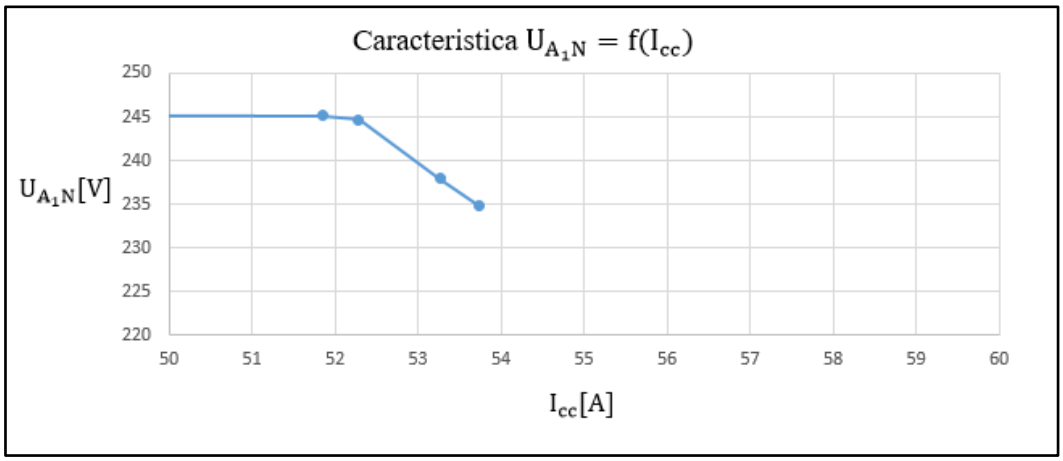


Figura 7.11 Dependența tensiunii de fază funcție de curentul de intrare

Din cele două grafice se pot deduce următoarele concluzii:

- Odată cu creșterea curentului de sarcină, evoluția tensiunii U_{cc} este ușor căzătoare. Motivele sunt legate de:
  - Utilizarea centralei la putere nominală;
  - Utilizarea centralei după o zi de funcționare în care radiația luminoasă nu a fost la nivel maxim, bateria de acumulatoare nefiind încărcată în acest caz la capacitate maximă;
- Odată cu creșterea curentului de sarcină, la ieșirea invertorului tensiunea are o ușoară scădere, lucru datorat acelorași motive enumerate mai sus.

7.5 Concluzii

Prin compararea rezultatelor simulative, a celor experimentale și prin vizualizarea formelor de undă, se pot evidenția următoarele:

- Stabilitatea în funcționare a invertorului din componența centralei fotovoltaice;
- Alegerea unei soluții constructive și dimensionarea optimă a invertorului cu comandă PWM;
- Caracteristicile tensiune-curent ale invertorului au aluri similare, lucru ce confirmă alegerea optimă a acestuia.

Din punct de vedere al calității energiei furnizate de centrala fotovoltaică, se observă din oscilograma prezentată în figura 7.9 următoarele:

- Tensiunea furnizată este foarte apropiată de o sinusoidă, abaterile de la aceasta, provocate de fenomenul de comutație la frecvența de 5kHz, fiind minime;
- Frecvența tensiunii furnizate este de 50Hz, o valoare stabilă indiferent de sarcină;

8 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE.

Prezentul capitol sintetizează activitatea de cercetare realizată în decursul anilor de studiu, accentul punându-se pe contribuțiile aduse în sectorul eficienței energetice al conversiei energiei fotovoltaice în energie electrică, precum și pe recomandările pentru continuarea cercetărilor în vederea îmbunătățirii metodelor actuale și celor identificate în cadrul tezei.

8.1 Concluzii generale

O modalitate de creștere a eficienței energetice este de a acționa asupra fiecărui element constructiv din cadrul sistemului fotovoltaic, astfel că, teza a abordat pe parcursul capitolelor soluții de eficientizare a echipamentelor studiate individual, și anume: panourile fotovoltaice, regulatorul de încărcare a bateriei, sistemul de stocare, convertoare statice curent continuu – curent alternativ.

