

MINISTERUL EDUCAȚIEI



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ**

DIN CLUJ-NAPOCA

**FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE**  
**DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ**

# **Optimizarea Sistemelor Fotovoltaice Utilizând Algoritmi MPPT Îmbunătățiți și Convertoare Boost**

PROIECT DE DIPLOMĂ

Autor: **Gabriel CRISAN**

Conducător științific: **Asis. Dr. Ing. Mircea ȘUȘCĂ**

**2024**



**FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE**  
**DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ**

DECAN,  
Prof. dr. ing. Mihaela DÎNȘOREANU

DIRECTOR DEPARTAMENT,  
Prof. dr. ing. Honoriu VĂLEAN

Autor: **Gabriel CRISAN**

**Optimizarea Sistemelor Fotovoltaice Utilizând Algoritmi MPPT Îmbunătățiți și  
Convertoare Boost**

1. **Enunțul temei:** *Scurtă descriere a temei lucrării de licență și datele inițiale*
2. **Conținutul lucrării:** *(enumerarea părților componente) Exemplu: Pagina de prezentare, Declarație privind autenticitatea proiectului, Cuprins, Introducere, Studiu Bibliografic, Analiza Proiectarea și Implementarea Subcomponentelor, Testare și Validarea Rezultatelor, Concluzii, Bibliografie.*
3. **Locul documentării:** *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*
4. **Consultanți:**
5. **Data emiterii temei:** 28.11.2023
6. **Data predării:** 12.07.2024

Semnătura autorului: \_\_\_\_\_

Semnătura conducătorului științific: \_\_\_\_\_

**FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ****Declarație pe propria răspundere privind  
autenticitatea lucrării de licență**

Subsemnatul(a) **Gabriel CRISAN**, legitimat(ă) cu **CI** seria **CJ** nr. **1008101** CNP **5010226125860**, autorul lucrării: **Optimizarea Sistemelor Fotovoltaice Utilizând Algoritmi MPPT Îmbunătățiți și Conversoare Boost**, elaborată în vederea susținerii examenului de finalizare a studiilor de licență la **Facultatea de Automatică și Calculatoare**, Specializarea **Automatică și Informatică Aplicată** din cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, sesiunea **Iulie 2024** a anului universitar **2023-2024**, declar pe propria răspundere că această lucrare este rezultatul propriei activități intelectuale, pe baza cercetărilor mele și pe baza informațiilor obținute din surse care au fost citate, în textul lucrării și în bibliografie.

Declar că această lucrare nu conține porțiuni plagiate, iar sursele bibliografice au fost folosite cu respectarea legislației române și a convențiilor internaționale privind drepturile de autor.

Declar, de asemenea, că această lucrare nu a mai fost prezentată în fața unei alte comisii de examen de licență.

În cazul constatării ulterioare a unor declarații false, voi suporta sancțiunile administrative, respectiv, *anularea examenului de licență*.

Data

12.07.2024

Nume, Prenume

CRISAN GABRIEL

Semnătura



**FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE**  
**DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ**

**SINTEZA**

proiectului de diplomă cu titlul:

**Optimizarea Sistemelor Fotovoltaice Utilizând Algoritmi MPPT  
Îmbunătățiți și Convertoare Boost**

Autor: **Gabriel CRISAN**

Conducător științific: **Asis. Dr. Ing. Mircea ȘUȘCĂ**

1. Cerințele temei: Modelarea matematica, proiectarea componentelor, simularea și controlul unui sistem fotovoltaic.
2. Soluții alese: În scopul implementării primei cerințe a acestui proiect m-am documentat cu privire la fenomenele fizice și electrice ce descriu componentele sistemului fotovoltaic. În urma implementării lor în mediul de dezvoltare MATLAB/Simulink, am continuat cu parametrizarea lor, în vederea construirii unui sistem funcțional pentru testarea algoritmilor de urmărire propuși.
3. Rezultate obținute: Sistemul final obținut demonstrează o capacitate eficientă de urmărire a punctului de putere maximă în condiții variabile de temperatură, iradiere și sarcină. Modelarea sistemului în subcomponente permite extinderea ulterioară a acestuia, dezvoltarea de algoritmi noi și integrarea în rețele ce utilizează multiple surse de energie regenerabilă.
4. Testări și validări: Sistemul a fost testat utilizând scenarii variabile cu privire la condițiile meteorologice și cele de sarcină, pentru care sistemul nostru a păstrat eficiența dorită.
5. Contribuții personale: Analiza și documentarea cu privire la sistemele fotovoltaice, convertoarele de putere și sistemele de stocare a energiei. Proiectarea subcomponentelor sistemului, implementarea și ajustarea algoritmilor de control și testarea și validarea rezultatelor.
6. Surse de documentare: Articole științifice, rapoarte științifice, cărți disponibile în literatura de specialitate.

Semnătura autorului: \_\_\_\_\_

Semnătura conducătorului științific: \_\_\_\_\_

# Cuprins

<b>Capitolul 1</b>	<b>Introducere</b>	<b>1</b>
1.1	Context general . . . . .	1
1.2	Obiective . . . . .	3
1.2.1	Obiective generale . . . . .	3
1.2.2	Obiective specifice . . . . .	3
1.3	Specificații . . . . .	4
1.3.1	Parametrizarea componentelor . . . . .	4
1.3.2	Funcționalități . . . . .	4
1.3.3	Performanțe . . . . .	4
1.3.4	Limitări . . . . .	4
<b>Capitolul 2</b>	<b>Studiu Bibliografic</b>	<b>5</b>
2.1	Modulul fotovoltaic . . . . .	5
2.1.1	Introducere: Celule fotovoltaice . . . . .	5
2.2	Convertorul de putere . . . . .	6
2.3	Tehnici de Modelare si Simulare . . . . .	7
2.4	Algoritmi de urmărire a punctului de putere maximă . . . . .	8
2.5	Sisteme de stocare a energiei . . . . .	9
2.5.1	Bateria . . . . .	9
<b>Capitolul 3</b>	<b>Analiza, Proiectarea și Implementarea Subcomponentelor</b>	<b>11</b>
3.1	Circuitul echivalent al modulului fotovoltaic . . . . .	11
3.1.1	Modelul mono-diodă al celulei fotovoltaice . . . . .	11
3.1.2	Modelul dublă-diodă al celulei fotovoltaice . . . . .	12
3.2	Convertoare de putere . . . . .	14
3.2.1	Introducere: Surse de alimentare în comutație . . . . .	14
3.2.2	Modelarea SMPS și topologii . . . . .	14
3.2.3	Alegerea topologiei SPMS . . . . .	15
3.3	Convertorul Boost . . . . .	16
3.3.1	Convertorul buck-boost . . . . .	17
3.3.2	Ecuatiile necesare implementării convertorului boost . . . . .	18
3.4	Convertoare DC/DC în rolul implementării MPPT . . . . .	19
3.5	Proiectarea convertorului boost . . . . .	20
3.6	Sisteme de stocare a energiei . . . . .	24
3.6.1	Ecuatiile ce definesc comportamentul bateriei . . . . .	24
3.6.2	Calculul capacității bateriei și a $SoC$ . . . . .	25
3.6.3	Măsurarea tensiunii la mers în gol (OCV) și a căderilor de tensiune pe rețeaua RC și $R_S$ . . . . .	26
3.6.4	Modelarea bateriei folosind circuitul echivalent și identificarea parametrilor . . . . .	27
3.7	Algoritmi MPPT . . . . .	31
3.7.1	Metode de urmărire a punctului de putere maximă . . . . .	31
3.7.2	Tehnica <i>Perturb and Observe</i> . . . . .	31
3.7.3	Algoritmul <i>Incremental Conductance</i> . . . . .	32
3.7.4	Metoda tensiunii constante (CV) . . . . .	34

<b>Capitolul 4</b>	<b>Testare și validarea rezultatelor</b>	<b>35</b>
4.1	Testare și reprezentarea grafică a rezultatelor . . . . .	35
4.1.1	Rezultatele obținute din simularea modelului panoului fotovoltaic	35
4.1.2	Rezultatele obținute din simularea modelelor convertoarelor de putere	38
4.1.3	Rezultatele obținute din simularea modelului bateriei . . . . .	41
4.1.4	Rezultatele obținute în urma simulării sistemului fotovoltaic cu algoritmi de urmărire și convertorul ridicător . . . . .	42
4.1.5	<b>Comparatia puterii maxime a algoritmilor si eficienta lor in scenariul de sarcina de 20 <i>Ohm</i></b> . . . . .	46
4.1.6	<b>Comparatia puterii maxime a algoritmilor si eficienta lor in scenariul de sarcina de 15 <i>Ohm</i></b> . . . . .	47
<b>Capitolul 5</b>	<b>Concluzii</b>	<b>48</b>
5.1	Rezultate Obținute . . . . .	48
5.1.1	Contribuții personale . . . . .	48
5.2	Direcții de dezvoltare . . . . .	49
<b>Bibliografie</b>		<b>50</b>

# Capitolul 1

## Introducere

### 1.1. Context general

În căutarea soluțiilor durabile pentru satisfacerea cerințelor energetice tot mai mari ale societății moderne, energia solară a devenit o alternativă din ce în ce mai atractivă și viabilă. Totodată, contribuțiile importante la reducerea emisiilor gazelor cu efect de seră, a poluanților și a dependenței de sursele de energie neregenerabile și a combustibililor fosili, fac din energia solară o soluție esențială pentru tranziția către un viitor energetic sustenabil și ecologic.

Avansul tehnologic în domeniul celulelor fotovoltaice și al sistemelor on-grid oferă soluțiilor fotovoltaice notorietate crescândă în rândul soluțiilor de energie verde. Acestea sunt atractive atât pentru consumatorii care vor să devină independenți energetic sau prosumatori, cât și pentru strategiile de producție la nivel global. Centralele solare pe bază de panouri fotovoltaice câștigă teren; în prezent, cea mai mare centrală fotovoltaică din Europa se află în Spania, cu o capacitate de 850 MW, iar proiectele derulate în China și India ating capacități de ordinul gigawaților.

Sistemele fotovoltaice sunt printre cele mai rentabile tehnologii pentru generarea de electricitate, ceea ce face ca utilizarea lor să devină tot mai răspândită pe glob. Capacitatea globală a crescut de la 5 GW în 2005 la aproximativ 1.18 terawați în 2022. În același an, capacitatea cumulativă a instalațiilor solare a atins 415 GW doar în China. Investițiile în dezvoltarea soluțiilor și a parcurilor fotovoltaice au crescut considerabil în ultimii ani, iar această tehnologie rămâne una dintre cele mai puternic finanțate dintre sursele regenerabile.

Conform datelor adunate, investițiile în sisteme fotovoltaice la nivel global s-au dublat în ultimii ani, ajungând la circa 300 miliarde de dolari anual [1]. China este liderul mondial atât în capacitatea instalată cât și în producția de module și celule cu tehnologii thin-film, urmată de Statele Unite, iar în Europa liderii sunt Germania și Spania cu o producție cumulată de aproape 100 TWh[2].

Într-un studiu realizat de Ember Global Electricity în 2022, energia electrică generată de resursele regenerabile a observat o creștere puternică față de anul 2021. Energia electrică generată de sisteme fotovoltaice și termice solare a depășit 24% iar cea eoliană 13%, față de cele bazate pe combustibili fosili, cărbune sau gaz care cumulat nu au observat o creștere mai mare de 7% [3].

Perspectiva pieței globale pentru producția de energie electrică cu sisteme fotovoltaice pentru perioada 2023-2027 arată că China va continua să fie lider în ceea ce privește noile instalații de capacitate fotovoltaică, cu instalații preconizate între 764 de gigawați și

un terawatt, urmată de Statele Unite, care se estimează că vor instala circa 315 gigawați de capacitate solară până în 2027. În Europa, liderii rămân Germania și Spania, fiind prevăzut că vor instala în jur de 200 de gigawați de capacitate solară.

Luând în considerare și costurile în scădere ale instalațiilor solare, această tehnologie devine din ce în ce mai atractivă și accesibilă pentru producția de energie electrică. Această tendință sprijină eforturile globale de combatere a schimbărilor climatice prin reducerea gazelor cu efect de seră și a dependenței față de combustibilii fosili. Figura 1.1 ilustrează evoluția costului mediu pentru acest tip de instalații.

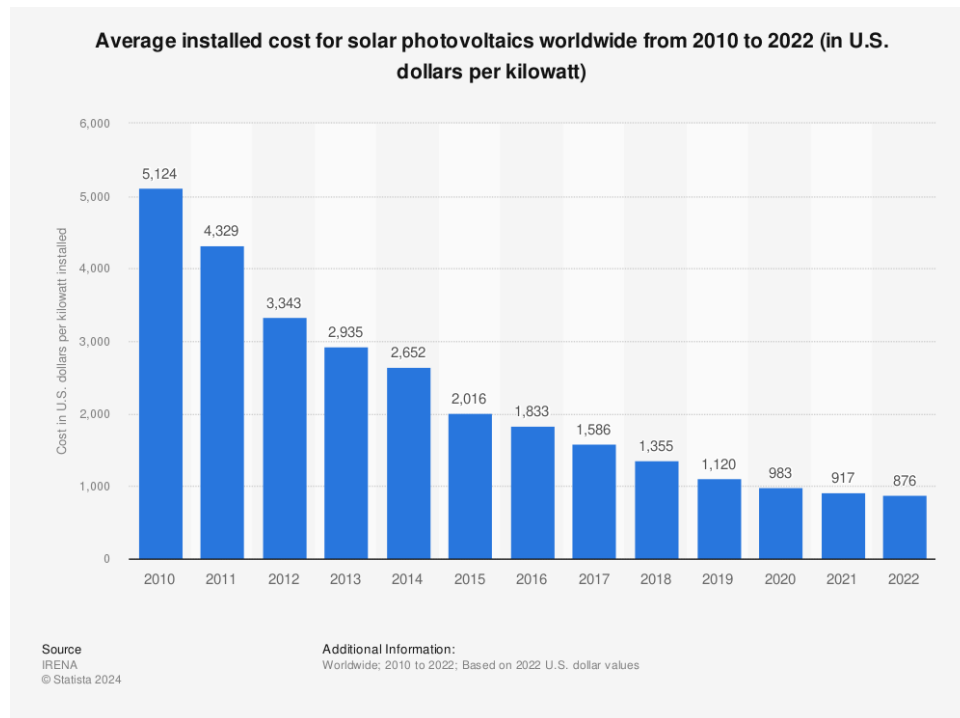


Figura 1.1: Costul mediu al instalațiilor fotovoltaice la nivel global din 2010 până în 2022 (în  $[USD/kilowatt]$ ) [2]

Tema centrală a proiectului implică realizarea unor modele matematice pentru un sistem fotovoltaic cu diferite topologii de conversie, dezvoltarea și îmbunătățirea unor algoritmi MPPT (Maximum Power Point Tracking) și integrarea lor într-un sistem cu stocare de energie pentru maximizarea eficienței. Întregul sistem a fost modelat utilizând mediul de dezvoltare MATLAB/Simulink, iar algoritmi testati au fost, de asemenea, implementați în același mediu de dezvoltare.

Proiectul este focalizat pe analiza comportamentului dinamic al sistemului fotovoltaic în diverse condiții de operare și utilizand diverse topologii, cu diferite tipuri de conversie și stocare a energiei solare. Algoritmi implementați au fost testati cu ajutorul modelelor dezvoltate în scopul optimizării și îmbunătățirii lor, pentru a maximiza eficiența întregului sistem energetic. Obiectivul final este de a dezvolta o soluție integrată, capabilă să contribuie eficient la tranziția energetică globală către surse regenerabile.



## 1.2. Obiective

Obiectivul proiectului este de a realiza in mediul MATLAB-Simulink un model, usor de prototipat si configurat, cu scopul de a facilita simularea si testarea algoritmilor MPPT, in vederea cresterii eficientei intregului ansamblu. Sistemul este compus din: modulul fotovoltaic, convertorul de putere si un sistem de stocare a energiei, reprezentat de baterie.

### 1.2.1. Obiective generale

*a.) Dezvoltarea de modele matematice pentru componentele sistemului si implementarea lor in mediul MATLAB-Simulink*

*b.) Implementarea algoritmilor de urmarire a punctului de putere maxima (MPPT)*

*c.) Simularea si testarea intregului ansamblu in varii conditii de functionare*

### 1.2.2. Obiective specifice

*a.) Analiza comportamentului celulei fotovoltaice*

Analiza comportamentului fizic al celulei fotovoltaice in vederea implementarii unui model care sa reprezinte caracteristicile sistemului real.

*b.) Modelarea ansamblului fotovoltaic, parametrizarea si simularea acestuia*

Dezvoltarea unui model matematic bazat pe circuitul echivalent sistemului real, parametrizarea acestuia pe baza datelor tehnice si implementarea in mediul MATLAB/Simulink. Acest lucru ne ofera posibilitatea de a simula comportamentul oricarui ansamblu fotovoltaic, pornind de la fisa tehnica a acestuia.

*c.) Proiectarea si modelarea convertoarelor de putere*

Analizarea diferitelor topologii de convertoare si proiectarea acestora, alegand parametrii necesari cerintelor sistemului. Dezvoltarea modelului matematic si implementarea acestuia in mediul MATLAB/Simulink.

*d.) Aplicarea si testarea algoritmilor de urmărire a punctului de putere maximă*

Implementarea algoritmilor MPPT in MATLAB si testarea performanțelor prin simulări.

*e.) Modelarea si simularea unui sistem de stocare de energie cu baterii*

Dezvoltarea modelelor in mediul Matlab/SIMULINK pornind de la modelul matematic al circuitului echivalent, identificarea si parametrizarea modelului pentru a corespunde celulei reale.

### 1.3. Specificații

#### 1.3.1. Parametrizarea componentelor

##### **Modulul fotovoltaic**

În cazul celulei fotovoltaice parametrii circuitului echivalent, vor trebui descriși cu acuratețe pentru a obține o caracteristică reprezentativă.

##### **Convertoare de putere**

Factorii luați în calcul la modelarea convertoarelor de putere pot cuprinde: capacitățile și rezistențele, eficiența, dar și pierderile de comutație.

##### **Sistemul de stocare al energiei**

Pentru ca un model de baterie să fie apropiat de realitate, parametrii componente trebuie identificați în funcție de o celulă reală, care mai apoi poate fi scalată la capacitatea dorită.

#### 1.3.2. Funcționalități

##### **Modelul celulelor fotovoltaice utilizând circuitul echivalent**

Modelul ne oferă caracteristicile necesare calculului punctului de putere maximă cât și a performanțelor sistemului.

##### **Modelul convertorului DC/DC**

Acest model ne ajută să aflăm puterea și eficiența panoului în urma aplicării algoritmului de control.

##### **Modelul bateriei**

Modelul bateriei ne oferă o imagine de ansamblu asupra capacității de stocare a sistemului și a longevității acestuia.

##### **Scalabilitate**

Organizarea întregului sistem în subcomponente oferă o flexibilitate crescută în alegerea diferitelor topologii, servind astfel mai multor soluții.

#### 1.3.3. Performanțe

##### **Precizia modelului**

Modelul trebuie să reflecte cu acuratețe caracteristicile și comportamentul sistemului real. De aceea este foarte importantă alegerea corectă a parametrilor și urmărirea corectitudinii rezultatelor obținute în urma simulărilor.

#### 1.3.4. Limitări

Complexitatea fiecărei componente cât și performanțele platformei pe care modelul rulează, vor influența timpul de simulare. Timpul de simulare reprezintă un factor limitant în vederea unor simulări la nivel larg, și astfel impactează și scalabilitatea.

# Capitolul 2

## Studiu Bibliografic

### 2.1. Modulul fotovoltaic

#### 2.1.1. Introducere: Celule fotovoltaice

Importanța energiei solare în rândul surselor de energie regenerabile se remarcă prin impactul minim asupra mediului înconjurător, asemănător cu cel al energiei eoliene și hidro. Un alt avantaj prin care se remarcă energia solară în comparație cu energia eoliană și hidro este costul mult mai redus, însă marele dezavantaj față de acestea, precum și față de sursele convenționale bazate pe combustibili fosili, este eficiența redusă. De aceea, creșterea eficienței acestor sisteme prin algoritmi de urmărire este un domeniu foarte important.