În cadrul fiecărui capitol destinat cercetării elementelor componente ale sistemului fotovoltaic, s-au realizat:

- Elaborarea studiului teoretic în vederea propunerii și dezvoltării unei soluții tehnice optime în procesul de conversie a energiei fotovoltaice;
- Realizarea schemelor electrice de principiu și calculul de dimensionare;
- Realizarea studiilor simulative prin intermediul programelor Matlab – Simulink și PSpice, având ca obiectiv analizarea funcționalității componentelor sistemului fotovoltaic;
- Efectuarea măsurătorilor experimentale în vederea verificării și validării atât a aspectelor teoretice studiate, cât și a celor simulate;
- Identificarea eventualelor problem și propunerea soluțiilor de remediere sau prevenire a acestora.

Concluziile rezultate în urma studiilor și analizelor prezentate mai sus, sunt:

1. Panouri fotovolatice

Rezultatele obținute în urma simulării contribuie pe de o parte la confirmarea datelor elaborate în urma studiului teoretic, iar pe de altă parte ne conduc la enunțarea următoarelor concluzii:

- În cazul modificării valorii uneia dintre cele două rezistențe are loc o diminuare pronunțată a randamentului celulei. De asemenea, și valoarea tensiunii de mers în gol este diminuată ceea ce contribuie la un regim periodic amortizat privind evoluția puterii în apropierea valorii de mers în gol;
- În cazul modificării simultane a valorilor celor două rezistențe are loc o diminuare drastică a randamentului, respectiv a eficienței energetice. Ca și în prima situație, și valoarea tensiunii de mers în gol suferă o scădere, însă de această dată mult mai pronunțată. În ceea ce privește regimul periodic, acesta este amplificat prin creșterea suprareglajului puterii debitate.

Concluziile desprinse în urma măsurătorilor și a prelucrării datelor obținute sunt:

- Caracteristica tensiunii funcție de curentul de ieșire este similară celor obținute în urma studiului teoretic și simulativ;
- Valoarea tensiunii de mers în gol rămâne constantă indiferent de iradianță;
- Pentru centralele noi, de generație actuală, valorile rezistențelor de șunt și parazită sunt apropiate de cele ideale;

2. Regulator încărcare baterii

Simulările au constat în obținerea și vizualizarea următoarelor mărimi: curentul prin tranzistorul de comutație, curentul prin diodă, curentul prin bobină și tensiunea de ieșire.

Au fost astfel realizate două simulări, la tensiunea de intrare de 190Vcc și la tensiunea de intrare de 210Vcc. Concluzia rezultată este că dimensionarea și alegerea bobinei corespunzătoare, conform criteriilor de mai sus, contribuie la obținerea unei variații convenabile a tensiunii de ieșire, în limitele a 2-3%, pentru un domeniu de variație mai larg al tensiunii de intrare.

Acceptarea unui domeniu mai mare de variație a tensiunii de intrare în condițiile menținerii tensiunii de ieșire în limite admisibile, are un rol semnificativ în funcționalitatea și fiabilitatea sistemului deoarece tensiunea rezultată de la panourile fotovoltaice oscilează funcție de factorii externi de mediu. Toate acestea se traduc în eficiență energetică sporită.

Experimental, pentru trasarea caracteristicii tensiunii de ieșire funcție de tensiunea de intrare, s-au realizat măsurători în cazul funcționării convertorului la diferite valori ale tensiunii de intrare cuprinse între 190 ÷ 221Vcc.

În urma acestora putem concluziona:

- Rezultatele obținute certifică ipotezele elaborate în urma studiului teoretic și simulativ, mai exact, este confirmat caracterul stabilizator al tensiunii de ieșire pentru o variație amplă a tensiunii de alimentare; mai mult, măsurătorile s-au realizat în lipsa bateriei de acumulatori, care cel mai bun filtru pentru orice sursă de curent continuu, iar rezultaul se apropie foarte mult de modelele simulate.
- Valorile măsurate pentru tensiunea de ieșire, ne arată că punctul de funcționare este acela al puterii maxime dezvoltate de panourile fotovoltaice;

Așadar, măsurătorile parametrilor urmăriți în caracterizarea funcționării convertorului c.c.-c.c. și anume tensiunea de ieșire în condiții de sarcină cvasinominală și verificarea punctului static de funcționare la putere maximă, confirmă veridicitatea soluției tehnice propuse și corectitudinea principiilor de alegere și dimenionare a componentelor convertorului. Toate acestea contribuie în final la creșterea eficienței energetice a întregului sistem.

3. Sistem de stocare

Concluziile desprinse după prelucrarea datelor obținute experimental și a realizării graficelor corespunzătoare ficărei dinte cele trei situații simulate, sunt:

- Caracteristicile rezultate ne confirmă noțiunile teoretice legate de faptul că reducerea duratei de viață a unei baterii este strâns legată de modul de exploatare a acesteia;
- Capacitatea bateriei este invers proporțională cu valoarea curentului de descărcare. Astfel că, pierderea semnificativă a capacitatății bateriei are loc în momentul în care valoarea curentului de descărcare are o creștere importantă;
- Tensiunea la bornele bateriei scade odată cu creșterea timpului de descărcare. Pentru evitarea deteriorării bateriei este recomandat ca descărcarea să aibă loc doar până la valoarea minimă a tensiunii pe element (funcție de tipul de baterie), în caz contrar procesele electrochimice de la nivelul bateriei pot fi ireversibile.

Rezultatele arată că indiferent de regimul de funcționare, tensiunea de ieșire este direct proporțională cu nivelul de încărcare al bateriei, ceea ce indică o eficiență la nivel de cicluri de încărcare-descărcare, ce reprezintă o scară de performanță în evaluarea eficienței bateriei.

4. Convertor static curent continuu – curent alternativ

Pentru obținerea performanțelor maxime ale unui invertor, în practică se utilizează dispozitive de corecție pentru diminuarea sau chiar blocarea armonicelor de ordin superior, precum:

- Filtre pentru blocarea frecvențelor înalte;
- Montajul invertorului se realizează la o distanță cât mai mare față de cosumator pentru ca unda de înaltă frecvență să nu se propage către consumator.

Studiul simulativ s-a concretizat în elaborarea a șase grafice cu privire la caracteristicile tensiune - curent. Concluzia desprinsă se referă la veridicitatea calculului de dimensionare

rezultată din graficele simulării care indică un factor de putere 1 și din similitudinea caracteristicilor;

În structura unei centrale fotovoltaice, convertorul cc-ca are un rol determinant în realizarea valorii de intrebuințare a acesteia. De aceea, în proiectarea și realizarea convertorului se au în vedere următoarele aspecte:

- Dimensionarea la puterea maximă teoretică a centralei fotovoltaice;
- Asigurarea unei tensiuni la ieșire stabile în toleranța maximă admisă de ±10% față de valoarea nominală, valoare strict necesară în special pentru centralele off-grid;
- Asigurarea unei frecvențe a tensiunii de ieșire stabilă la o valoare cât mai apropiată de 50Hz și în toleranța standard admisă;
- În cazul funcționării on-grid, convertorul cc-ca fiind pilotat de rețeaua de tensiune publică cu o putere de scurtcircuit net superioară, trebuie să suporte static și dinamic conversia bidirecțională a puterii active pentru abaterile de la frecvența rețelei, respectiv a puterii reactive pentru abaterile de la tensiunea rețelei. Așadar, soluția aleasă asigură parametrii optimi de funcționare.

Toate aceste caracteristici contribuie la creșterea eficienței energetice atât a invertorului, cât și a centralei fotovoltaice.

În literatura de specialitate este definit un factor de performanță caracteristic instalației fotovoltaice, definit ca raport dintre energia furnizată de centrală și energia maximă pe care centrala o poate furniza în condiții standard favorabile, iradianță 1000 W/m^2 și temperatură 25°C.