Această abordare bazată pe modele este cea mai des utilizată în literatura de specialitate pe această temă. Principalul motiv este ușurința cu care se pot crea topologii noi și se pot scala sisteme, permițând reprezentarea atât a sistemelor de dimensiuni mici, cât și a parcurilor fotovoltaice.

Pentru a putea implementa și îmbunătăți acești algoritmi, este necesar un model al panoului fotovoltaic care să fie eficient, bine parametrizat și să aibă un comportament cât mai apropiat de cel al sistemului real. Pornind de la celula fotovoltaică, putem scala modelul pentru a reprezenta întregul ansamblu fotovoltaic, format din celule conectate în serie și paralel.

Tehnologiile de celule fotovoltaice pot fi clasate în: celule cu strat-gros, unde regăsim celule poli-cristaline și mono-cristaline, celule cu strat subțire (thin-film), sau semiconductoare (GaAs sau CdTe). Fiecare tehnologie are procesul propriu de fabricație și caracteristici proprii ce le definesc. Pentru a reprezenta aceste proprietăți în funcție de condiții variate de radiație solară și temperatură este necesar modelul lor. Cel mai important semiconductor folosit în fabricarea celulelor fotovoltaice este cel cristalin (cristal-Si), și în prezent domină piața de celule fotovoltaice. Este preferat deoarece prezintă o structură simplă.

Conductivitatea materialului depinde de lățimea benzii interzise și de valoarea energiei de activare a semiconductorului. În general, electronii tind să ocupe mai întâi benzile cu energie scăzută. Cu cât o bandă este mai plină, cu atât energia acesteia este mai mică. Benzile cele mai de sus, (cele aproape pline) formează ceea ce se numește banda de valență, iar cele de mai jos, (aproape goale) formează banda de conducție. Energia este definită de diferența dintre banda de valență și cea de conducție (lățimea benzii interzise). Absorbția luminii depinde de diferența dintre energia fotonului și cea a benzii interzise. Tensiunea la mers în gol și curentul de scurt circuit al panoului sunt influențate de acești

factori fundamentali ai semiconductoarelor. Aceste lucruri au fost prezentate în studiul făcut de Löper et al.[4].

Eficiența fiecărei tehnologii de celule este prezentată în figura de mai jos 2.1.

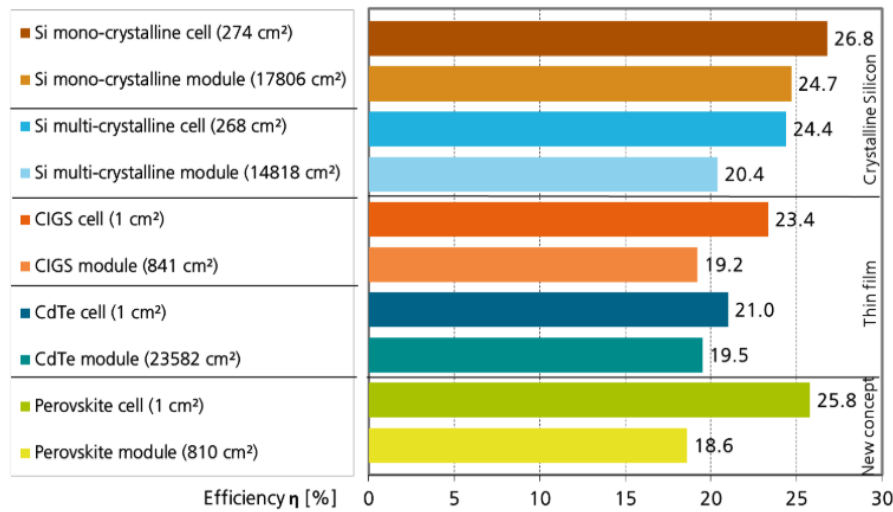


Figura 2.1: Comparație a eficienței tehnologiilor de celule și module fotovoltaice [5]

În ultimii ani a apărut un interes crescut față de modelarea și simularea sistemelor bazate pe panouri fotovoltaice. În literatură au apărut mai multe metode de modelare și parametrizare a modulelor fotovoltaice [6] [7] [8] [9]. Printre aceste metode remarcăm cea a circuitului echivalent cu una sau mai multe diode, modele empirice bazate pe date colectate din ferme solare și metode bazate pe algoritmi de căutare și algoritmi genetici.

În această lucrare am ales să abordez modelul circuitului echivalent cu o diodă al unui panou solar policristalin, modelarea și simularea acestuia au fost realizate folosind mediul *MATLAB/Simulink*.

## 2.2. Convertorul de putere

Algoritmii MPPT prezintă cea mai importantă parte în controlul eficienței instalațiilor de panouri solare. În literatură se găsesc mai multe tehnici de implementare a algoritmilor de urmărire a punctului de putere maximă folosind microcontrollere. Algoritmii nu presupun o implementare complexă, însă este nevoie de o bună cunoaștere a particularităților convertoarelor pentru a putea implementa acești algoritmi.

Modulul fotovoltaic produce un curent continuu necontrolat, ce fluctuează în funcție de schimbările de temperatură sau radiație solară. Convertorul de putere ne oferă posibilitatea de a controla tensiunea medie pe ieșire, astfel încât să fie egală cu valoarea dorită. Din punct de vedere energetic, reglarea tensiunii este realizată prin ajustarea constantă a cantității de energie absorbită din sursă și a celei injectate în sarcină. Aceste procese constituie ciclul elementelor de comutație, comanda pentru un astfel de sistem de reglare va fi acel factor de umplere.

Astfel convertorul va funcționa în două moduri: cel de conducție continuă și cel de conducție discontinuă. Pentru a proiecta un convertor adecvat aplicației noastre, trebuie

să alegem componentele externe ale convertorului: inductanța, dioda, condensatorul și elementul de comutație.

Convertoarele cel mai des folosite pentru acest tip de aplicații sunt: convertorul ridicător (Boost), convertorul inversor (Buck-Boost) sau convertorul Cúk.

În literatura de specialitate se regăsesc diverse modalități de modelare a convertoarelor de putere [10] [11], printre cele mai importante fiind modelele hibride și cele care iau în considerare și pierderile. Analiza modelelor care includ pierderile fiind realizată în aceleași condiții ca și modelele inițiale, cu adăugarea elementelor parazite pentru a reflecta mai bine comportamentul sistemului real.

## 2.3. Tehnici de Modelare si Simulare

Tehnicile numerice pentru soluționarea ecuațiilor diferențiale sunt esențiale pentru studiul și analiza comportamentului sistemelor fizice și electrice ce compun sistemul nostru. Implementarea acestora, sau alegerea metodei potrivite din cele oferite de mediul *MATLAB/Simulink* constituie o parte extrem de importantă în testarea și validarea rezultatelor obținute în urma modelării matematice a subcomponentelor.

În cartea de Isaacson și Keller [12], este studiată eficiența diferitelor metode numerice de soluționare a ecuațiilor diferențiale. Capitolul în care este prezentat studiul metodelor de rezolvare a ecuațiilor diferențiale ordinare *ODE*, începe cu ilustrarea unei probleme generale de ordinul întâi, pentru a ilustra importanța acurateței de aproximare a metodei utilizate, stabilitatea și fezabilitatea de implementare a lor.

Este prezentată metoda bazată pe aproximarea derivatei (Metoda Euler-Cauchy). Această metodă aproximează soluția în puncte discrete și calculează iterativ următorul punct folosind panta punctului curent. Sunt discutate probleme importante precum alegerea pasului și a ordinului metodei.

Următoarele metode prezentate sunt cele multipas ce au la bază formule de cuadratură, și cele monopas bazate pe serii Taylor sau Runge-Kutta bazate pe cuadraturi gaussiene. În cadrul secțiunii pe metode multipas sunt prezentate metode de estimare a erorii combinând corecția și predicția pentru o mai bună acuratețe, și folosirea unui pas variabil, ce poate fi folositor în regiuni unde soluția se modifică rapid. În cadrul secțiunii pe metode monopas, este prezentată eficiența crescută și motivul alegerii acestei metode, și anume cazul în care o acuratețe mare la fiecare pas nu este necesară. Metodele bazate pe cuadraturi, sunt prezentate ca un avantaj oferind o acuratețe mai mare, integrând pe un interval mai redus. Metodele numerice disponibile în *MATLAB/Simulink*, *ode23*, *ode23s*, *ode23tb* sunt bazate pe formulele Runge-Kutta cu diferite reguli aplicate și ajustări. Metoda *ode23tb* ofera o eficiența mai mare din punctul de vedere al toleranțelor.

Analiza expusă a metodelor numerice a oferit un punct de plecare excelent în alegerea metodelor folosite în simularea modelelor noastre. Am luat în considerare importanța consistenței, stabilității și a convergenței algoritmului ales.

Aceste aspecte au fost extrem de importante în rezolvarea problemelor pe care le-am întâmpinat în modelarea, testare și validarea convertoarelor, ce conțin elemente de comutație, și impun o grijă deosebită în construirea modelului și alegerea metodei numerice.

În această lucrare, convertorul modelat în scopul implementării sistemului fotovoltaic este cel ridicător (Boost), datorită avantajelor sale și a popularității în aplicațiile de energie regenerabilă. Capacitatea convertorului ridicător de a amplifica tensiunea și de a menține eficiența ridicată în condiții de variație a sarcinii și a tensiunii de intrare, îl fac esențial maximizării performanței și a fiabilității sistemului nostru.

## 2.4. Algoritmi de urmărire a punctului de putere maximă

Printre strategiile propuse în literatură, de urmărire a punctului de putere maximă se remarcă: Perturb and Observe (*P&O*), Incremental Conductance, Constant Voltage (*CV*) și algoritmi meta-euristici sau hibridi.

Articolul [13], propune o tehnică îmbunătățită a algoritmului *Perturb and Observe* cu pas adaptiv pentru urmărirea eficientă a MPP, în condiții de umbrire parțială. Condițiile de umbrire parțială reprezintă un subiect important de studiu în literatura de specialitate, deoarece acestea constituie o provocare majoră în creșterea eficienței sistemelor fotovoltaice. Algoritmul propus ia în considerare patru cazuri de umbrire parțială: slabă, moderată și două niveluri de umbrire puternică. Fiecare caz a fost aplicat separat și utilizat în acordarea algoritmului pentru a asigura o testare robustă și cuprinzătoare. Performanțele au fost comparate cu cele ale algoritmului convențional *PEO* și algoritmul Incremental Conductance. Rezultatele au arătat performanțe ridicate fără a crește complexitatea sau timpul de convergență.

Lucrarea [14] evaluează algoritmul Incremental Conductance și propune o variantă îmbunătățită, ce folosește un pas de mărime variabilă. Algoritmul propus reglează automat mărimea pasului pentru a urmări punctul de putere maximă, utilizând un coeficient de ajustare și elimină necesitatea unei constante predefinite de utilizator. În introducerea lucrării mai sunt menționate și alte metode tradiționale, precum cele *PEO* și *hill climb*, precizând că acestea au probleme legate de pierderi de putere și eficiență.

În articolul [15] sunt propuși algoritmi euristici, Grey Wolf și Particle Swarm pentru a urmări punctul de putere maximă cu oscilație scăzută în jurul punctului de echilibru. Acești algoritmi sunt printre cei mai eficienți din acest punct de vedere. În articol algoritmi propuși sunt comparați individual, apoi combinați și utilizați într-o metodă hibridă care dă rezultate mai bune din punctul de vedere al timpului de răspuns și al eficienței în urmărire.

Prin metodele noi apărute de urmărire a punctului de putere maximă se remarcă cele metaeuristice și cele bazate pe rețele neuronale artificiale. Acești algoritmi au fost dezvoltați cu scopul de a combate problema umbririi parțiale a panourilor fotovoltaice. Problema umbririi parțiale constă în schimbarea dinamicii panoului 2.2, respectiv a caracteristicii de curent-tensiune și putere-tensiune. În cazul unei iradierii uniforme, problema *MPPT* este una convexă, iar algoritmi convenționali reușesc să aducă panoul la punctul de putere maximă, însă în cazul umbririi parțiale acești algoritmi converg aproape de fiecare dată la un maxim local din cauza limitării lor.

Algoritmi metaeuristici își propun să rezolve această problemă prin evitarea convergenței în punctele de maxim local, fără a garanta totuși convergența spre un maxim global. Astfel, putem contura câteva dezavantaje ale metodelor metaeuristice, ce constau în:

- Nevoia de a actualiza mai multe soluții în fiecare iterație pentru a ajunge la soluția dorită, astfel crescând costul de calcul.

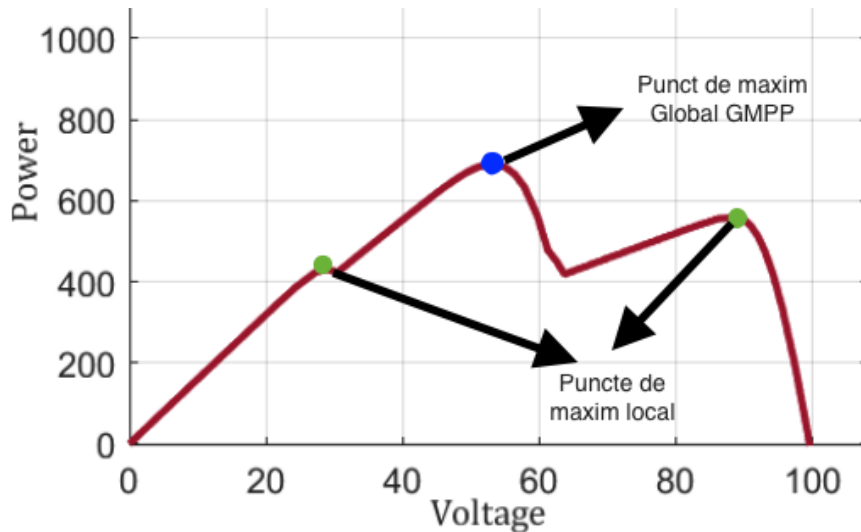


Figura 2.2: Caracteristica P-V în condiții de umbră parțială

- Mai multe metode prezintă o viteză de convergență lentă către punctul de putere maximă.
- Nu în ultimul rând, pentru a îmbunătăți capabilitățile de căutare, algoritmi presupun stohasticitate în alegerea diferitelor regiuni din spațiul de căutare, astfel ajungând să caute în regiuni cu putere scăzută, coborând considerabil eficiența sistemului.

În lucrarea [16] se propune un algoritm meta-euristic pentru a aborda dezavantajele menționate anterior. Algoritmul restrânge spațiul de căutare în jurul punctului optim pentru a evita explorarea regiunilor cu putere redusă și pentru a diminua costul computațional. În prima etapă, se inițializează patru valori pentru factorul de umplere și se evaluează puterea asociată fiecăreia. În urma determinării valorii cu puterea cea mai mare, factorul de umplere corespunzător acelei valori este selectat ca valoare inițială. Spațiul de căutare al factorului de umplere optim este mărginit pentru a reduce numărul de iterații. În urma căutării, se compară puterile factorului de umplere inițial și a celui găsit și se determină regiunea în care se va afla punctul optim. În urma acestei căutări, fereastra determinată în urma restrângerilor este concavă. În cadrul acestui spațiu de căutare se aplică un algoritm metaeuristic pentru a găsi punctul de maxim global.

## 2.5. Sisteme de stocare a energiei

### 2.5.1. Bateria

Nevoia de sisteme de stocare de mici dimensiuni, ușoare și cu ciclu de viață prelungit a crescut considerabil în ultimii ani, mai ales datorită creșterii energiei verzi în fața celei convenționale.

Printre tipurile cele mai întâlnite de baterii găsim bateriile litiu-polimer și litiu-ion. Acestea sunt printre cele mai robuste și cu ciclul de viață cel mai lung dintre bateriile convenționale.

Majoritatea aplicațiilor de dimensiuni mari necesită baterii robuste cu o mentenanță minimă. Aici se regăsesc bateriile plumb-acid. Aceste baterii sunt mult mai ineficiente din punctul de vedere al energiei stocate, sunt mult mai grele și sunt susceptibile la fe-

nomenul de sulfare în condiții de descărcare completă, ceea ce poate duce la distrugerea bateriei. Însă bateriile plumb-acid sunt ieftine, robuste și nu suferă din cauza supraîncărcării, având un 'sistem' intern de echilibrare a sarcinii. Mai mult, rezistența internă scăzută permite bateriei plumb-acid să furnizeze curenți mari.

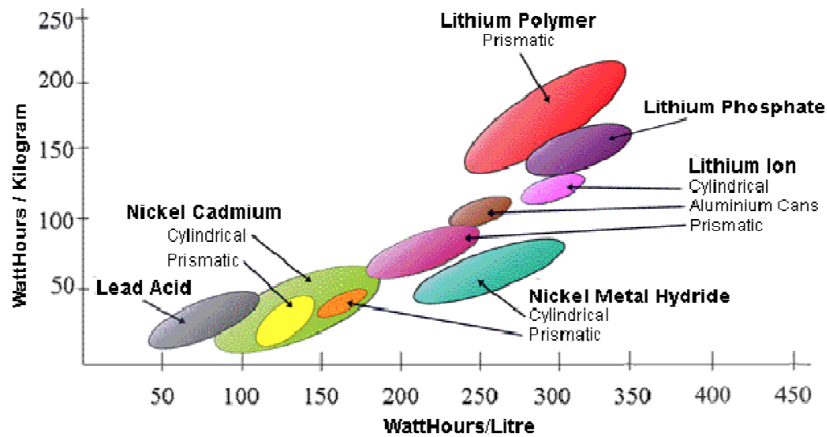


Figura 2.3: Grafic ce prezintă densitatea de energie a diferitelor tehnologii de baterii [17]

În graficul de mai sus se poate observa capacitatea de stocare a bateriilor de litiu în comparație cu celelalte tehnologii.

Principiul de operare al bateriei se bazează pe proprietatea celulei electrochimice de a transforma energia chimică în energie electrică și invers. Principalii constituenți ai unei celule de litiu-ion sunt: anodul (ce oxidează), catodul (ce se reduce) și un electrolit. Când celula este conectată la o sarcină, începe reacția chimică redox ce transferă electroni de la anod la catod [17].

Comportamentul bateriei poate fi modelat utilizând un circuit electric echivalent. Scopul modelului este de a estima performanțele bateriei și de a avea o imagine de ansamblu asupra parametrilor bateriei pe parcursul ciclului de viață. Mai mult, în cazul aplicațiilor cu panouri fotovoltaice, un astfel de model este esențial în creșterea eficienței întregului sistem. În special pentru aplicațiile din locații izolate fără acces la rețeaua electrică, unde sistemele de stocare a energiei devin indispensabile, asigurând continuitatea furnizării energiei și stabilitatea sistemului.



# Capitolul 3

## Analiza, Proiectarea și Implementarea Subcomponentelor

În această parte a lucrării se vor prezenta detalii aprofundate privind analiza, proiectarea și implementarea unui model de sistem fotovoltaic cu stocare de energie, precum și implementarea și testarea algoritmilor MPPT pentru eficientizarea sistemului.

În prima secțiune va fi descrisă analiza sistemului și a fiecărei componente în parte, precum și pașii premergători modelării acestora și alegerea unor algoritmi potriviți de control pentru sistemul nostru. Aceste decizii au fost luate cu ajutorul informațiilor acumulate în urma realizării studiului bibliografic.

În cea de-a doua secțiune se va detalia implementarea practică în mediul MATLAB/Simulink a întregului sistem, comportamentul și modalitățile de simulare. În următorul capitol se va detalia și metodologia de testare și validare a rezultatelor obținute, atât pentru fiecare componentă în parte, cât și pentru întregul sistem.