Raportul de performanță evidențiază efectul pierderilor cauzate de diverși factori. Valoarea acestuia este orientativă deoarece poate varia semnificativ funcție de soluția tehnică aleasă sau de locul de amplasament al centralei. Estimarea factorului de performanță este relatată în figura de mai jos:

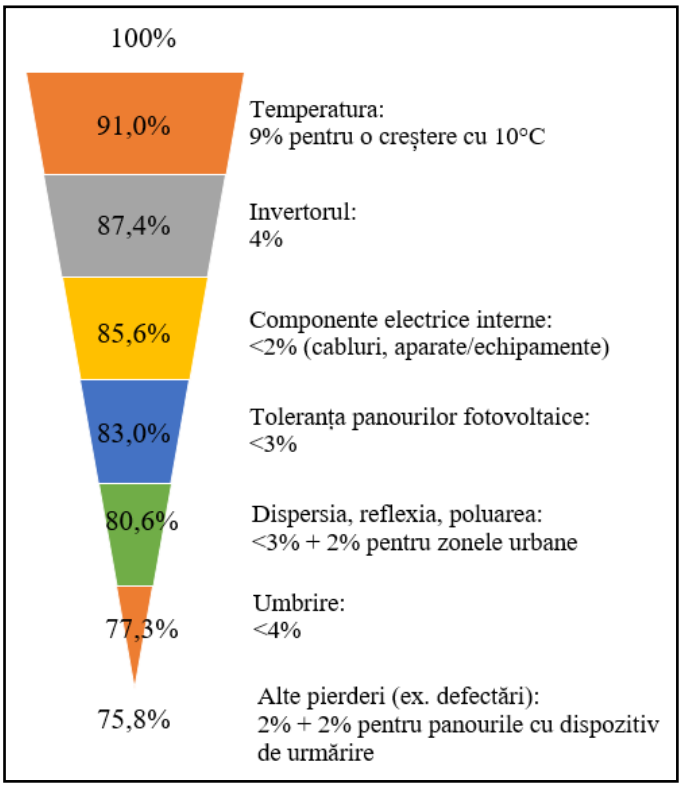


Figura 8.1 Estimarea factorului de performanță a unui sistem fotovoltaic

Maximizarea eficienței energetice, pe lângă modalitățile dezvoltate anterior, are loc prin:

- Alegerea optimă a locului de montaj având în vedere temperaturi scăzute;
- Alegerea unui invertor cu eficiență ridicată și echipat cu funcția de urmărire a punctului de putere maximă;
- Alegerea panourilor fotovoltaice care să perimită o toleranță de ±3%;
- Asigurarea mentenanței panourilor fotovoltaice prin îndepărtarea rezidurilor;
- Evitarea umbririi prin reducerea distanței dintre rândurile panourilor fotovoltaice;
- Alegerea conductoarelor de secțiune superioară celei necesare în cazul traseelor lungi cu căderi mari de tensiune;
- Reducerea defectărilor prin realizarea unei mentenanțe preventive.

Preocupările actuale din domeniul centralelor fotovoltaice sunt îndreptate către reducerea costurilor, creșterea randamentelor și identificarea de noi soluții tehnice ale componentelor principale, preocupări care urmăresc în mod consecvent creșterea eficienței energetice a acestora.

Teza de doctorat a urmărit aceste necesități și consider că punerea în practică a principiilor elaborate aduce un aport seminificativ în ceea ce privește funcționarea unei centrale fotovoltaice la eficiență energetică maximă.

8.2 Contributii originale

Teza de doctorat *„Contribuții privind eficientizarea soluțiilor de conversie și stocare a energiei regenerabile”* reprezintă o abordare teoretică și practică a maximizării eficienței energetice a unui sistem fotovoltaic din prisma proiectării, dimensionării, instalării, exploatării, atât a întregului sistem, cât și a fiecărei componentă din structura acestuia.

Obiectivul principal al activităților de cercetare îl reprezintă integrarea surselor regenerabile de energie de tip fotovoltaic pentru producerea energiei electrice atât în regim off-grid, precum și în rețelele electrice în regim de eficiență energetică maximă.

Contribuţiile proprii şi originale aduse în cadrul tezei constă în principiu în:

- Elaborarea și realizarea studiilor teoretice:
  - Realizarea unei sinteze asupra stadiului actual în domeniul managementului și distribuției energiei regenerabile, prezentarea aspectelor teoretice de bază aferente obiectivului tezei precum și a unui studiu bibliografic referitor la sursele fotovoltaice realizate până în prezent;
  - Realizarea unui studiu documentar privind sursele de energie regenerabilă și evidențierea principalelor avantaje și dezavantaje ale acestora cu scopul identificării domeniilor de aplicație favorabile fiecărui tip de sursă regenerabilă.
  - Identificarea și definitivarea elementelor constructive ale unui sistem fotovoltaic.
  - Realizarea unui studiu teoretic al elementelor ce compun lanțul de conversie energie luminoasă (fotovoltaică) în energie electrică în vederea identificării principiilor de funcționare și integrarea acestora în centrala fotovoltaică.

- Modelarea și întocmirea unei analize privind componentele aceluiași lanț de conversie;
- Identificarea și prezentarea criteriilor de selecție a componentelor astfel încât eficiența sistemului fotovoltaic să crească.
- Realizarea studiului privind obținerea siguranței în exploatare în cazul regimurilor dinamice, tranzitorii ce au loc între sursă și consumator;
- Realizarea unui studiu și a unei analize privind oportunitatea sistemului de stocare energetică în ambele regimuri de funcționare a centralei fotovoltaice, off-grid respectiv on-grid;

❖ Simularea echipamentelor electrice:
- Dimensionarea elementelor principale implicate în conversia energiei fotovoltaice;
- Propunerea unei soluții de dimensionare în vederea obținerii eficienței maxime;
- Elaborarea schemelor electrice aferente convertoarelor statice;
- Realizarea modelelor matematice, construirea schemelor electrice și elaborarea programelor simulative în Matlab-Simulink și PSpice.
- Simularea funcționalității panourilor fotovoltaice, a regulatorului de încărcare baterie și a invertorului în diverse condiții și regimuri de funcționare.
- Simularea și modelarea matematică a bateriilor de acumulatoare folosite pentru stocarea energetică;
- Evidențierea prin simulare a elementelor ce concură la creșterea eficienței energetice pentru fiecare element component al sistemului fotovoltaic;

❖ Testarea și validarea unui model experimental:
- Realizarea modelului experimental prin conectarea și elaborarea schemei de funcționalitate utilizând o parte din echipamentele electrice aferente unor proiecte ample de cercetare din cadrul societății ICPE ACTEL.
- Propunerea şi implementarea metodelor de testare și verificare echipamente.
- Realizarea măsurătorilor experimentale pentru identificarea modului de comportare al echipamentelor în situații reale.
- Ridicarea caracteristicilor experimentale;
- Implementarea unui mod de construcție a graficelor pornind de la fișierele cu date obținute în urma măsurătorilor.
- Validarea teoretică a principiilor de conversie eficiență energetică cu ajutorul rezultatelor experimentale pe centrala fotovoltaică din dotarea ICPE ACTEL.
- Proiectarea mecanică pentru integrarea bateriei de acumulatoare.
- Implementarea şi efectuarea validărilor şi verificărilor de performanţă prin prezentarea rezultatelor experimentale și interpretarea acestora.
- Prezentarea problemelor întâlnite în practică, care nu se găsesc în literatura de specialitate și propuneri de soluționare a acestora.

- Propunerea utilizării unor protecții contra supratensiunilor atmosferice în funcționarea centralelor fotovoltaice cu aplicație directă pentru centrala experimentală;
- Definirea unei formule de prezentare a rezultatelor, unitară pentru toate echipamentele studiate și testate.