### 3.1. Circuitul echivalent al modulului fotovoltaic

Pornind de la legile ce guvernează funcționarea panoului fotovoltaic și producția sa de energie, putem dezvolta un model matematic care să descrie cu o acuratețe cât mai bună fenomenele implicate și să producă rezultate apropiate de cele ale sistemului real.

#### 3.1.1. Modelul mono-diodă al celulei fotovoltaice

Modelul mono-diodă al modulului fotovoltaic este afișat în Figura 3.1. Acesta este folosit pentru a determina caracteristicile curent-tensiune folosind fie 4 fie 5 parametri. Proiectarea lor pornește adesea de la fișa tehnică oferită de producător, în condiții standard de testare (STC - Standard test condition - la  $1000W/m^2$  și  $25^\circ C$ )

$$I = I_L - I_o \left[ \exp \left( \frac{V + IR_S}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (3.1)$$

unde  $I_o$  este curentul de saturație al diodei,  $a$  este factorul de idealitate al diodei, iar  $V_t = \frac{kT}{q}$  reprezintă tensiunea termică. Parametrul  $k$  este constanta lui Boltzmann ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K),  $q$  este sarcina electronului ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C), iar  $T$  este temperatura modulului fotovoltaic în Kelvin [18].

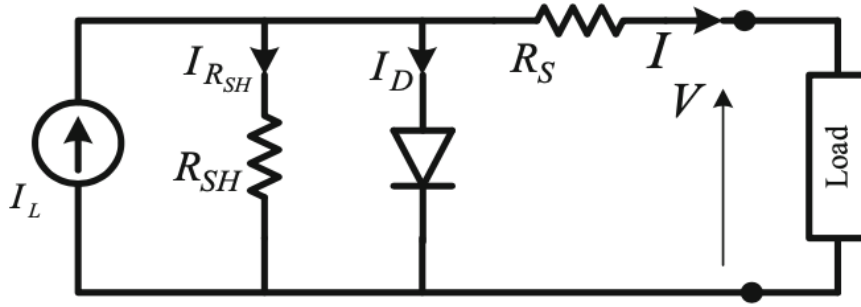


Figura 3.1: Circuitul echivalent mono-diodă al modului PV

Modelul constă în sursa de fotocurent, diodă și rezistoare. Cele mai întâlnite topologii de circuite echivalente sunt cele mono-diodă și dublă-diodă. Cel mono-diodă constă în 5 parametri, reprezentați de: curentul PV, curentul de saturație al diodei, factorul de idealitate, rezistența serie și rezistența paralel. Acest model are rezultate acceptabile în acuratețea cu care estimează sistemul real, având și avantajul unui cost de calcul redus.

### 3.1.2. Modelul dublă-diodă al celulei fotovoltaice

Modelul mono-dioda considera un factor de idealitate ( $a$ ) constant. În practica, acest factor variaza cu tensiunea, la tensiuni mari factorul de idealitate este mai aproape de 1, iar la tensiuni mici aceste se apropie de 2.

Modelul dublă-diodă oferă o acuratețe mai mare în reprezentarea caracteristicilor comparativ cu modelul mono-diodă, în special în condiții de iradiere și temperaturi scăzute[19]. Acest model a fost studiat extensiv, în literatura apar o mulțime de metode pentru determinarea modelelor matematice și parametrizarea celulei solare.[8] Expresia ce descrie modelul dublă-diodă este astfel:

$$I = I_L - I_{o1} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_S}{aV_t} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_S}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (3.2)$$

Însă dificultatea în a determina parametrii cu acuratețe și faptul că modelul este mai complex decât cel cu o singură diodă fac mult mai fezabilă folosirea modelului mono-diodă și îmbunătățirea acestuia.

Caracteristicile I-V obținute în urma simulărilor realizate pe baza acestor modele sunt extrem de utile în tehnicile de urmărire a punctului de putere maximă. Punctul de putere maximă(MPP) și tensiunea corespunzătoare acestuia ( $V_{MPP}$ ) se modifică în funcție de schimbările de temperatură sau insolație, după cum se observă în Figura 3.2.

În literatura mai apar și modele empirice dezvoltate pe baza unor seturi de date consistente. Acești factori empirici sunt determinați prin potriviri liniare a sute de caracteristici I-V, la diferite nivele de insolație și temperatură. Modelul cel mai des folosit în Statele Unite este cel King/Sandia, fiind cel mai precis în estimarea parametrilor panourilor cu diferite tehnologii și în condiții variabile [20].

Luând în considerare modelele prezentate mai sus, și faptul că rezultatele obținute

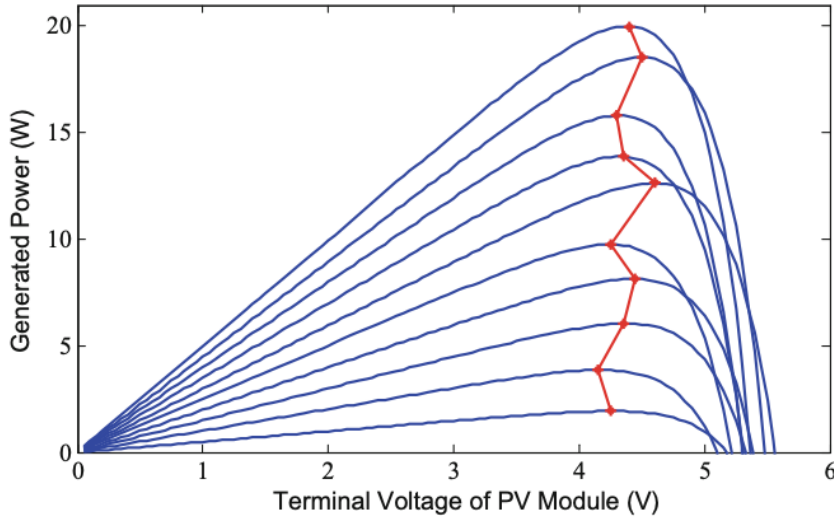


Figura 3.2: Punctul de putere maximă pe caracteristicile P-V cu variația temperaturii și a insolației

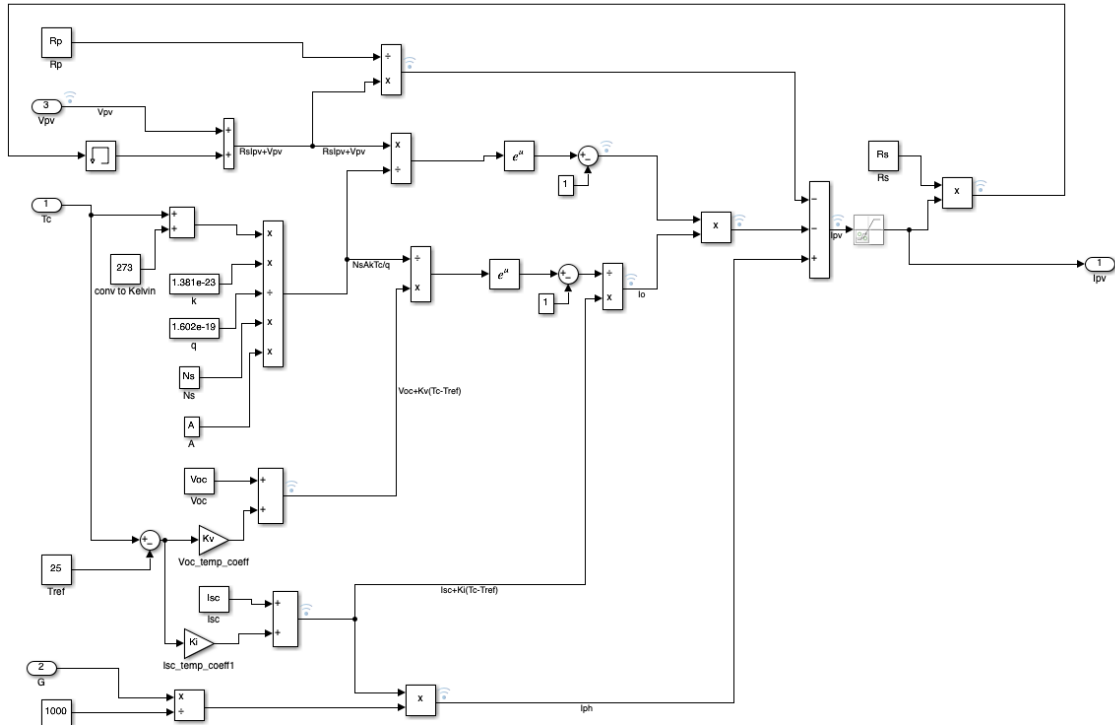
folosind modelul cu o singură diodă sunt comparabile cu cele reale, în ciuda complexității sale reduse, putem concluziona că modelul cu o singură diodă este opțiunea viabilă pentru simularea comportamentului celulelor fotovoltaice.

Implementarea acestui model (3.3) a fost realizată în *Simulink*, în urma parametrizării elementelor circuitului echivalent. Abordarea aleasă în scopul modelării este cea cu blocuri, folosite pentru a reprezenta ecuațiile. Pentru a stoca parametrii, a fost creat un fișier în *MATLAB*.

Parametrii inițiali ai celulei fotovoltaice au fost extrași din fișa tehnică a unui panou uzual din industrie, TATA Power Solar TP250, în condiții standard de testare (STC):

Parametru	Valoare
Putere nominală (Rated_power) [W]	240
Curent de scurtcircuit ( $I_{sc}$ ) [A]	8.61
Tensiune la mers in gol ( $V_{oc}$ ) [V]	38.41
Coeficient de temperatură al $I_{sc}$ ( $K_i$ ) [%/K]	0.05
Coeficient de temperatură al $V_{oc}$ ( $K_v$ ) [%/K]	-0.32
Rezistența serie ( $R_s$ ) [Ohm]	0.22
Rezistența shunt ( $R_p$ ) [Ohm]	415
Numărul de celule în serie ( $N_s$ )	60
Factorul de idealitate al diodei ( $A$ )	1.3
Temperatura de referința ( $T_{ref}$ ) [K]	298
Iradieria solară de referință ( $G_{ref}$ ) [ $W/m^2$ ]	1000

Tabela 3.1: Parametrii modelului PV


 Figura 3.3: Modelul modului fotovoltaic în *Simulink*

## 3.2. Conversoare de putere

### 3.2.1. Introducere: Surse de alimentare în comutație

*SMPS* (*Switched Mode Power Supply*) reprezintă sursele de alimentare în comutație. Acestea sunt circuite electronice care controlează ieșirea de la o sursă de curent continuu, oferind avantaje clare față de regulatoarele liniare. Printre acestea se numără eficiența sporită și capacitatea de a lucra cu puteri mari. Conceptul constă în folosirea elementelor de comutație (tranzistoare de putere), controlând raportul on/off (*duty cycle*) al acestor elemente.

În figura 3.4 este prezentată structura de bază a unui circuit pentru *SMPS*. Factorul de umplere  $D$  se definește ca :  $D = t_{on}/T_s$

$$V_O = DV_d \quad (3.3)$$

Unde  $V_d$  este tensiunea de intrare de la o sursă de curent continuu. Din moment ce relația din Ec. (3.3) este liniară, ieșirea poate fi modificată liniar controlând factorul de umplere  $D$ . Un circuit de netezire (filtru trece-jos) poate fi adăugat pentru a obține o undă continuă (DC) în locul celei dreptunghiulare prezentate în Fig. 3.4.

### 3.2.2. Modelarea SMPS și topologii

În literatura se regăsesc diferite topologii și tehnici de modelare ale surselor de alimentare în comutație. Fiecare topologie urmărește atingerea unor obiective de performanță specifice, ținând cont de:

- Rezistența serie a comutatorului on/off.
- Componentele filtrului trece-jos utilizate pentru a netezi tensiunea de ieșire DC.

- Pierderile în comutatoare la frecvențe înalte; o frecvență de comutare ridicată rezultă în dimensiuni mai mici pentru inductanță și condensator. Pe de altă parte, comutarea la frecvențe înalte poate adăuga pierderi de putere și zgomot electric în interiorul circuitului.

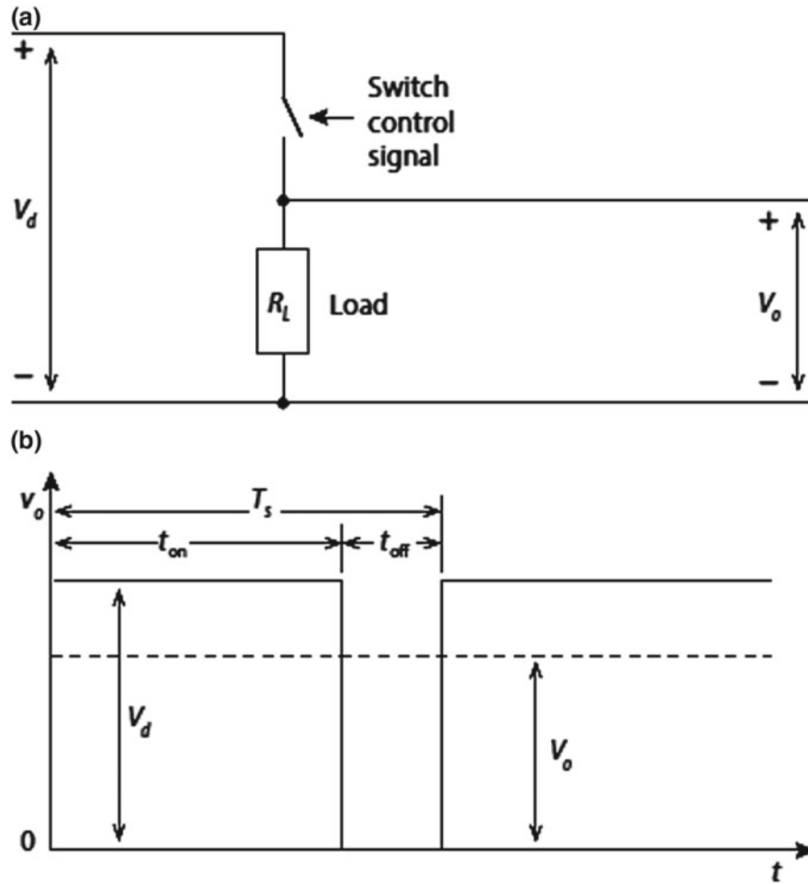


Figura 3.4: Circuit de bază pentru *SMPS* [19]

### 3.2.3. Alegerea topologiei SPMS

Fiecare topologie are caracteristici proprii care o fac fezabilă unei anumite aplicații. Pentru a alege o topologie pentru o anumită aplicație, e esențial să cunoaștem modul de operare, avantajele, dezavantajele, complexitatea și scopul pentru care se folosește acea topologie particulară.

În funcție de valoarea tensiunii de ieșire, care poate să fie mai mare sau mai mică decât întregul interval al tensiunii de intrare, determină dacă topologia ar trebui să fie de tip buck sau buck-boost.

Fiabilitatea și robustețea circuitului depinde de alegerea unei topologii corespunzătoare în funcție de mărimea tensiunii sau curentului de intrare-ieșire și valoarea maximă a factorului de umplere.

### 3.3. Convertorul Boost

Convertorul boost este un convertor  $DC/DC$  care produce o tensiune la ieșire mai mare decât tensiunea de intrare  $V_{IN}$ . În această topologie, inductanța ( $L$ ) este utilizată pentru a stoca energia de la intrare atunci când MOSFET-ul ( $Q_1$ ) este pornit. Cu  $Q_1$  închis pentru o perioadă  $T_{ON}$ , curentul prin  $L$  crește liniar de la valoarea sa curentă  $T_{ON}$  la  $I_{L2}$ , așa cum este prezentat în figura 3.5, iar curentul de sarcină de ieșire  $I_{OUT}$  este furnizat la descărcarea condensatorului  $C_O$ . Valoarea condensatorului trebuie să fie suficient de mare pentru a furniza curentul de sarcină în timpul perioadei ON și pentru a menține tensiunea la ieșire constantă (cu riplu minim).

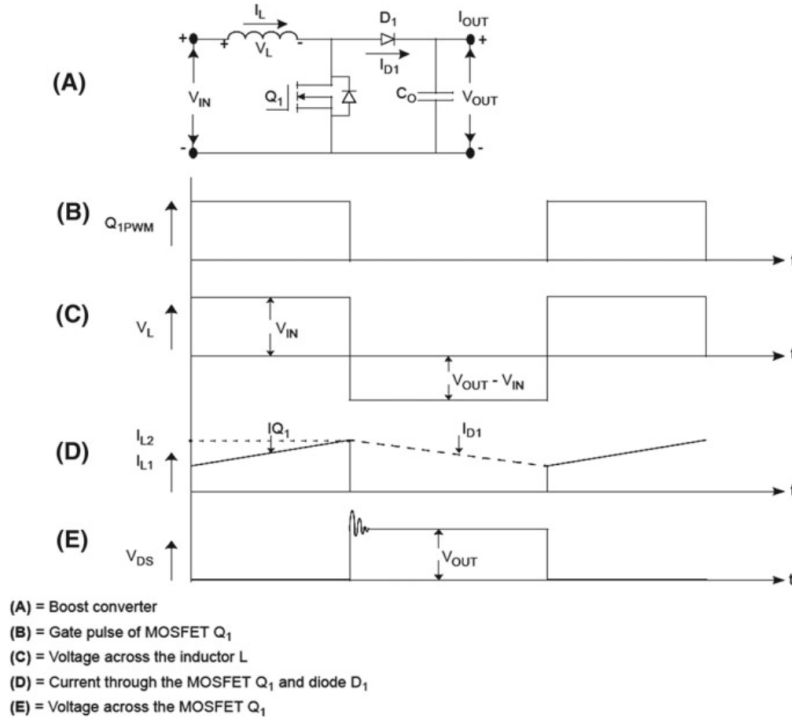


Figura 3.5: Convertorul boost [19]

În timpul perioadei OFF,  $L$  furnizează energia stocată la sarcină, iar tensiunea de sarcină în acest caz va fi egală cu tensiunea de intrare  $V_{IN}$  plus  $V_L$ . Dioda  $D_1$  permite curentului să treacă pe ramura condensatorului în timpul perioadei ( $T_{OFF}$ ).

$$V_{OUT} = V_{IN} + V_L$$

$$V_{OUT} = V_C$$

În perioada  $T_{ON}$ , tensiunea prin condensator este  $V_C$ . Prin controlul raportului ON/OFF (factor de umplere), putem obține  $V_{OUT} > V_{IN}$ , care este dat de:

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{1 - D} \quad (3.4)$$

Pe parcursul unui întreg ciclu curentul nu devine niciodată zero; convertorul funcționează în modul de conducție continuă. Dioda D1 asigură parcursul curentului pe aceeași direcție tot timpul.

$$I_{D1\text{RMS}} = I_{\text{RIPPLERMS}} + I_{\text{OUT}}I_{\text{RIPPLERMS}} = \sqrt{(ID1)^2 - (I_{\text{OUT}})^2} \quad (3.5)$$

Curentul de ondulație de tip root mean square (RMS) este dat de 3.5, calculat folosind forma de undă din figura 3.6 (D).