❖ Disiminarea rezultatelor:

- Verificarea și validarea soluțiilor propuse în urma studiului teoretic prin analiză simulativă și implementare pe model experimental.
- Realizarea unei analize comparative între modelele teoretice, studiul simulativ și rezultatele obținute pe baza modelului experimental.
- Interpretarea rezultatelor obținute, identificarea și propunerea unor noi soluții de creștere a eficienței energetice dezvoltate în urma simulărilor și a testării experimentale.
- Identificarea factorilor care contribuie la scăderea eficienței energetice și elaborarea/dezvoltarea soluțiilor pentru prevenirea, diminuarea sau stoparea acestora.
- Identificarea indicatorilor de performanță și definirea soluțiilor în vederea creșterii eficienței energetice.
- Concepția și prezentarea modalității de conectare a elementelor unui sistem fotovoltaic, alegerea și dimensionarea acestora astfel încât să fie compatibile din punct de vedere funcțional și să poată lucra ca un sistem unitar.
- Dezvoltarea și implementarea unei soluții integrate;
- Participarea la diseminarea rezultatelor cercetării prin publicarea articolelor științifice în reviste de specialitate.

8.3 Perspective ulterioare de dezvoltare

Ideile dezvoltate în cadrul cercetării pot reprezenta punctul de lansare pentru noi documentări în acest domeniu de mare actualitate cu implicații mari în domeniul producerii de energie regenerabilă în condiții de performanță crescânde și mai ales în condiții de eficiență energetică sporită.

În acest sens cred că o serie de activități viitoare de cercetare se pot regăsi în următoarele direcții:

- Realizarea unei analize a regimurilor tranzitorii în funcționarea fiecărei componente a centralei fotovoltaice experimentale și ale ansamblului dezvoltat de orice producător de energie regenerabilă;
- Îmbunătățirea și aprofundarea influenței asupra punctului de putere maximă a altor factori de mediu;
- Integrarea convertoarelor rezonante în structura centralelor fotovoltaice în vederea creșterii eficienței energetice a acestora;
- Realizarea studiului privind integrarea pe scară largă a centralelor fotovoltaice domestice sau a celor utilizate de comunitățile locale în sistemul energetic național;

9 LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE ȘI PARTICIPĂRI CONFERINȚE

1) **Mădălina Lupașcu**, Valentin Năvrăpescu, Ion Potârniche, "*Energy efficiency of solutions developed by ICPE ACTEL in collaboration with SIEMENS SRL Romania and ICPE CA Bucharest*"- Conferinţa ştiinţifică INCDIE ICPE-CA & SIEMENS România – INVITAT SPECIAL 6 DECEMBRIE 2018;

2) **Mădălina LUPAȘCU**, Valentin NĂVRĂPESCU, Ion POTÂRNICHE, "*Studiu privind optimizarea reglării convertoarelor ca/cc utilizate în acționarea motoarelor de cc antrenând troliul de foraj*"– SME 2018;

3) Ion POTÂRNICHE, Mina GHEAMALINGA, **Mădălina LUPAȘCU**, Cristiana POPA, "*Tradiții și perspective în domeniul echipamentelor de acționare a motoarelor electrice din structura instalațiilor de foraj realizate în România*"– ZASTR 2018;
Univers Ingineresc nr. 20/2018 - 16-31 octombrie 2018

4) Ion POTÂRNICHE, **Mădălina LUPAȘCU**, Mina GHEAMALINGA, "*Preocupările ICPE ACTEL pentru dezvoltarea de soluții și produse eficiente energetic în domeniul acționărilor și automatizărilor electrice*"– ZASTR, Chișinău 2019;

5) **Mădălina LUPAȘCU**, Valentin NĂVRĂPESCU, Ion POTÂRNICHE, "*Study regarding frequency control for isolated sources using photovoltaic energy storage systems*"– ATEE 2019 (Published in 30 May 2019);
Published in: 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)
Date of Conference: 28-30 March 2019
Date Added to IEEE Xplore: 30 May 2019
Electronic ISBN:978-1-7281-0101-9; USB ISBN:978-1-7281-0100-2
Print on Demand(PoD) ISBN:978-1-7281-0102-6
Electronic ISSN: 2159-3604;
Print on Demand(PoD) ISSN: 2068-7966

6) **Mădălina LUPAȘCU**, Valentin NĂVRĂPESCU, Ion POTÂRNICHE, "*Considerations on voltage control for storable photovoltaic energy sources integrated into the national energy system*"– ATEE 2019 (Published in 30 May 2019);
Published in: 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)
Date of Conference: 28-30 March 2019
Date Added to IEEE Xplore: 30 May 2019
ISBN Information:
Electronic ISBN:978-1-7281-0101-9; USB ISBN:978-1-7281-0100-2
Print on Demand(PoD) ISBN:978-1-7281-0102-6
Electronic ISSN: 2159-3604;
Print on Demand(PoD) ISSN: 2068-7966

7) Filofteia Valentina Voinea; Ioan Dragoş Deaconu; Aurel Ionuţ Chirilă; **Andreea Mădălina Lupaşcu**; Valentin Năvrăpescu, "*4WD Automatic Robot for Feeding Animals from a Shelter*"– EV 2019 (Published in 11 November 2019);
Published in: 2019 Electric Vehicles International Conference (EV)
Date of Conference: 3-4 Oct. 2019
Date Added to IEEE Xplore: 11 November 2019
ISBN Information:
Electronic ISBN:978-1-7281-0791-2
USB ISBN:978-1-7281-0790-5
Print on Demand(PoD) ISBN:978-1-7281-0792-9

8) **Andreea - Mădălina LUPAȘCU**, Violeta-Maria IONESCU, Ion POTÂRNICHE, Valentin NĂVRĂPESCU , Anca-Alexandra SĂPUNARU, "*Increase of Energy Efficiency of Electrically Driven Drilling Installations by Valorising the Braking Regime of The Draw Works upon Descending the Pipe Line*", (Foren 2020).
Journal title: EMERG - Energy.Environment. Efficiency.Resources.GlobalizationISSN: 2457-5011 (print), 2668-7003 (online)
Publisher: AGIR
F EMERG 2020; 6 (3) : 33-40; 10.37410/EMERG.2020.3.03

9) Violeta-Maria IONESCU, Anca-Alexandra SĂPUNARU, **Mădălina-Andreea LUPAȘCU**, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, "*Electromagnetic Interaction between the Power Distribution Grid and the Hv System of an Electric Vehicle*" (Foren 2020)
Journal title: EMERG - Energy.Environment. Efficiency.Resources.Globalization
ISSN: 2457-5011 (print), 2668-7003 (online)
EMERG 2020; 6 (3) : 77-84; 10.37410/EMERG.2020.3.07;

10) Anca-Alexandra SĂPUNARU, Violeta-Maria IONESCU, Ovidiu FRĂȚILĂ, **Mădălina-Andreea LUPAȘCU**, Mihai Octavian POPESCU, Claudia Laurența POPESCU, "*Active Power Transfer between two Energetic Networks, of Different Working Frequencies, using a Variable Frequency Transformer*" (Foren 2020)

11) Valentin NĂVRĂPESCU, **Andreea - Mădălina LUPAȘCU,** Ion POTÂRNICHE, "Theoretical considerations regarding the control of static converters with bidirectional operation" (Buletin Științific UPB) – în proces de recenzare.

10 BIBLIOGRAFIE

[1] Energie din surse regenerabile pentru o dezvoltare rurală durabilă. Sinergiile posibile sunt considerabile, dar rămân în mare parte nevalorificate. Raportul special nr. 05, 2018;

[2] Pactul Verde European: Decarbonarea sectorului energetic din România prin energii regenerabile, Aprilie 2021;

[3] Comunicat de presă: O economie neutră climatic: Comisia prezintă planuri pentru sistemul energetic al viitorului și pentru hidrogenul curat, Bruxelles, 8 iulie 2020;

[4] Planul Național Integrat în domeniul Energiei și Schimbărilor Climatice 2021-2030, Aprilie 2020;

[5] Strategia energetică a României 2020-2030, cu perspectiva anului 2050, Ministerul Economiei, Energiei și Mediului de Afaceri;

[6] Mircea BEJAN, Tiberiu RUSU, Ioana BĂLAN, "Prezentul şi Viitorul Energiei - Partea a IIa Energii regenerabile. Perspective tehnologice", AGIR;

[7] "Resurse și Conversia Energiei - Capitolul 6 – Energia solară", http://www.tti.ieeia.tuiasi.ro