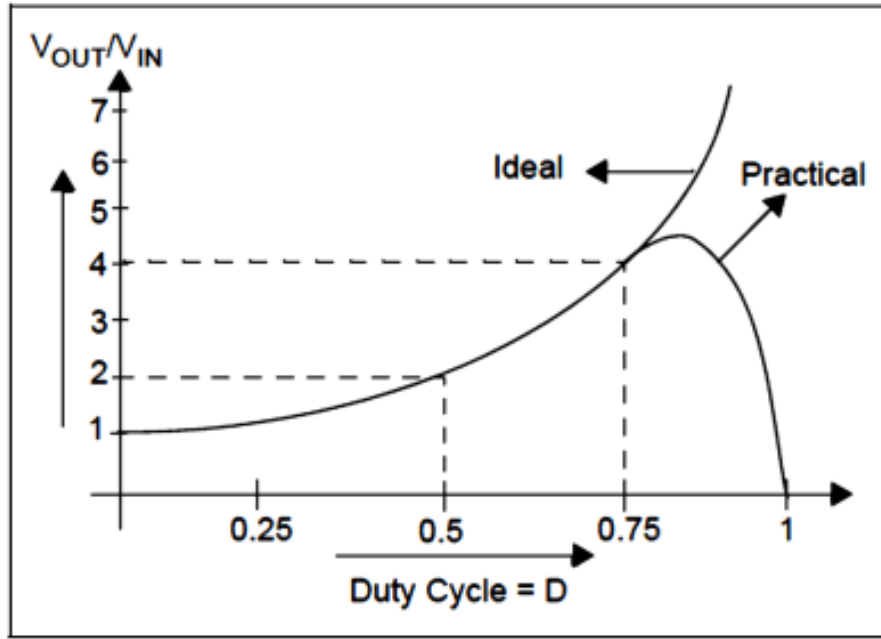


Figura 3.6: Raportul tensiunilor în funcție de factorul de umplere [19]

Un grafic pentru raportul  $\frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}}$  în funcție de factorul de umplere este prezentat în Fig. 3.6, pe baza Ec. 3.5 (curba ideală). Este prezentată și o curbă practică 3.7, care include comportamentul neideal al componentelor circuitului. Funcționarea la un  $D$  mai mare de 0.75 este nepractică din cauza pierderilor în timpul perioadelor OFF.

### 3.3.1. Convertorul buck-boost

Dacă se combină atât buck, cât și boost, se obține un convertor buck–boost. Într-un convertor buck–boost, tensiunea de ieșire poate cobori sub intervalul tensiunii de intrare, sau urca peste acesta.

Schema simplificată a unui convertor buck–boost este prezentată în Fig. ??, iar relația intrare-ieșire este dată de:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{DV_{\text{IN}}}{1 - D} \quad (3.6)$$

pentru:  $V_{\text{OUT}} < V_{\text{IN}}$ ,  $D < 0.5$  în timp ce pentru  $V_{\text{OUT}} > V_{\text{IN}}$ ,  $D > 0.5$ .

### 3.3.2. Ecuțiile necesare implementării convertorului boost

Următoarele ecuații vor fi folosite în proiectarea și implementarea convertorului folosit în mediul MATLAB/Simulink.

#### Intervalul I: tranzistor saturat, diodă blocată

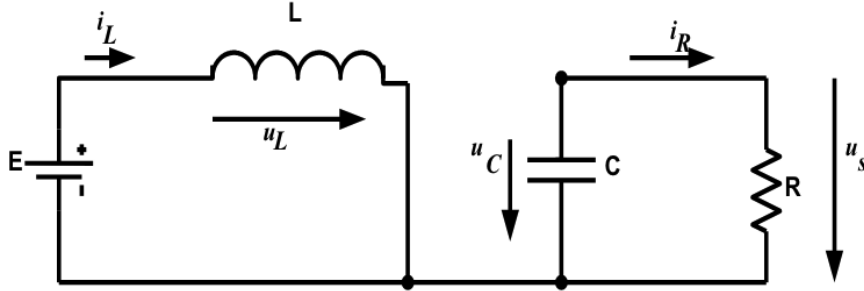


Figura 3.7: Circuitul echivalent al convertorului boost pentru tranzistor saturat

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \quad (3.7)$$

$$\frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{R \cdot C} \quad (3.8)$$

#### Intervalul II: Tranzistor blocat, diodă în conducție

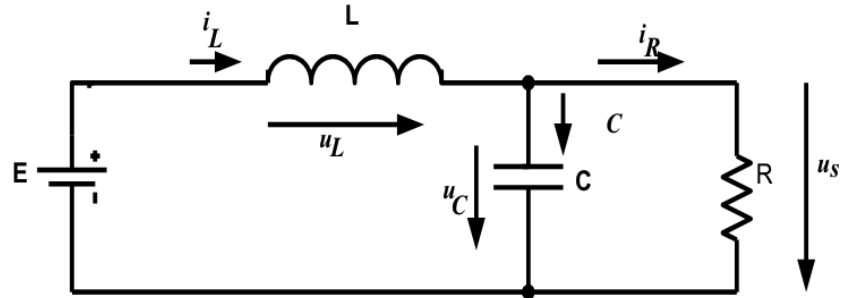


Figura 3.8: Circuitul echivalent al convertorului boost pentru tranzistor blocat

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E - u_s}{L} \quad (3.9)$$

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L - \frac{u_s}{R} \right) \quad (3.10)$$



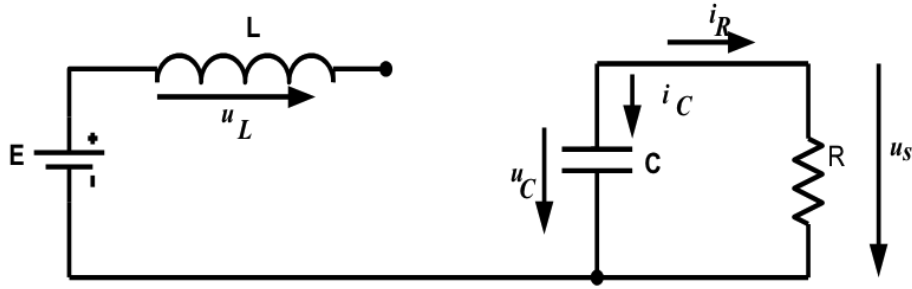
**Intervalul III: Tranzistor blocat și diodă blocată**


Figura 3.9: Circuitul echivalent al convertorului boost pentru regim intrerupt

$$\frac{di_L}{dt} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{R \cdot C} \quad (3.12)$$

**3.4. Conversoare DC/DC în rolul implementării MPPT**

Printre cele mai importante aplicații ale conversoarelor DC/DC se regăsește urmărirea punctului de putere maximă, în special pentru aplicații unde sursa de energie o reprezintă panourile solare.

Topologia aleasă poate fi oricare dintre cele menționate mai sus. O buclă de reglare este impusă pentru a menține punctul de putere maximă, iar dacă aceasta este acordată corespunzător, va menține transferul de putere maximă în ciuda variațiilor de temperatură, insolație și de sarcină.

Spre exemplu: Pentru un modul PV punctul de putere maximă se află la  $V_{MPP} = 17V$  și  $I_{MPP} = 6A$  la un nivel dat de iradiere solară. Modulul trebuie să alimenteze o sarcină cu o rezistență  $R_L = 10\Omega$ . Astfel putem calcula factorul de umplere  $D$  corespunzător convertorului DC/DC cu topologia buck-boost.

Puterea maximă a modului este obținută din relația :

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP} = 102W. \quad (3.13)$$

Iar pentru a afla puterea disipată pe rezistență vom calcula :  $P_L = \frac{V_L^2}{R_L}$ , de unde rezulta  $V_L = 31.94 V$ . Factorul de umplere  $D$  este calculat cu relația 3.6, de unde rezulta ca  $D = 0.65$ .

### 3.5. Proiectarea convertorului boost

În vederea proiectării convertorului boost am folosit relațiile de calcul ale inductanței, condensatorului de ieșire și a valorii raportului de transfer în tensiune.

Din condiția ca  $i_{L_{\min}} \geq 0$  rezultă:

$$\frac{2L}{R \cdot T} \geq D \cdot (1 - D)^2; \quad (3.14)$$

Această relație poate fi utilizată și pentru determinarea valorii minime a bobinei, în condițiile în care se cunoaște perioada de comutație  $T$  și valoarea rezistenței de sarcină  $R$ .

$$L_{\min} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot D \cdot (1 - D)^2; \quad (3.15)$$

În modul de conducție discontinuă, se notează cu  $M = U_S/E$  raportul de transfer în tensiune a circuitului. Valoarea acestuia este:

$$M(M - 1) = \frac{D^2 \cdot T \cdot R}{2 \cdot L}; \quad (3.16)$$

Rezolvând ecuația obținem:

$$M = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot D^2 \cdot T \cdot R}{2L}}}{2}; \quad (3.17)$$

Un alt parametru important de determinat în urma analizei convertoarelor în comutație, îl constituie valoarea condensatorului de filtraj, necesar pentru a obține un anumit riplu al tensiunii de ieșire.

$$C = \frac{(I_{L_{\max}} - I_s)^2 \cdot T(1 - D)}{2(I_{L_{\max}} - I_{L_{\min}})} \quad (3.18)$$

Parametrii convertorului au fost calculați luând în considerare tensiunea produsă de panoul fotovoltaic, curentul de care avem nevoie și riplul maxim pe care dorim să îl avem.

În vederea proiectării convertorului boost s-au luat în considerare parametrii panoului fotovoltaic 3.1 și numărul de panouri din componenta sistemului, precum și aplicația specifică pentru care este proiectat convertorul.

În cazul unui scenariu în care sistemul nostru este destinat să alimenteze o sarcină de tipul aparatelor electrocasnice și al sistemelor de HVAC (pompe de căldură) al unei case, atunci se vor evalua cerințele de putere și tensiune ale acestei sarcini. Tensiunea comună a acestor consumatori DC este de 48 V. Cererea de putere va fi în jur de 500 W.

Vom presupune următoarele valori tipice pentru alimentarea aparatelor electrocasnice cu un convertor boost:

- Tensiunea de ieșire ( $V_{out}$ ): 48V (valoare comună pentru aplicații DC casnice)
- Puterea necesară sarcinii ( $P_{load}$ ): 500W (exemplu de putere a sarcinii)
- Tensiunea de intrare ( $V_{in}$ ): 30V (aproximativ  $V_{mpp}$  al panourilor PV)
- Frecvența de comutare ( $f_s$ ): 50 kHz
- Factor de umplere ( $D$ ): 0.38 (valoare inițială în scopul testării)

Pasul 1: Calculul rezistenței sarcinii ( $R$ )

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{load}}$$

$$R = \frac{48^2}{500} = 4.6 \Omega$$

Pasul 2: Calculul inductanței minime ( $L_{min}$ )

$$L_{min} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot D \cdot (1 - D)^2$$

$$T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{100 \times 10^3} = 10 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$L_{min} = \frac{4.6 \cdot 20 \times 10^{-6}}{2} \cdot 0.38 \cdot (1 - 0.38)^2$$

$$L_{min} = \frac{46 \times 10^{-6}}{2} \cdot 0.38 \cdot 0.62$$

$$L_{min} = 10.83 \times 10^{-6} \text{ H} = 10.83 \mu\text{H}$$

Pasul 3: Calculul condensatorului de ieșire ( $C$ )

$$C = \frac{(I_{Lmax} - I_s)^2 \cdot T \cdot (1 - D)}{2 \cdot (I_{Lmax} - I_{Lmin})}$$

$$I_s = \frac{P_{load}}{V_{out}} = \frac{500}{48} \approx 10.42 \text{ A}$$

$$C = \frac{(2 - 10.42)^2 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot (1 - 0.38)}{2 \cdot (2 - 0)}$$

$$C = \frac{(-8.42)^2 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot 0.62}{4}$$

$$C = \frac{514.5 \times 10^{-6}}{4}$$

$$C = 128.625 \times 10^{-6} \text{ F} = 128.625 \mu\text{F}$$

Parametrii determinați în urma calculelor :

- $L_{min} = 10.83 \mu\text{H}$
- $C = 128.625 \mu\text{F}$

Vom alege însă o valoare mult mai mare a inductanței pentru a minimiza curentul maxim și riplul.

Parametru	Valoare
Tensiunea de intrare (E) [V]	30
Valoarea inductanței (L) [H]	$350 \times 10^{-6}$
Valoarea capacității (C) [F]	$128.625 \times 10^{-6}$
Perioada de comutare (T) [s]	$10 \times 10^{-6}$

Tabela 3.2: Parametrii convertorului boost pentru primul scenariu

Într-un alt caz poate fi considerat scenariul proiectării sistemului nostru cu scopul de a servi drept o stație de încărcare pentru vehicule electrice. În acest caz tensiunea necesară va fi de 400 V, ar cererea de putere va fi în jur de 3.3 kW.

Calcululele necesare determinării parametrilor pentru această aplicație sunt următoarele:

- Tensiunea de iesire ( $V_{out}$ ): 400V
- Puterea necesara sarcinii ( $P_{load}$ ): 3.3 kW
- Input Voltage ( $V_{in}$ ): 60V (aproximativ  $V_{mpp}$  pentru panourile noastre)
- Frecventa de comutatie ( $f_s$ ): 100 kHz

Pasul 1: Calculăm Rezistența de sarcină ( $R$ )

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{load}}$$

$$R = \frac{400^2}{3300} = 48.48 \Omega$$

Pasul 2: Calculam valoarea minima a inductantei  $L_{min}$

$$L_{min} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot D \cdot (1 - D)^2$$

$$T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{100 \times 10^3} = 10 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$L_{min} = \frac{48.48 \cdot 10 \times 10^{-6}}{2} \cdot 0.38 \cdot (1 - 0.38)^2$$

$$L_{min} = \frac{484.8 \times 10^{-6}}{2} \cdot 0.38 \cdot 0.62$$

$$L_{min} = 57.1094 \times 10^{-6} \text{ H} = 57.1094 \mu\text{H}$$

Pasul 3: Calculam valoarea condensatorului ( $C$ )

$$C = \frac{(I_{Lmax} - I_s)^2 \cdot T \cdot (1 - D)}{2 \cdot (I_{Lmax} - I_{Lmin})}$$

$$I_s = \frac{P_{load}}{V_{out}} = \frac{3300}{240} = 13.75 \text{ A}$$

$$C = \frac{(2 - 13.75)^2 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot (1 - 0.38)}{2 \cdot (2 - 0)}$$

$$C = \frac{(-11.75)^2 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot 0.62}{4}$$

$$C = \frac{138.0625 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot 0.62}{4}$$

$$C = 106.75 \times 10^{-6} \text{ F} = 20.71 \mu\text{F}$$

Ca și în cazul primului scenariu vom alege o valoare a inductanței mai mare pentru a minimiza riplul.

Parametrii determinați în urma calculelor:

- $L_{min} = 8.945 \text{ mH}$
- $C = 106.75 \mu\text{F}$

Parametru	Valoare
Tensiunea de intrare (E) [V]	60
Valoarea inductanței (L) [H]	$894.5 \times 10^{-5}$
Valoarea capacității (C) [F]	$10.675 \times 10^{-5}$
Perioada de comutare (T) [s]	$10 \times 10^{-6}$

Tabela 3.3: Parametrii convertorului boost

Folosind ecuațiile prezentate în secțiunea 3.5 am implementat modelul convertorului boost în Simulink cu ajutorul blocului S-Function, ce ne permite să descriem funcționarea convertorului direct în cod C/C++. Aceste funcții definesc modul în care un bloc funcționează în timpul diferitelor părți ale simulării, cum ar fi inițializarea, actualizarea, derivarea, ieșirile și terminarea. La fiecare pas al unei simulări, o metodă este invocată de motorul de simulare pentru a îndeplini o sarcină specifică.

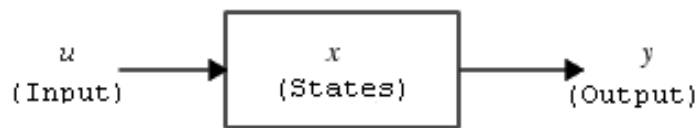


Figura 3.10: Structura blocului S-function in Simulink

Ecuțiile ce descriu relațiile matematice dintre intrări, ieșiri, parametrii, stări și timpul de simulare în cadrul unui S-Function sunt descrise astfel:

$$y = f_0(t, x, u) \quad (\text{Ieșiri})$$

$$\dot{x} = f_d(t, x, u) \quad (\text{Derivate})$$

$$x_{d,k+1} = f_x(t, x_c, x_{d,k}, u) \quad (\text{Actualizare})$$

$$\text{unde } x = [x_c; x_d]$$

Pe lângă metoda implementării unui S-Function, am folosit și metoda ce utilizează un bloc *Matlab Function*. Utilizatorul definește o funcție într-un script MATLAB, iar acest script poate fi inclus în blocul din Simulink pentru Simulare.

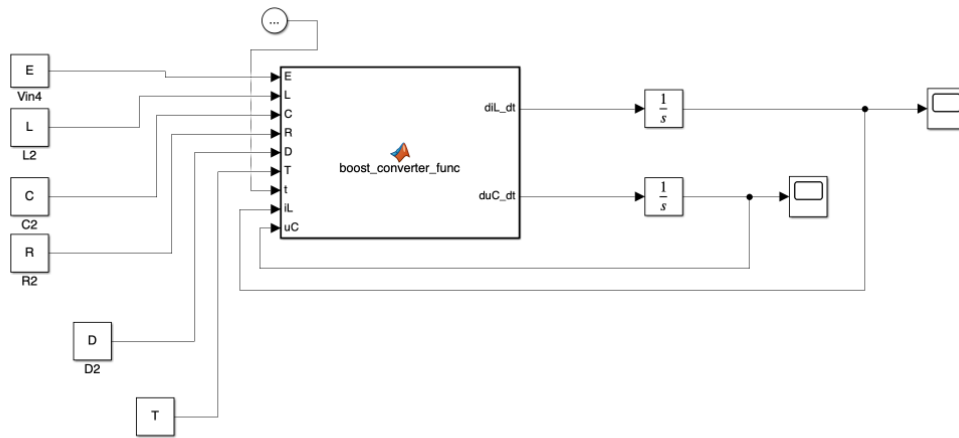


Figura 3.11: Blocul de funcție folosit în Simulink

### 3.6. Sisteme de stocare a energiei

În cadrul acestei lucrări, am ales să folosesc bateria ca sistem de stocare a energiei în scopul implementării sistemului. Bateriile de litiu sunt foarte populare în rândul soluțiilor de stocare a energiei produsă de panourile fotovoltaice datorită capacității lor de a stoca o cantitate mare de energie într-un volum mic și durată de viață mai mare. Un alt argument important în susținerea alegerii mele îl constituie eficiența energetică sporită a ultimelor tehnologii de baterii, și complexitatea scăzută în proiectarea, modelarea și scalarea sistemului.

#### 3.6.1. Ecuțiile ce definesc comportamentul bateriei

Bateria poate fi modelată folosind abordări diferite:

- Modelarea electrochimică a componentelor interne ale bateriei;
- Modelarea stohastica. Comportamentul bateriei este modelat utilizând un model stohastic în timp discret;
- Abordarea "black-box", în care comportamentul sistemului este descris analitic folosind un set de ecuații matematice, folosind logica fuzzy sau rețele neuronale artificiale;

- Utilizarea modelelor circuitului echivalent electric, în care bateria este modelată ca o rețea de componente electrice;

Ultima abordare prezentată, cea a circuitului electric echivalent (ECM), este cea adoptată în această lucrare datorită facilității sale de implementare și a rezultatelor precise obținute.

Circuitul echivalent al bateriei 3.8 conține: o sursă de tensiune  $E_M$ , o rezistență serie  $R_0$ , plus una sau mai multe rețele R-C, în funcție de gradul dorit de acuratețe a modelului. În majoritatea cazurilor nu este nevoie de un număr mare de rețele R-C, cazul cel mai simplu fiind cel cu o rețea, iar rezultatele acestui model sunt foarte bune în comparație cu simplitatea modelului și costul redus de calcul.

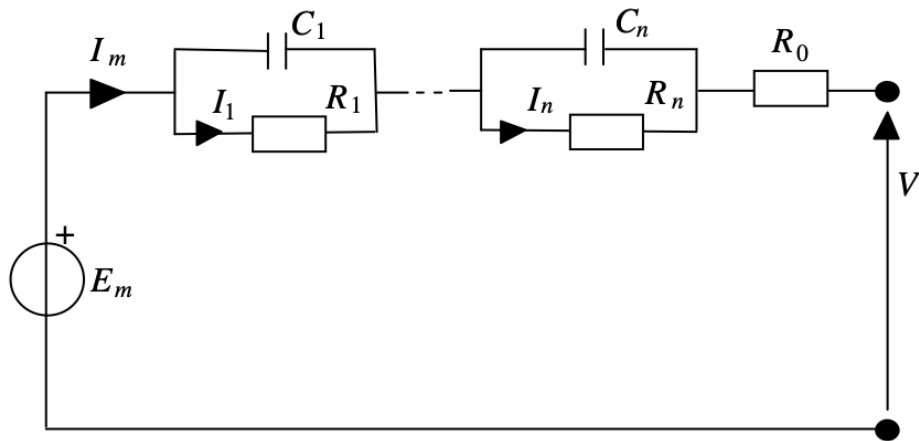


Figura 3.12: Circuitul echivalent al celulei electrochimice [21]

Alți doi parametri importanți pentru monitorizarea bateriei sunt *SoC* (*State of Charge*) și *SoH* (*State of Health*). Acești parametri corespund raportului de sarcină stocată în baterie cu sarcina maximă care poate fi obținută în urma unei încărcări complete. SoC poate fi văzut ca o cantitate termodinamică și este în esență energia potențială a sistemului. Pe măsură ce bateria îmbătrânește și trece prin mai multe cicluri de încărcare/descărcare, aceasta se deteriorează ireversibil (atât fizic cât și chimic). *SoH* indică acest grad de deteriorare a bateriei în raport cu starea bateriei la început (când a fost nouă).

### 3.6.2. Calculul capacității bateriei și a *SoC*

Capacitatea bateriei reprezintă cantitatea de sarcină disponibilă în baterie, pentru descărcare. Este reprezentată în amperi-oră (Ah), iar sarcina ce poate fi extrasă depinde de următorii factori:

- Curentul de descărcare mediu și timpul de descărcare
- Valoarea tensiunii la finalul ciclului de descărcare
- Timpul în care a fost păstrată neutilizată (descărcare fără sarcină).
- Numărul de cicluri de încărcare-descărcare pe care bateria le-a suferit (îmbătrânire).

*SoC (State of Charge)* se calculează utilizând relația următoare:

Se consideră celula încărcată la maxim la momentul de timp  $t = 0$ , astfel definim SoC ca sarcina extrasă :

$$Q_e(t) = \int_0^t I_m(\tau) d\tau \quad (3.19)$$

$$(5.2)$$

După ce definim SoC, putem trece la metoda de determinare a valorii acestuia. Prima metodă de determinare este cea a testului de descărcare completă a bateriei, în urma căruia se determină capacitatea rămasă a bateriei.

A doua metodă, numită și *Coulomb counting*, este metoda adoptată în lucrarea[22], și se bazează pe integrala curentului.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_Q} \int_{t_0}^t (I(\tau) - I_p(\tau)) d\tau = SOC_0 - \frac{1}{C_Q} \int_{t_0}^t \eta_{Coulombic} I(\tau) d\tau \quad (3.20)$$

Unde  $C_Q$  este capacitatea nominală,  $I$  este curentul furnizat de celulă,  $I_p$  sunt pierderile din cauza reacțiilor secundare(chimice) și căldurii, iar  $\eta_{Coulombic}$  este eficiența coulombică a celulei. În modelul propus de mine am neglijat pierderile cauzate de căldura celulei, astfel capacitatea celulei, SoC și SoH nu depind de temperatură.

Dezavantajele metodei constau în:

- dificultatea în a determina cu precizie valoarea inițială a SoC( $SOC_0$ ). În cazul în care  $SOC_0$  este estimat greșit, toate estimările ulterioare ale vor fi incorecte.
- adăugarea cumulativă a erorilor în măsurare, zgomot etc. în timp, iar măsurarea precisă a curentului este un proces costisitor.

### 3.6.3. Măsurarea tensiunii la mers în gol (OCV) și a căderilor de tensiune pe rețeaua RC și $R_S$

Relația dintre tensiunea la mers în gol și SoC este importantă pentru determinarea tensiunii la ieșire a bateriei. În urma determinării OCV, trebuie să calculăm căderea de tensiune pe rețeaua RC, urmată de căderea de tensiune pe rezistența serie, utilizând legile lui Kirchhoff.

$$V_{bat} = V_{oc} - u_1 - R_s \cdot I_{bat} \quad (3.21)$$

În Ecuația 3.21, curentul extras din baterie (sau furnizat acesteia, în cazul încărcării) este notat cu  $I_{bat}$ . Căderea de tensiune pe rețeaua RC exprimată ca:

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{1}{R_p \cdot C_p} u_1 + \frac{1}{C_p} \cdot I_{bat} \quad (3.22)$$

Tensiunea la mers în gol este exprimată fie cu ajutorul unui Look-up Table fie cu ajutorul unei funcții polinomiale, cu ajutorul datelor înregistrate în urma testelor efectuate pe baterii. Această caracteristică ce descrie relația dintre OCV și SoC poate fi găsită în general în fișa tehnică a bateriei.



## 3.6.4. Modelarea bateriei folosind circuitul echivalent și identificarea parametrilor

Bateriile reîncărcabile au stări interne ce nu pot fi măsurate, cum ar fi *SOC* (*State of Charge*) și *SOH* (*State of Health*). Diferite modele au fost dezvoltate pentru a descrie cu o acuratețe cât mai mare dinamicile neliniare ale bateriilor.

În modelele ECM, procesele de încărcare și descărcare sunt reprezentate prin rezistențe, condensatoare și surse de tensiune. Aceste rezistențe și condensatoare pot fi determinate empiric pe baza unor procese simple din graficul unui puls de descărcare sau încărcare.

În urma fiecărui puls de descărcare, când bateria este deconectată de la sarcină, tensiunea crește treptat la valoarea OCV. Rezistența serie  $R_s$  cauzează căderea rapidă de tensiune. Rezistența în paralel cu condensatorul completează procesul de descărcare cu o dinamică mai lentă. Constanta de timp mare descrie lungimea pulsului de descărcare. Aceste valori deduse din răspunsul la pulsul de descărcare sunt valabile și pentru perioada de relaxare (când curentul este zero/bateria nu este conectată la sarcină)[23]. Pentru circuitul cu o rețea avem următoarele ecuații:

$$V_{bat} = k_0 - k_1 \cdot \exp(-a \cdot t) \quad (3.23)$$

unde termenii  $(k_0)$ ,  $(k_1)$  și  $(a)$  pot fi identificați din ecuațiile de mai sus ca coeficienți:

$$k_0 = V_{oc} - R_s \cdot I_{bat} \quad (3.24)$$

$$k_1 = \frac{R_1}{I_{bat}} \quad a = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \quad (3.25)$$

În următoarea figură 3.12 este prezentat modul în care au fost identificați parametrii pe graficul unui ciclu de descărcare [23].

Identificarea tensiunii la mers în gol (OCV) și a rezistenței serie este simplă, indiferent ce tip de circuit sau ordin alege proiectantul. În cazul nostru îi deducem simplu de pe urma unui ciclu de descărcare a bateriei efectuat la curent constant și tensiune constantă (CC-CV), un test standard în industrie pentru determinarea parametrilor. Se observă că în urma aplicării pulsului de descărcare, tensiunea scade pe durata acestui puls, și apoi revine la o valoare constantă în timpul de relaxare. Această valoare constantă este chiar valoarea OCV măsurată pentru valori SoC de la 100% la 10%, exprimată ca:

$$V_{OC} = f(SoC) \quad (3.26)$$

Rezistența serie este parametrul responsabil de acea cădere de tensiune în urma aplicării pulsului și se poate calcula ușor observând diferența între valorile tensiunilor la începutul aplicării pulsului și valoarea notată cu  $V_2$  pe graficul din figura 3.12.

$$R_s = \frac{V_{OC} - V_1}{I_{bat}} \quad (3.27)$$

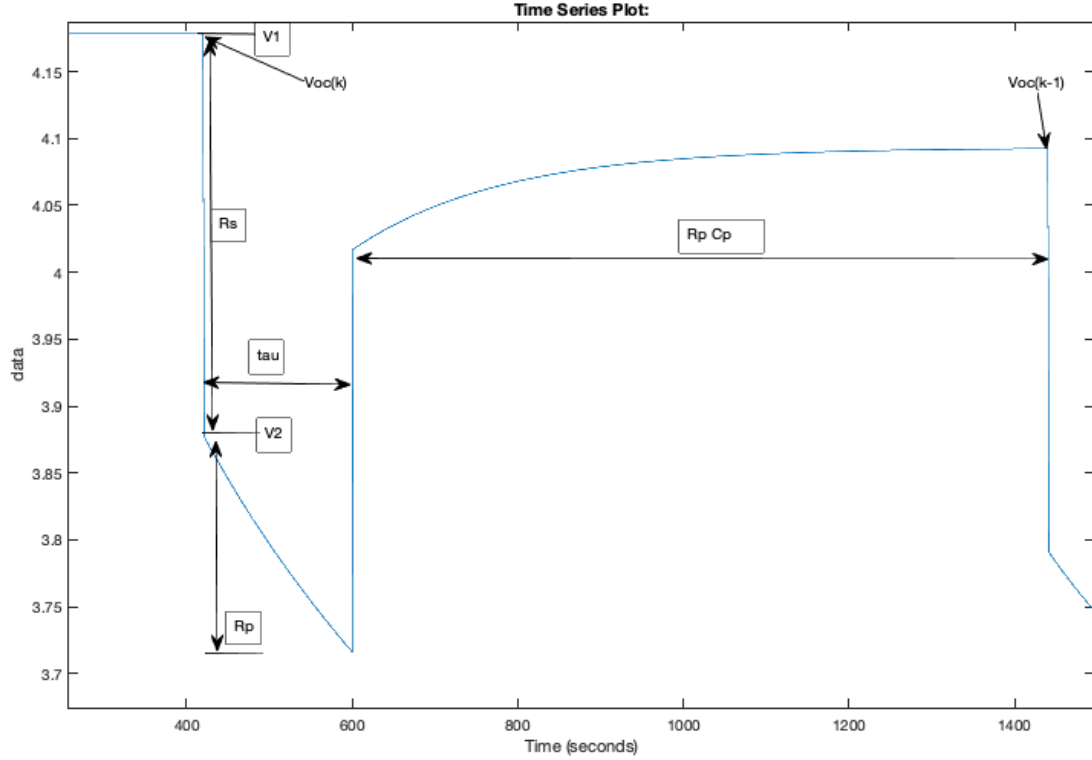


Figura 3.13: Identificarea parametrilor folosind graficul unui puls de descărcare

Parametrii rămași de calculat pentru modelul de ordinul I sunt componentele rețelei RC, și anume rezistența și condensatorul ( $R_p$  și  $C_p$ ). După cum putem vedea în grafic  $R_p$  este caracterizat de valoarea cea mai joasă la care ajunge tensiunea în urma pulsului de descărcare, și poate fi calculat astfel:

$$R_p = \frac{V_2 - V_3}{I_{bat}} \quad (3.28)$$

Variabila  $\tau$  din grafic reprezintă timpul de aplicare a pulsului de curent, astfel putem afla și ultimul parametru  $C_p$ :

$$\tau = R_p \cdot C_p \quad (3.29)$$

Variația parametrilor identificați depinde, în cazul nostru, de tensiunea la mers în gol și de gradul de descărcare al bateriei (*State of Charge, SoC*). Pentru a obține o descriere cât mai exactă a sistemului, putem utiliza tabele de căutare (*Look-Up Tables, LUT*) pentru a exprima variația parametrilor pe parcursul întregii regiuni de operare. Însă știind că, pentru a menține bateria în condiții optime pe durata ciclului său de viață, aceasta trebuie utilizată strict în regiunea de 20%-80% din valoarea *SoC*, iar variația parametrilor în această zonă este neglijabilă, putem considera parametrii identificați în punctul inițial ca fiind reprezentativi pentru întreaga regiune de valori.

Acești parametri au fost incluși într-un script *MATLAB*, folosit apoi la simularea bateriei.

Bateria aleasă pentru implementarea modelului și aplicației noastre este US18650GR(G7) fabricată de *Sony Corporation*. Parametrii nominali ai celulei se găsesc în fișa tehnică a produsului. Celula are o tensiune nominală de 3.7V, o tensiune maximă admisă de 4.2V, și una minimă de 3V, iar capacitatea celulei este de 2.4Ah. Astfel pentru a atinge scopul aplicației noastre, am ales să construim un pachet de baterii ce conține 13 celule în serie și 29 în paralel. Astfel pachetul nostru va conține în total 377 de baterii cu o capacitate nominală de aproximativ 70Ah la o tensiune nominală de 48V și un curent maxim admis de descărcare de 34.8A..

Pentru aproximarea tensiunii la mers în gol a bateriei noastre am folosit seturi de date disponibile public [24]. Pentru a potrivi datele măsurate am utilizat un polinom de ordinul șapte 3.14. Valorile decimate au fost apoi trecute într-un *Look-Up Table* în *Simulink*.

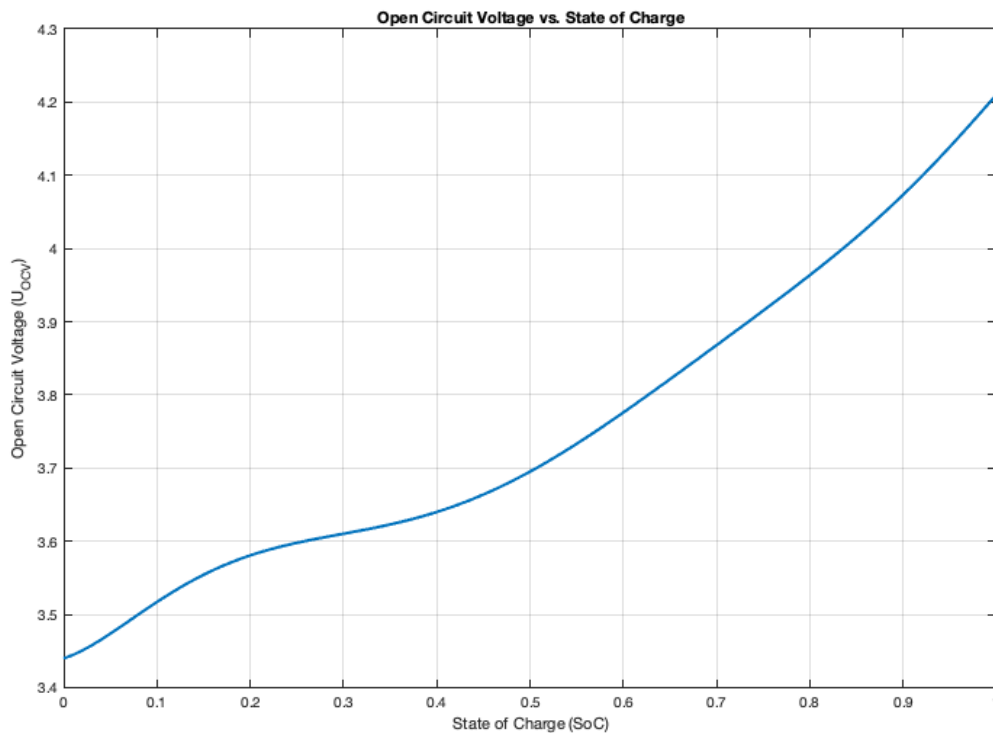


Figura 3.14: Tensiunea la mers în gol (OCV) în funcție de SoC (State of Charge)

Scalarea parametrilor pentru întregul pachet de baterii a fost făcută în funcție de numărul de celule în serie și numărul de celule în paralel.

Parametru	Valoare
Tensiunea la mers in gol (U_OCV) [V]	3.4402, 3.4742, 3.5179, 3.5552, 3.5816, 3.5986, 3.6110, 3.6240, 3.6417, 3.6664, 3.6988, 3.7378, 3.7814, 3.8275, 3.8746, 3.9224, 3.9718, 4.0251, 4.0848, 4.1522, 4.2100
Capacitatea bateriei (Capacity_Ah) [Ah]	2.4
Valoarea inițială a SOC (SOC0) [%]	100
Valori SOC [%]	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100
Rezistența Rp (Rp) [Ohm]	0.003103
Capacitatea Cp (Cp) [Farad]	8437.9
Rezistența serie Rs (Rs) [Ohm]	0.0108

Tabela 3.4: Parametrii modelului pentru celula

Parametru	Valoare
Tensiunea la mers in gol (U_OCV_pack) [V]	44.7200, 45.1645, 45.7325, 46.2180, 46.5602, 46.7818, 46.9434, 47.1120, 47.3417, 47.6635, 48.0843, 48.5909, 49.1578, 49.7575, 50.3700, 50.9906, 51.6329, 52.3258
Capacitatea (Capacity_Ah_Pack) [Ah]	70
Valori SOC [%]	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100
Rezistența Rp (Rp_pack) [Ohm]	0.0049
Capacitatea Cp (Cp_pack) [Farad]	1882.3
Rezistența serie Rs (Rs_pack) [Ohm]	0.014

Tabela 3.5: Parametrii modelului pentru întregul pachet de baterii

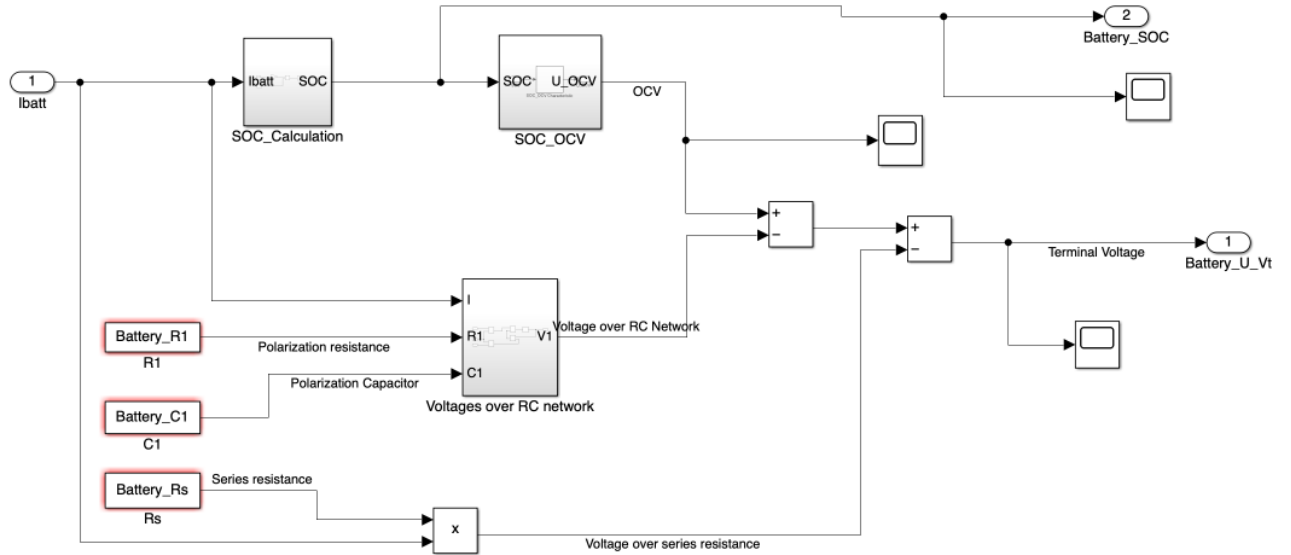


Figura 3.15: Implementarea în *Simulink* a modelului bateriei

### 3.7. Algoritmi MPPT

#### 3.7.1. Metode de urmărire a punctului de putere maximă

Printre tehnicile convenționale de urmărire a punctului de putere maximă (MPPT) se remarcă: Metoda *P&O* (*Perturb and Observe*), *Incremental Conductance* (*IncCond*), *Hill Climbing* și *constant voltage* (*CV*).

#### 3.7.2. Tehnica *Perturb and Observe*

*P&O* (*Perturb and Observe*) se folosește de tensiunea măsurată, curentul și puterea produsă și decide dacă să crească sau să scadă tensiunea prin modificarea factorului de umplere al convertorului DC-DC până se ajunge în punctul de putere maximă (MPP).