[8] N. Golovanov, H. Albert, Ș. Gheorghe, N. Mogoreanu, G-C Lăzăroiu, "Surse regenerabile de energie electrică în sistemul electroenergetic", Editura AGIR, 2015;

[9] Victor Emil Lucian, "Energia solară – Captarea. Conversia și utilizarea energiei solare", Editura Universitară, București, 2018;

[10] Edmond MAICAN, "Sisteme de Energii Regenerabile", Editura Printech, Bucureşti, 2015;

[11] Florin IONESCU, Dan FLORICĂU, Smaranda NIȚU, Jean-Paul SIX, Philippe DELARUE, Cristian BOGUȘ, "Electronică de putere – Convertoare statice", Editura Tehnică, București, 1998;

[12] Mihai PUIU – BERIZINȚU, "Electronică Industrială de Putere", Editura Alma Mater, Bacău, 2007;

[13] Savel MATACHE, "Stocarea Energiei. Soluţii noi oferite de progresele chimiei moderne şi unele contribuţii româneşti";

[14] Florin Teodor Tănăsescu -Sistemele de stocare a energiei, o soluţie pentru optimizarea funcţionării reţelelor electrice la care sunt racordate surse regenerabile intermitente;

[15] Sisteme de stocare a energiei în VE și VEH, http://ems.utcluj.ro;

[16] Power Storage option to integrate renewables: the case of large scale applications, European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, TP Wind_1st Energy R&D Event = Grid Integration, October, 2011;

[17] Kathie Zipp, "Batteries: Which is best for solar storage", August 21, 2015, updated 11/2017;

[18] G. Clondescu, Exploatarea şi repararea acumulatoarelor electrice, Ed. Tehnică 1960;

[19] Daniel A. Scherson and Attila Palencsar, "Batteries and Electrochemical Capacitors", The Electrochemical Society Interface, Spring 2006;

[20] Graziani A. Bortolini M., Gamberi M. Technical and Economic Design of Photovoltaic and Battery Energy Storage System. Energy Conversion and Management;

[21] James P. Dunlop, Florida Solar Energy Center for Sandia National Laboratories: Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems;

[22] Acumulatoare electrice – Octavia Tomuta – Editura Tehnica 1988;

[23] www.energizer.com, "Battery Internal Resistance", Technical Bulletin, 2005;

[24] https://energypedia.info/wiki/Batteries#Different_Battery_Types;

[25] http://www.solarpowerworldonline.com/2015/08/what-is-the-best-type-of-battery-for-solar-storage/;

[26] https://yo8tff.ro/en/energie/stocarea-energiei;

[27] Handbook On Battery Energy Storage System, December 2018;

[28] M. de Wild-Scholten, "Renewable and Sustainable Energy Reviews," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 119;

[29] A. Brooks, "Solar Energy: Photovoltaics," in Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet, London, London Elsevier, 2013;

[30] W. Stine and M. Geyer, "Power from the Sun - Power Cycles for Electricity Generation," 2001;

[31] Messenger R. s.a. "Photovoltaic systems engineering", 2nd edition, CRC Press LLC, 2004;

[32] D. Alexa, O.Hrubaru "Aplicații ale convertoarelor statice de putere", Editura Tehnică, București, 1989;

[33] D. Floricău "Sisteme de comandă pentru convertoare statice de putere", Printech, București, 1997;

[34] D. Rekioua și E. Matagne "Optimization of Photovoltaic Power Systems, Modelization, Simulation and Control", Springer, 2012;

[35] T. Orłowska-Kowalska, F. Blaabjerg și J. Rodríguez, "Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives. Studies in Computational Intelligence", vol. 531, Springer, 2014;

[36] N. Femia, G.S.G. Petrone și M. Vitelli, "Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems", CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013;

[37] M. Victor, F. Greizer, S. Bremicker și U. Hubler, „Method of converting a direct current voltage from a source of direct current voltage, more specifically from a photovoltaic source of direct current voltage, into a alternating current voltage". United States of America Brevet US7411802 B2, 12 August 2008.

[38] K. N. Edhura, K. Ahmad, J. Selvaraj și N. A. Rahim, "A review of the islanding detection methods in gridconnected PV invertes", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.