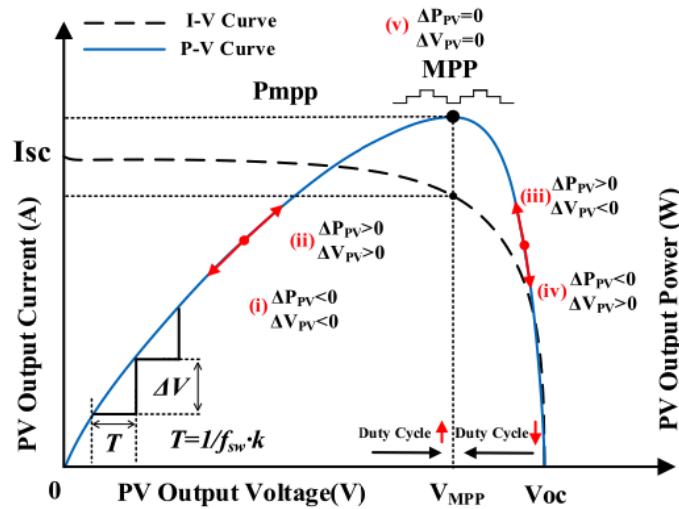


Figura 3.16: Algoritmul *P&O*

În logica algoritmului se mărește tensiunea și se observă schimbarea în producția de putere. Dacă puterea panoului crește, comanda de perturbare ar trebui să fie ținută în aceeași direcție, indiferent dacă tensiunea panoului crește sau scade, până când se ajunge la punctul de putere maximă (MPP). În schimb, dacă puterea produsă de panou scade, incrementul de tensiune ( $\Delta V$ ) ar trebui inversat. PPuterea maximă extrasă (MPP) se obține atunci când  $dP/dV = 0$  [25].

Algoritmul este prezentat în flowchart-ul din figura 3.17.

Printre avantajele algoritmului *P&O* se numără: faptul că este un algoritm online care nu depinde de tipul de panou, implementarea sa facilă în câteva linii de cod, precum și acuratețea și performanțele bune în condiții de radiație uniformă.

Dezavantajele majore ale acestui tip de algoritm sunt oscilațiile care apar în jurul stării de echilibru (în jurul MPP), în condiții de mediu ce variază rapid. Pierderile de putere din cauza acestor oscilații depind și de mărimea perturbației, iar alegerea unei mărimi nepotrivite a pasului duce la performanțe slabe în urmărirea punctului de putere maximă [25].

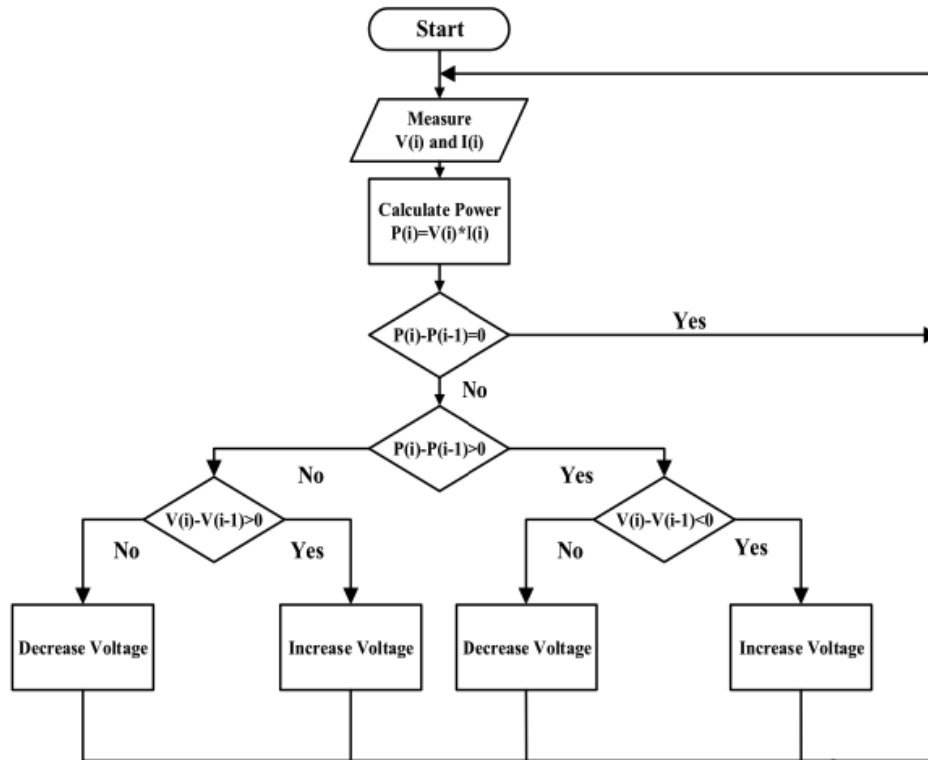


Figura 3.17: Flowchart pentru algoritmul P&O [19]

### 3.7.3. Algoritmul *Incremental Conductance*

*Incremental Conductance* este una dintre cele mai folosite strategii MPPT, cu un avantaj major de urmărire rapidă a punctului de putere maximă. Comparativ cu *P&O*, *IncCond* se folosește atât de caracteristica P-V cât și de caracteristica I-V a modulului fotovoltaic. Tehnica se bazează pe panta caracteristicii P-V, unde se urmărește punctul de putere maximă la  $dP/dV = 0$ , după cum urmează:

$$\frac{\partial(V_{PV}, I_{PV})}{\partial V_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \cdot \frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.31)$$

$$dV_{PV} \approx \Delta V_{PV} = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \quad (3.32)$$

Modificarea curentului  $dI_{PV}$  și a tensiunii  $dV_{PV}$  sunt aproximativ egale cu  $\Delta V_{PV}$   $\Delta I_{PV}$  după cum urmează:

$$dV_{PV} \approx \Delta V_{PV} = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \quad (3.33)$$

$$dI_{PV} \approx \Delta I_{PV} = I_{PV}(t_2) - I_{PV}(t_1) \quad (3.34)$$

Punctul de putere maxima este urmărit și atins atunci când relația:  $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  este satisfăcută. Dacă  $\left(\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right)$ , punctul de operare va fi la stânga MPP pe curba P-V. Dacă  $\left(\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}\right)$ , punctul de operare va fi la dreapta MPP [19].

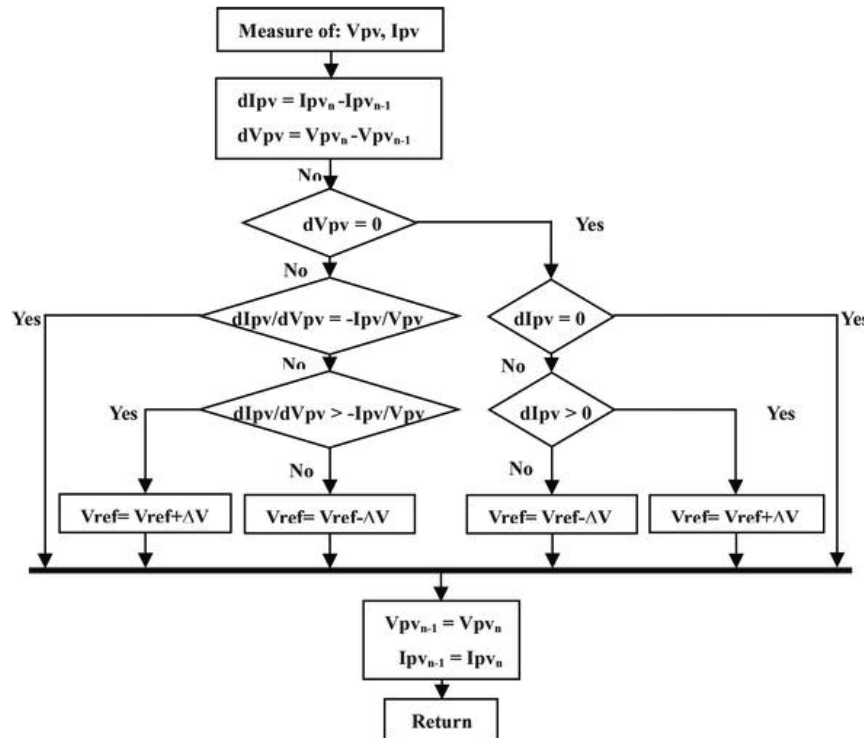


Figura 3.18: Flowchart pentru algoritmul Incremental Conductance [19]

În literatură au apărut numeroase lucrări ce compară cele mai cunoscute metode MPPT, iar Incremental Conductance apare ca fiind cea mai eficientă dintre cele convenționale. Asemenea metodei *P&O*, metoda *Incremental Conductance* este o metodă directă (online), cu pas variabil, ce o face mult mai robustă în privința schimbărilor

climatice rapide. Un alt avantaj al acestei tehnici, îl reprezintă faptul că oscilațiile în jurul punctului de echilibru sunt mult mai atenuate decât în cazul altor algoritmi convenționali [26] [27].

Printre dezavantajele acestui algoritm numărăm timpul de răspuns mai mare în cazul unor perturbații, viteza algoritmului, care depinde ca în cazul celui *PEO*, de mărimea pasului cu care se lucrează. În privința costului, Incremental Conductance se află printre cele mai scumpe metode de implementat.

#### 3.7.4. Metoda tensiunii constante (CV)

Această metodă fixează tensiunea panoului la o anumită valoare unde cunoaștem că acea tensiune corespunde punctului de putere maximă. Acest punct se aproximează ca fiind la 76% din tensiunea la mers în gol a panoului ( $V_{OC}$ ). În practică punctul de putere maximă nu va fi niciodată o valoare constantă (valoare aproximată cu 76% din  $V_{OC}$ ), astfel eroarea staționară va crește iar eficiența panoului va scădea considerabil.

În comparație cu metodele directe MPPT această metodă dă cele mai slabe rezultate. Algoritm CV însă, este cel mai simplu și cel mai ieftin de implementat, iar în practică necesită doar un senzor de tensiune. Aplicațiile în care se consideră utilă această metodă sunt cele de dimensiuni mici spre foarte mici, unde nu avem puteri și sarcini mari.

Metodele implementate în cadrul lucrării sunt metoda *Perturb&Observe* și metoda *Incremental Conductance*. În vederea implementării lor am folosit blocul *StateFlow* din *Simulink*. Stările algoritmului cât și procesele descrise în diagramele de flux de mai sus au fost reprezentate utilizând aceste blocuri. Am ales un pas de actualizare al factorului de umplere considerabil de mic pentru a avea o acuratețe mai mare în urmărirea punctului de putere maximă, și pentru a evita oscilațiile mari. Mai mult am propus folosirea unui pas variabil adaptat soluției noastre pentru a minimiza oscilațiile în cadrul regimului staționar.

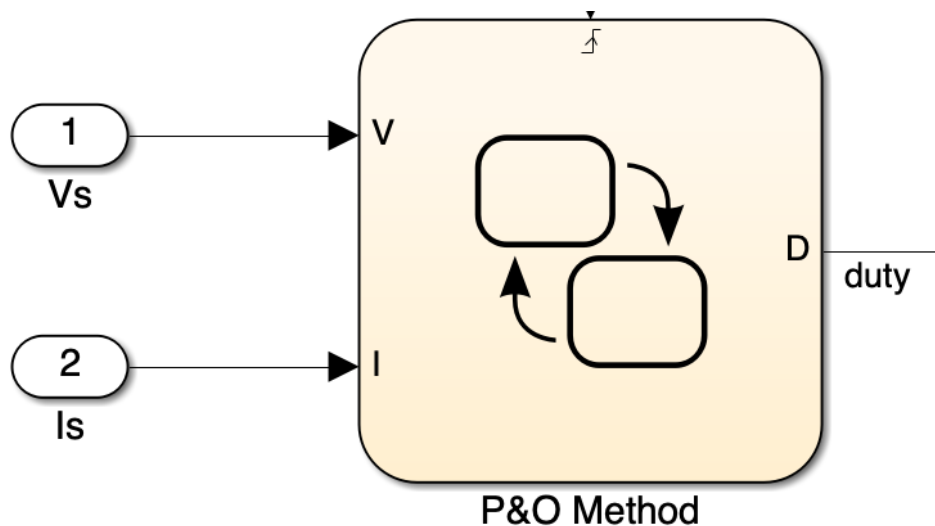


Figura 3.19: Blocul Stateflow folosit pentru implementarea algoritmilor de urmărire



# Capitolul 4

## Testare și validarea rezultatelor

În acest capitol vor fi prezentate rezultatele în urma simulării fiecărei componente, precum și pașii luați în vederea validării rezultatelor. Cu ajutorul acestor rezultate, am evaluat dacă comportamentul componentelor este cel așteptat în urma aplicării semnalelor de test intrării fiecărui model. De asemenea, am verificat corectitudinea parametrilor aleși și, dacă a fost necesar, am reluat parametrizarea aceste modele.

### 4.1. Testare și reprezentarea grafică a rezultatelor

#### 4.1.1. Rezultatele obținute din simularea modelului panoului fotovoltaic

Testele pentru simularea modelului panoului fotovoltaic au fost elaborate cu scopul de a reprezenta o gamă cât mai variată de semnale, reflectând astfel condițiile din mediul real.

În cadrul acestor teste, au fost considerate diferite scenarii de iluminare și de temperatură. Analiza rezultatelor obținute în urma simulărilor a permis identificarea comportamentului dinamic al panoului fotovoltaic, validarea corectitudinii parametrilor aleși inițial și ajustarea acestora pentru a îmbunătăți precizia modelului. Această abordare este esențială în reproducerea unui comportament fidel pentru a dezvolta ulterior pe baza caracteristicilor I-V și P-V, algoritmi de urmărire a punctului de putere maximă, alegerea componentelor convertorului și mărimea sistemului de stocare a energiei.

Astfel am creat un set de teste compus din patru scenarii. Fiecare scenariu corespunde unui nivel de temperatură, pornind de la  $10^{\circ}\text{C}$  în primul scenariu și ajungând până la  $75^{\circ}\text{C}$  în ultimul scenariu. În fiecare scenariu, radiația solară variază de la  $200\text{ W/m}^2$  până la  $1000\text{ W/m}^2$ .

În figura 4.1 se poate observa comportamentul celulei fotovoltaice în condiții normale de temperatură ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Puterea panoului în condițiile nominale de radiație solară de  $1000\text{ W/m}^2$  atinge valorile așteptate de  $250\text{ W}$  și scade pe măsură ce panoul este umbrit. Puterea scade sub  $50\text{ W}$  când radiația solară scade la valoarea de  $200\text{ W/m}^2$ . Valorile curentului și ale tensiunii sunt cele așteptate, fiind extrem de apropiate de valorile din fișa tehnică.

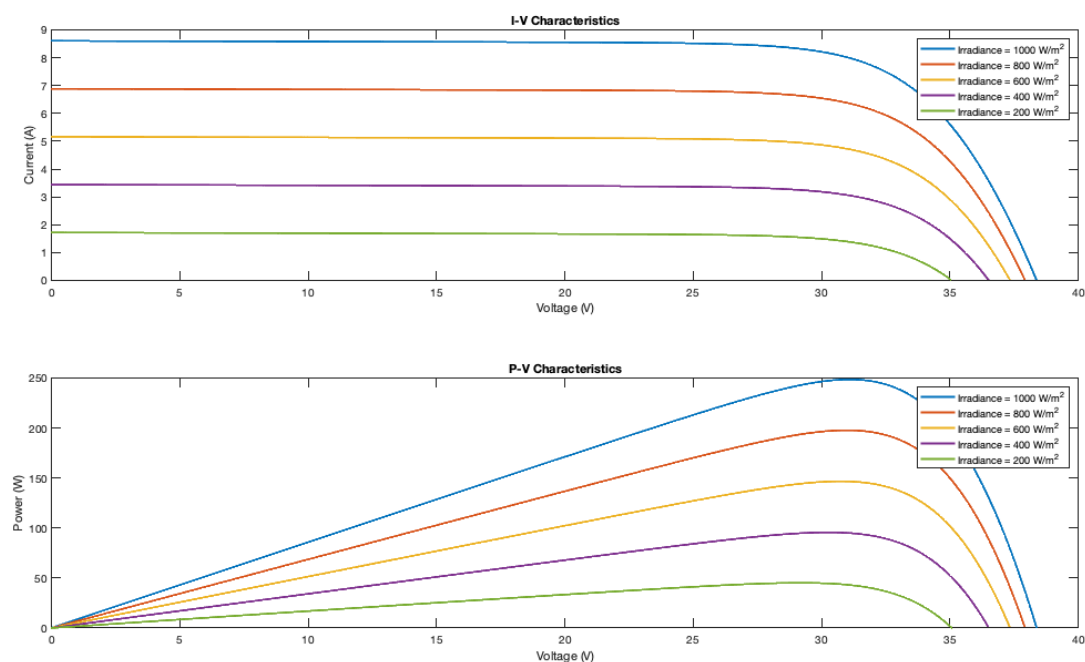


Figura 4.1: Rezultatele simulării modelului pentru temperatura de 25°C

În figura 4.2 avem scenariul în care temperatura ajunge la 45°C. Se poate observa că nu doar radiația solară afectează funcționarea panoului, ci și temperatura ridicată. Puterea scade față de cea nominală, de această dată pe toată plaja de valori ale radiației solare. Pentru o valoare a radiației de  $1000 \text{ W/m}^2$ , de această dată avem o putere maximă de doar 210 W.

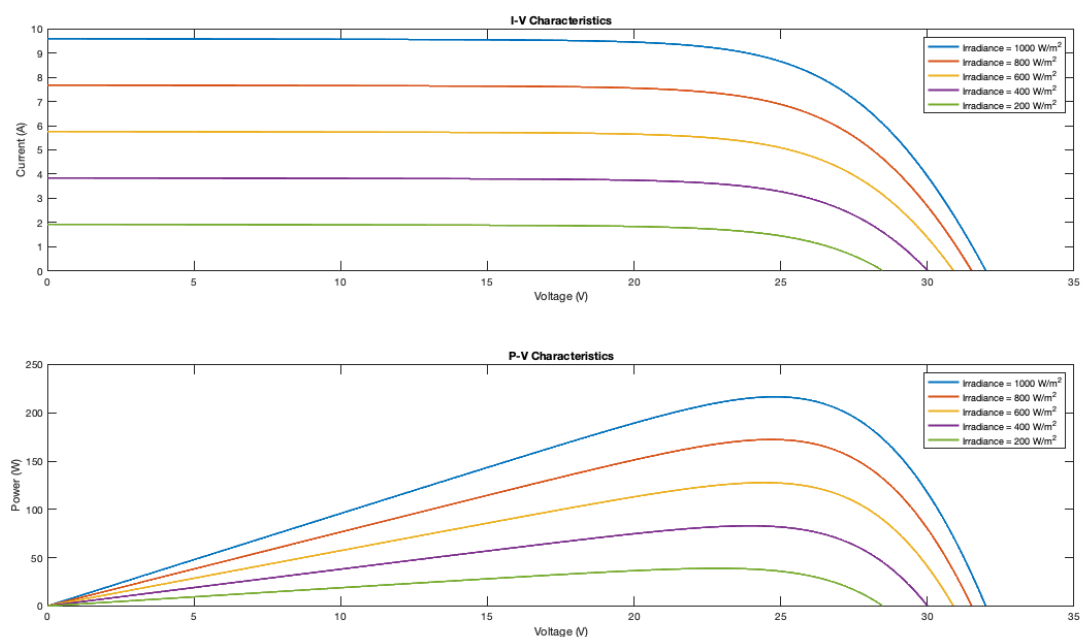


Figura 4.2: Rezultatele simulării modelului pentru temperatura de 45°C

Același lucru se poate observa și în cazul scenariului la temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$  (Fig. 4.3). La această temperatură extremă (aproape de limita la care a fost proiectat să funcționeze), randamentul modului fotovoltaic scade drastic, puterea produsă ajungând doar la  $150\text{W}$  pentru o insolație de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Totuși, acesta este un caz extrem, valorile pentru temperatura unui modul fotovoltaic, chiar și în regiunile cu un climat aspru, trec rar peste asemenea valori. Acest randament mai slab este cauzat de influența temperaturii asupra tensiunii la mers în gol (OCV) și asupra curentului de scurtcircuit ( $I_{SC}$ ). Aceste variații diferă în funcție de tehnologia de producție a celulei. Coeficienții de temperatură pentru acest panou au fost prezentați în Capitolul 3, Secțiunea 3.1, Tabela 3.1.

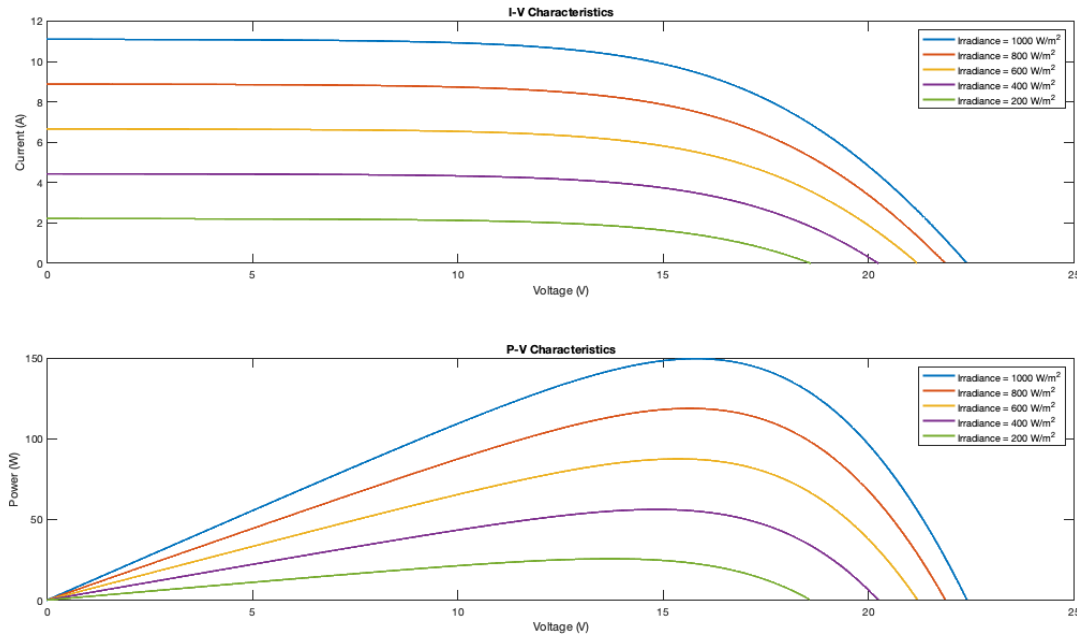


Figura 4.3: Rezultatele simulării modelului pentru temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$

În ultimul scenariu prezentat (Fig. 4.4), temperatura de lucru a panoului a fost stabilită la  $10^{\circ}\text{C}$ . Se poate observa că, în condiții de temperatură scăzută, panoul funcționează mai bine, având un randament crescut față de celelalte scenarii. Puterea panoului ajunge la peste  $200\text{W}$  chiar și în cazul unei insolații mai slabe, de  $800\text{W}/\text{m}^2$ .

Panourile solare tind să funcționeze mai bine la temperaturi scăzute, chiar și la valori sub  $0^{\circ}\text{C}$ . Se poate observa și în graficul scenariului cu temperatură scăzută cum valoarea tensiunii la mers în gol (OCV) este mai mare decât în cazul celei măsurate în condiții standard (la  $25^{\circ}\text{C}$ ). Acest lucru se datorează faptului că semiconductoarele folosite în fabricarea panourilor prezintă mai mulți factori ce sunt influențați de temperatură. În principal, concentrația purtătorilor de sarcină intrinseci scade odată cu reducerea temperaturii, ceea ce duce la creșterea OCV. Mai mult, mărimea benzii interzise depinde de temperatură, influențând la rândul ei OCV, după cum este menționat în Capitolul 2, Secțiunea 2.1.

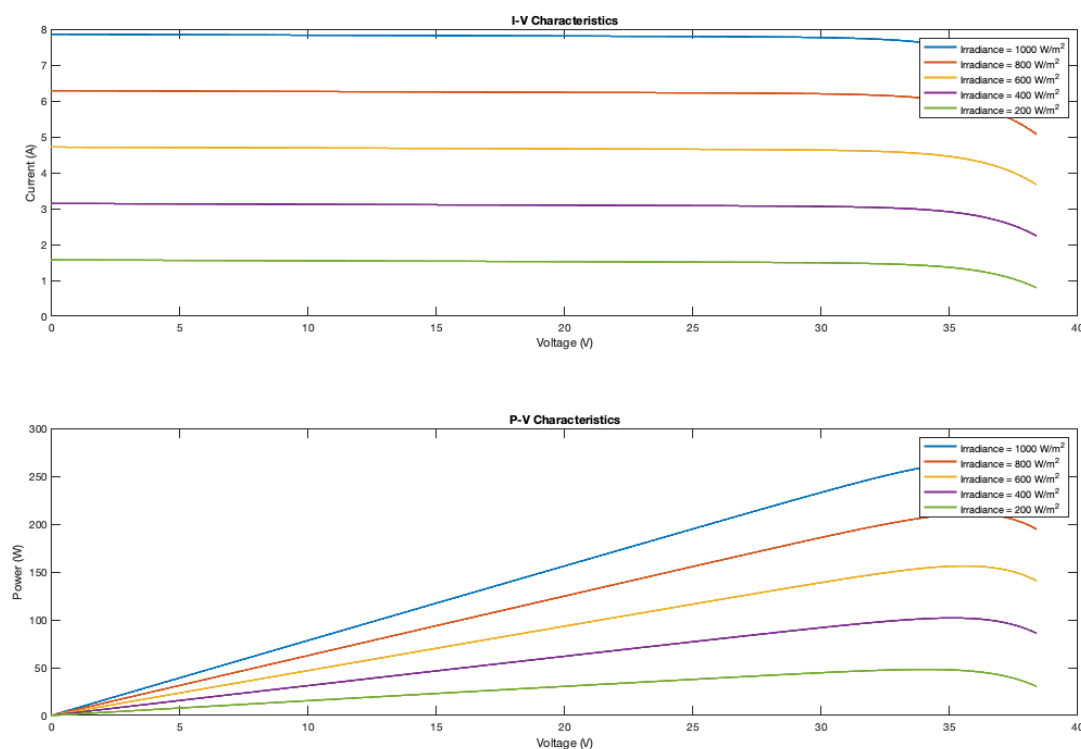


Figura 4.4: Rezultatele simulării modelului pentru temperatura de 10°C

#### 4.1.2. Rezultatele obținute din simularea modelelor convertoarelor de putere

În urma implementării modelelor matematice ale convertoarelor de putere DC-DC, s-a trecut la parametrizarea și simularea acestor modele pentru a observa comportamentul lor și pentru a valida rezultatele. Pentru testele realizate cu acest model s-au folosit parametri calculați în secțiunea de Analiză și Implementare a convertoarelor.

În figura 4.5 este răspunsul în tensiune al convertorului boost pentru primul scenariu de test implementat 3.5, unde tensiunea de la panou este de 30V.

Putem observa că tensiunea convertorului atinge valoarea dorită în scenariu, de 48V. Mai mult, atât riplul tensiunii cât și suprareglajul au valori conforme, datorită alegerii adecvate a capacității condensatorului.

În figura 4.6, este reprezentat curentul prin bobina convertorului ridicător. Putem concluziona ca valoarea inductanței bobinei este una potrivită deoarece valoarea amplitudinii varf la varf a riplului este suficient de mică.

Simulările au fost realizate în Simulink, folosind modelul prezentat în secțiunea de proiectare a convertoarelor. Metoda de simulare aleasă a fost cu pas variabil, valoarea maximă a pasului fiind de  $1 \times 10^{-7}(s)$ . Solver-ul utilizat a fost *ode23tb*.

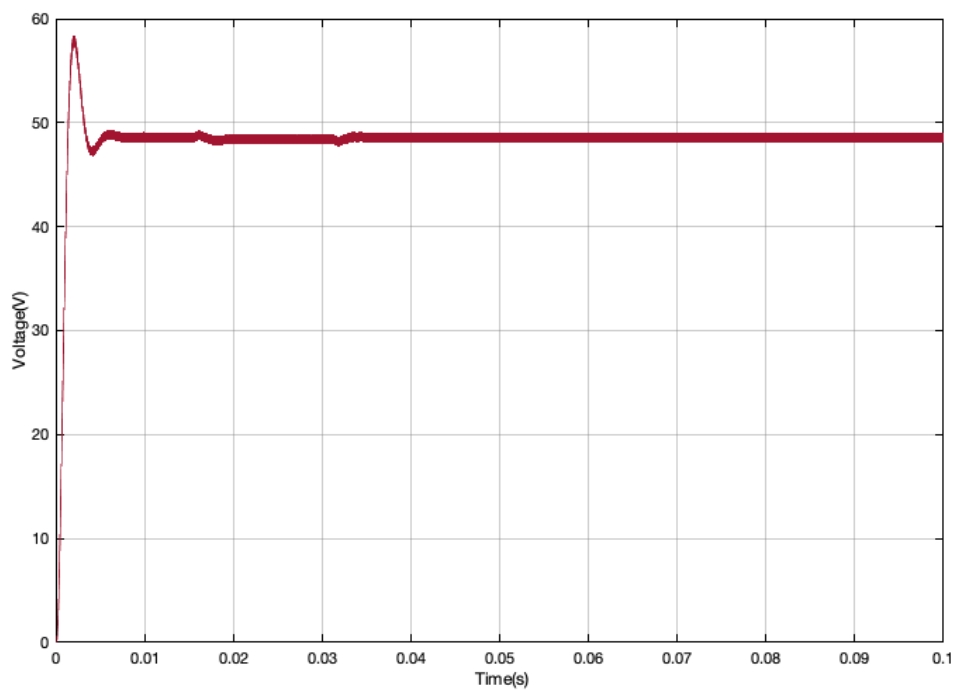


Figura 4.5: Valoarea tensiunii convertorului ridicător în urma simulării pentru primul scenariu

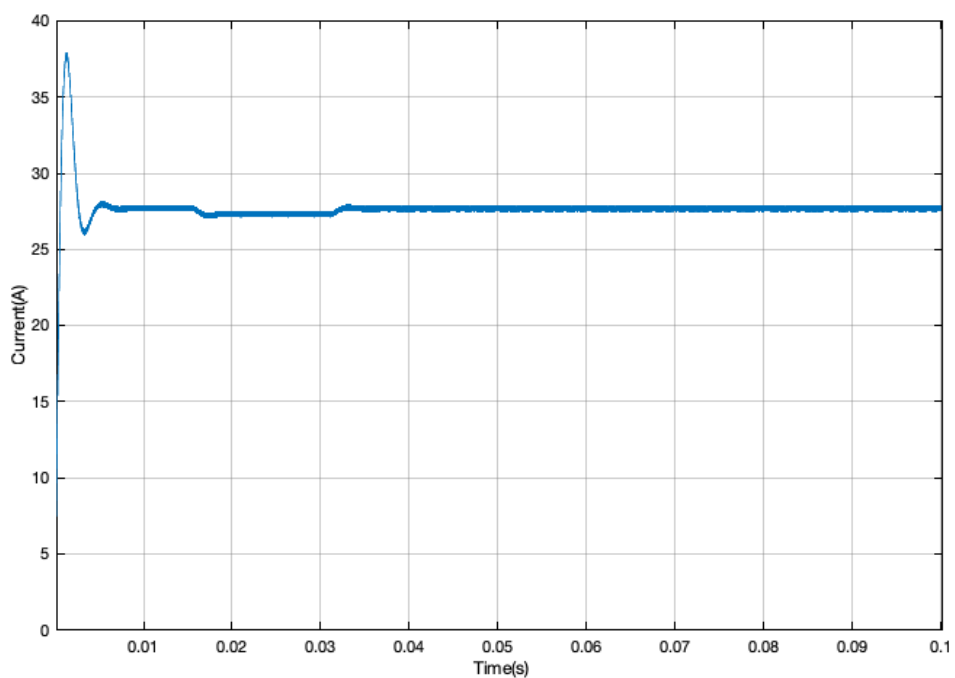


Figura 4.6: Valoarea curentului prin bobina convertorului ridicător în urma simulării pentru primul scenariu

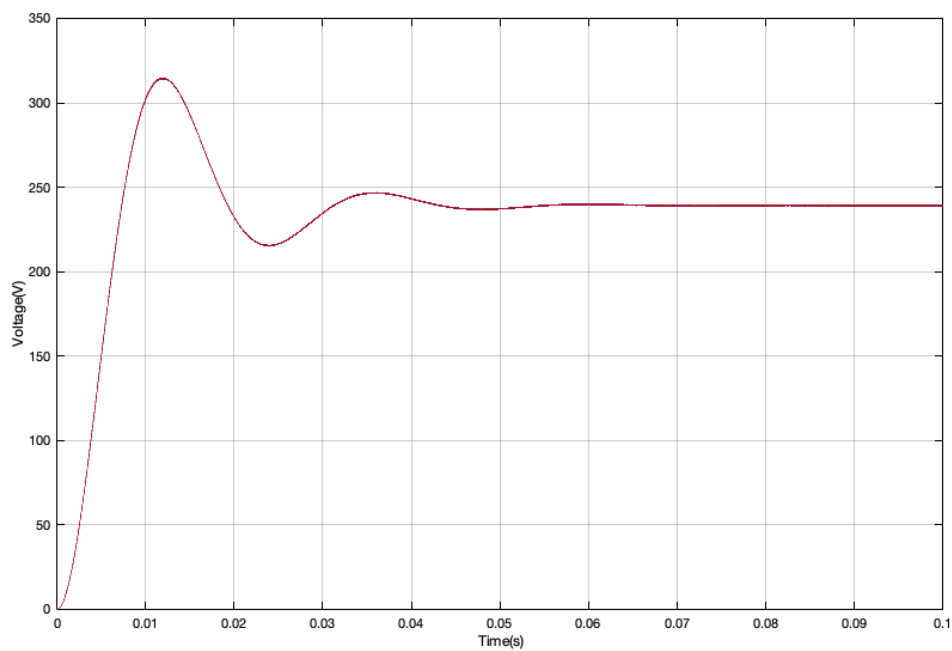


Figura 4.7: Valoarea tensiunii convertorului ridicător în urma simulării pentru al doilea scenariu

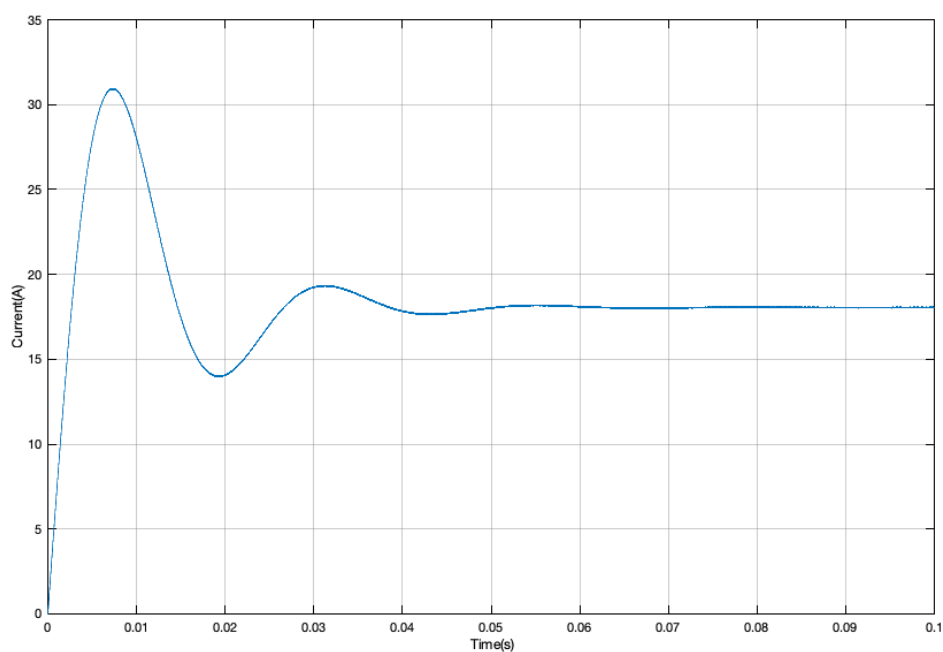


Figura 4.8: Valoarea curentului prin bobina convertorului ridicător în urma simulării pentru al doilea scenariu

Aceleași configurații pentru solver și pas de simulare au fost utilizate și pentru cel de-al doilea scenariu. În figurile 4.7 și 4.8, sunt reprezentate tensiunea de ieșire, respectiv curentul prin bobină. Și în acest caz, valorile alese pentru condensator și bobină s-au dovedit a fi adecvate, deoarece riplul tensiunii și al curentului este minim, oscilațiile sunt reduse și nu se înregistrează valori de vârf mari ale curentului și tensiunii. Putem concluziona că valoarea factorului de umplere respectă parametrii testului nostru, deoarece tensiunea de ieșire atinge valoarea de 240V în regim staționar.

#### 4.1.3. Rezultatele obținute din simularea modelului bateriei

În vederea testării și validării modelului dezvoltat pentru baterie, am propus două teste. Un test de descărcare și unul de încărcare, similar celui folosit în vederea parametrizării modelului. Testul constă în aplicarea unor pulsuri de descărcare respectiv încărcare, de curent constant și tensiune constantă (CC-CV). Pentru încărcare am folosit o valoare a curentului de 24A, iar pentru descărcare am folosit o valoare a curentului de 20A.

În figura 4.9 este prezentat testul de descărcare al pachetului de baterii. Valoarea inițială luată pentru *SoC* (*State of Charge*) este de 50%. Se poate observa faptul că modelul respectă valoarea nominală a tensiunii, în jurul valorii de 48V. În urma pulsului de descărcare (în perioada de relaxare), putem observa și scăderea valorii tensiunii la mers în gol, în jurul valorii de 47.8V.

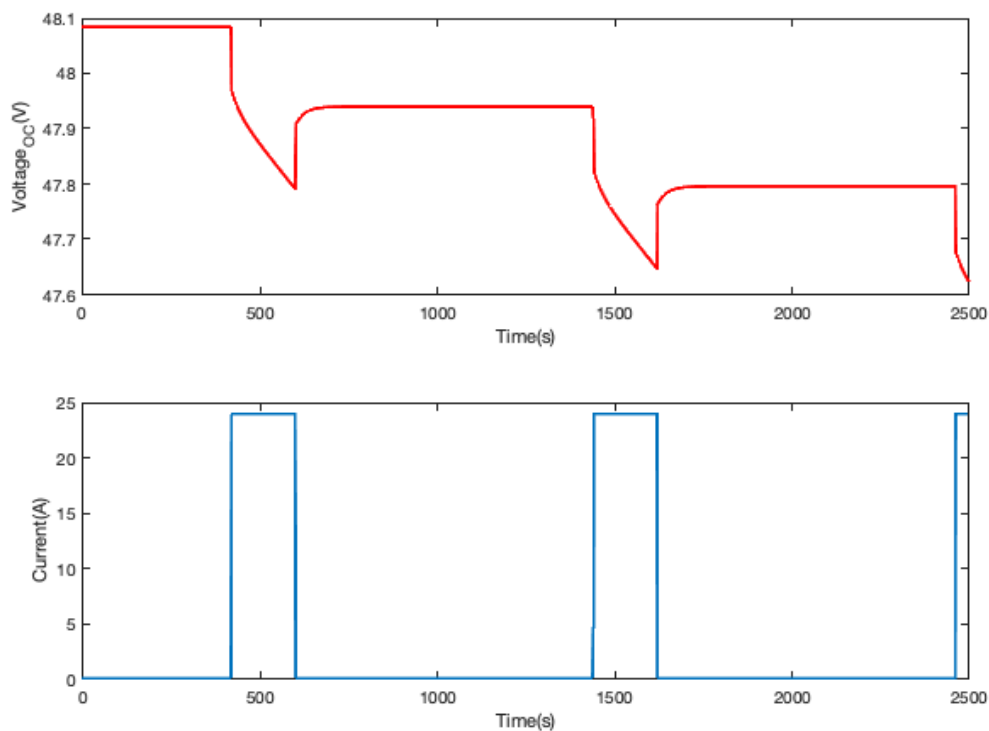


Figura 4.9: Valoarea tensiunii bateriei și a curentului pulsului de descărcare

Rezultatele simulării în urma testului de încărcare al pachetului de baterii este prezentat în figura 4.10. În urma acestui test putem concluziona faptul că pachetul nostru de baterii este modelat corect, deoarece valorile tensiunii și ale nivelului de încărcare corespund semnalelor aplicate.

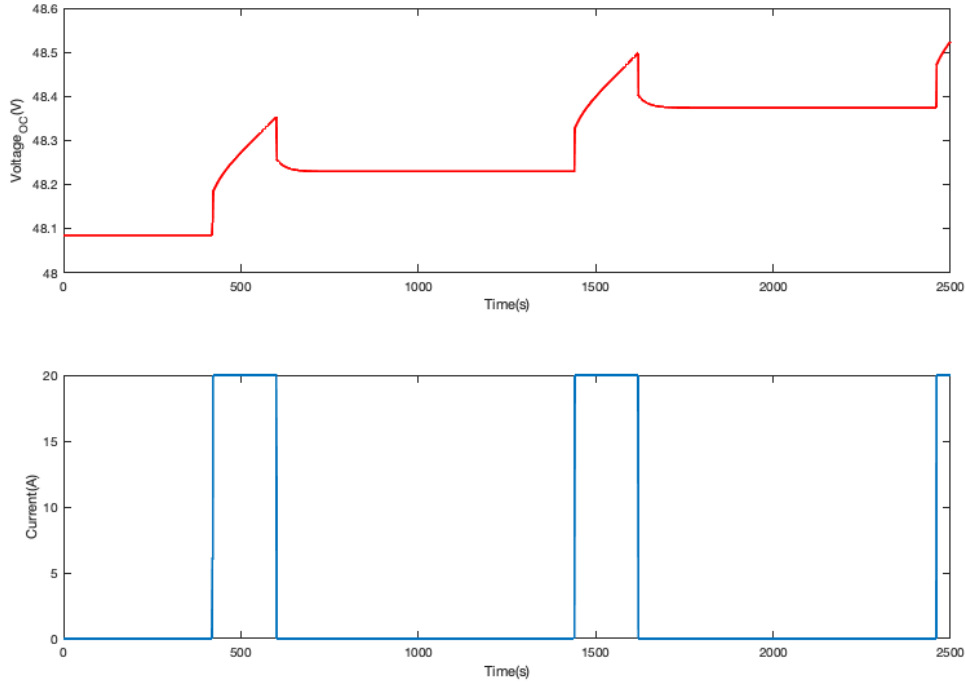


Figura 4.10: Valoarea tensiunii bateriei și a curentului pulsului de încărcare

#### 4.1.4. Rezultatele obținute în urma simulării sistemului fotovoltaic cu algoritmi de urmărire și convertorul ridicător

În vederea testării algoritmilor *MPPT* prezentați, am creat un model nou în *Simulink* folosind librăria *Simscape* pentru a suplini lipsa unei surse de curent din modelul nostru. Am folosit caracteristicile curent-tensiune obținute din modelul inițial al panoului. Fiecare caracteristică corespunde unui nivel de radiație solară, de la nivelul de  $400 \text{ W/m}^2$  până la  $1000 \text{ W/m}^2$ . În modelul adaptat am folosit o sursă de curent preluată din librăria *Simscape* și un *LUT 2-D* pentru a reprezenta comportamentul panoului fotovoltaic, folosind caracteristicile obținute 4.11.

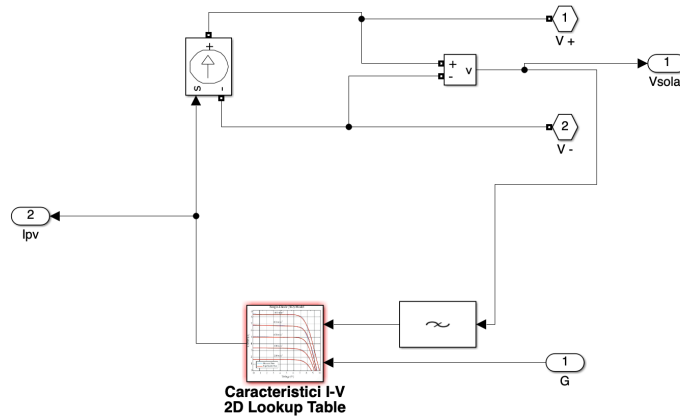


Figura 4.11: Modulul fotovoltaic adaptat pentru simularea algoritmilor MPPT



Am realizat simularea modelului adaptat utilizând algoritmi *Perturb and Observe* (*P&O*) și *Incremental Conductance* (*IncCond*), precum și un scenariu fără algoritmi de urmărire, pentru a compara performanțele panoului fotovoltaic. Pentru fiecare scenariu am creat un semnal ce reprezintă radiația solară variabilă și am selectat două valori diferite ale sarcinii. Am reprezentat grafic valorile factorului de umplere calculate pentru fiecare algoritm, care reprezintă semnalul de comandă pentru convertorul ridicător.

Semnalul de intrare pentru radiația solară a fost construit folosind blocul *Signal Editor* din *Simulink*. Am ales un semnal variabil pentru a simula condițiile meteorologice reale. Valorile semnalului la fiecare moment de timp pot fi urmărite în figura 4.12.

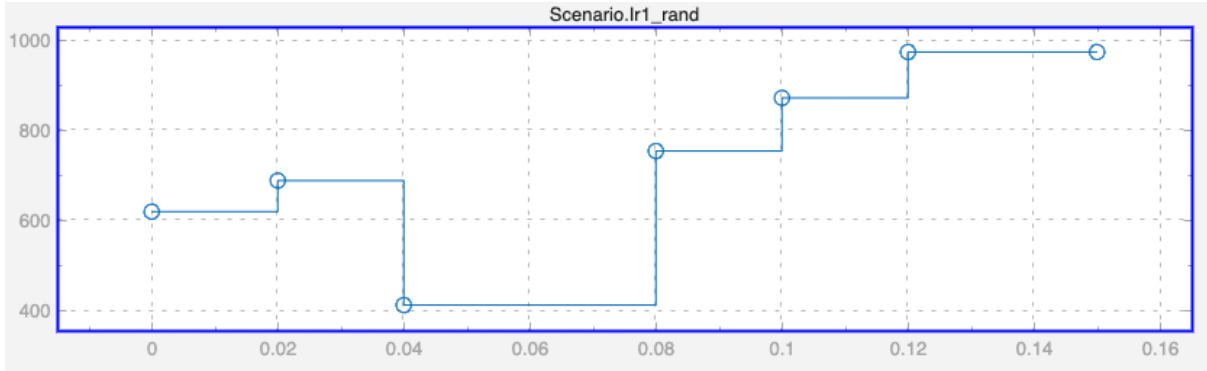


Figura 4.12: Valorile radiației solare din semnalul de stimulare

În figura 4.13 avem rezultatele în urma simulării fără algoritmul de urmărire cu o sarcină de  $15\ \Omega$ . Putem observa faptul că punctul de putere maximă nu este urmărit, iar puterea produsă de panou este scăzută și în cazul unei radiații solare apropiate de valoare nominală ( $1000\ W/m^2$ ).

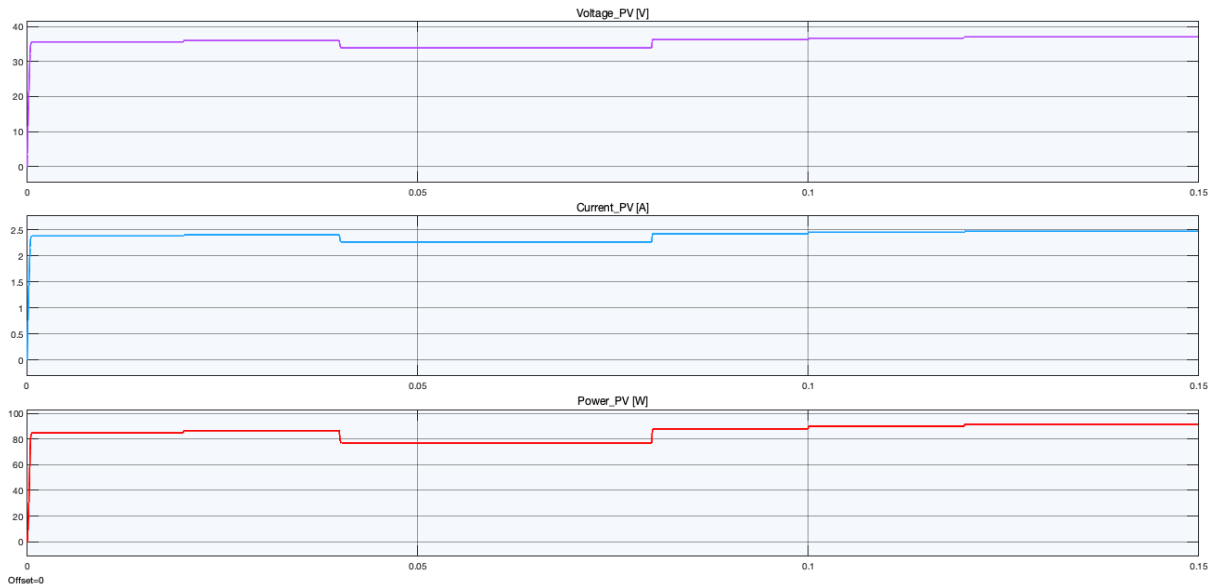


Figura 4.13: Rezultatele simulării fără algoritm de urmărire

În figura 4.14, am reprezentat grafic rezultatele obținute folosind algoritmul *Incremental Conductance* și convertorul *Boost*, cu aceeași sarcină de  $15\ \Omega$ . Urmărirea punctului de putere maximă este realizată pe întreaga plajă de valori a radiației solare. Modulul fotovoltaic atinge puterea maximă absolută dată de producător în jurul valorii de  $970\text{W}/\text{m}^2$ .

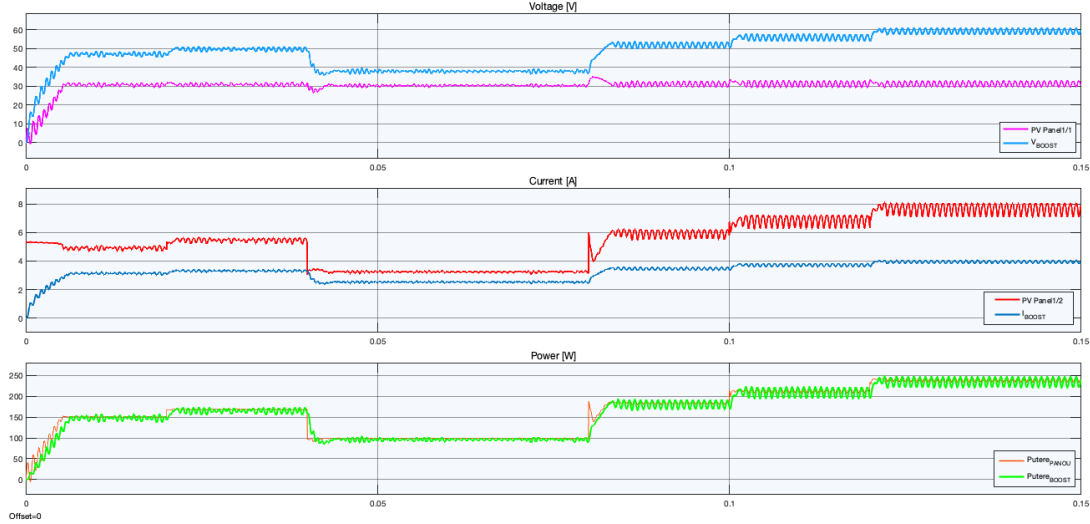


Figura 4.14: Rezultatele simulării folosind algoritmul de urmărire *IncCond* cu sarcină de  $15\ \Omega$

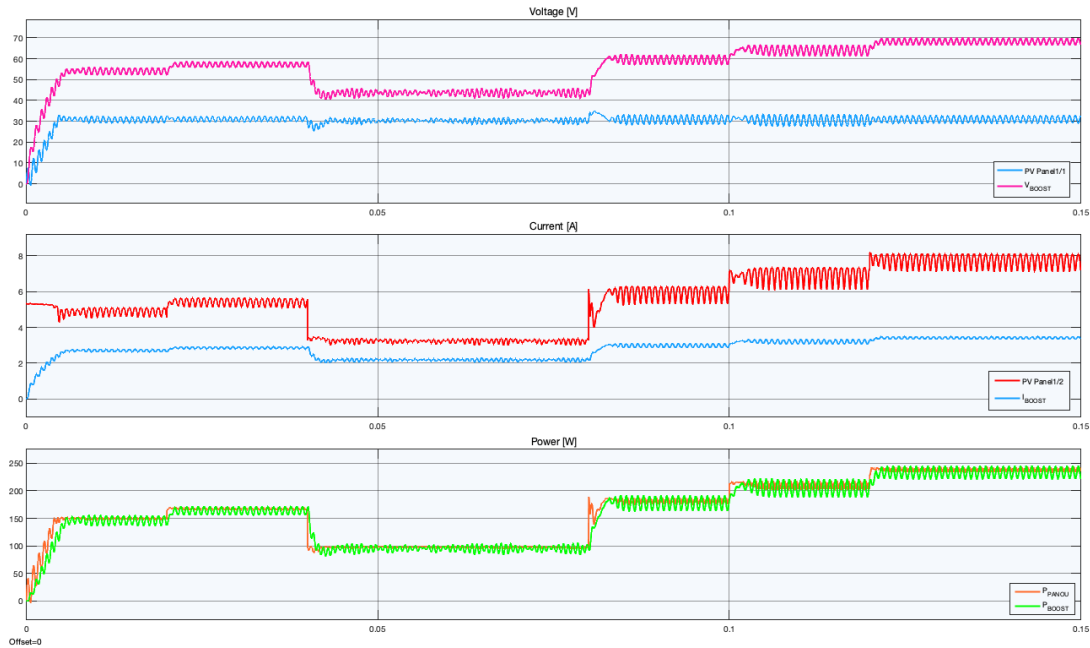


Figura 4.15: Rezultatele simulării folosind algoritmul de urmărire *IncCond* cu sarcină de  $20\ \Omega$

Chiar și în cazul creșterii sarcinii, puterea maximă este menținută de algoritmul de urmărire și convertor. Valoarea factorului de umplere în cazul ultimului scenariu este prezentată în figura 4.16.

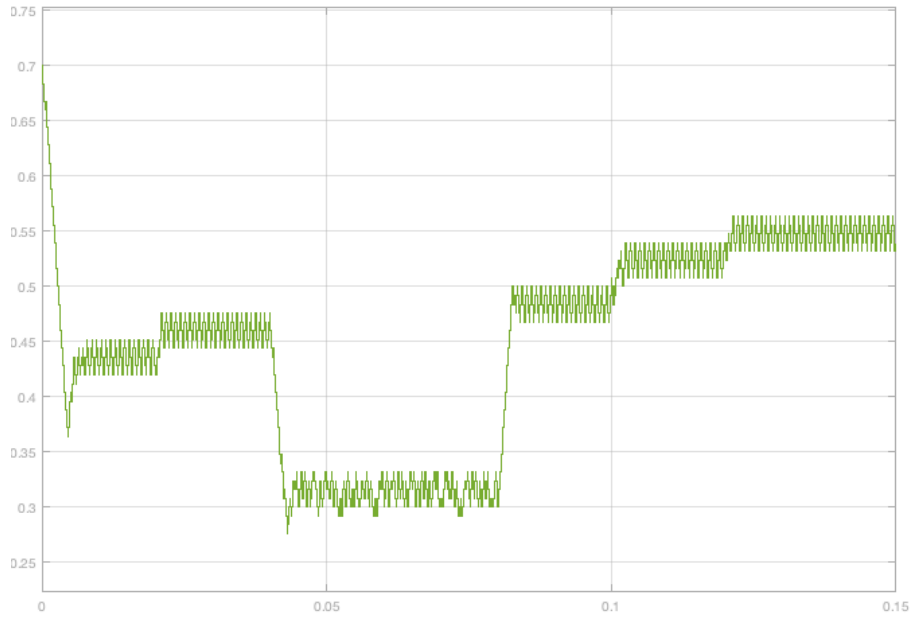


Figura 4.16: Valoarea factorului de umplere pentru algoritmul *IncCond*

Rezultatele obținute cu algoritmul *P&O* pentru sarcina de 15 *Ohm* și 20 *Ohm* sunt prezentate în figurile 4.17 4.18. Și în cazul algoritmului *Perturb&Observe* punctul de putere maximă este urmărit în ambele scenarii, diferențele față de algoritmul *IncCond* sunt mici. Acest lucru este datorat pasului ales în cadrul algoritmului, factorul de umplere fiind actualizat cu valoarea de 0.0008 la fiecare pas de eșantionare.

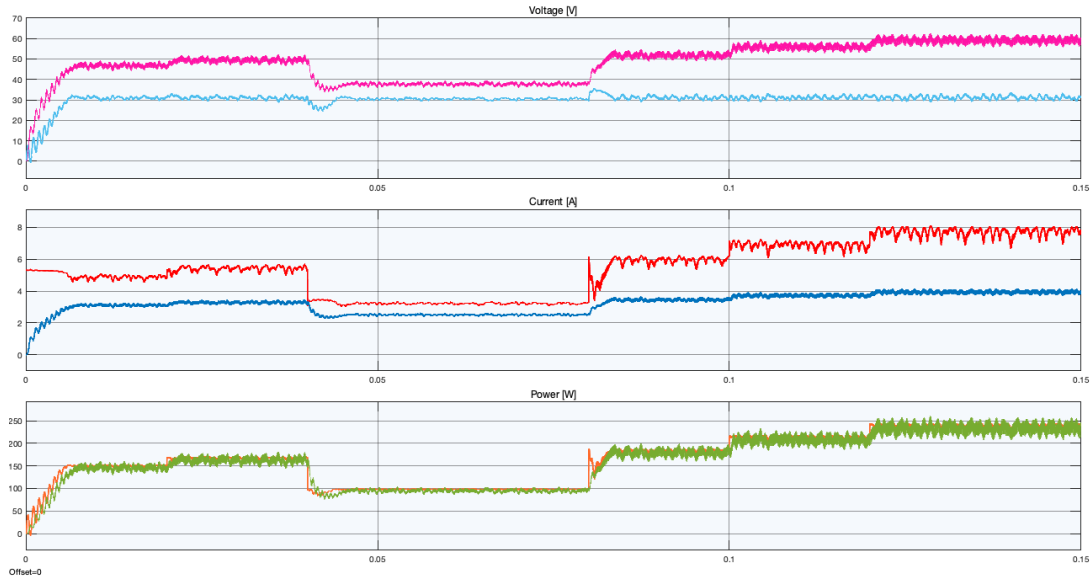


Figura 4.17: Rezultatele simulării folosind algoritmul de urmărire *P&O* cu sarcină de 15 *Ohm*

Putem observa similarități și în cazul valorii factorului de umplere pentru cei doi algoritmi. Factorul de umplere calculat în cazul algoritmului *P&O* este reprezentat în figura 4.19

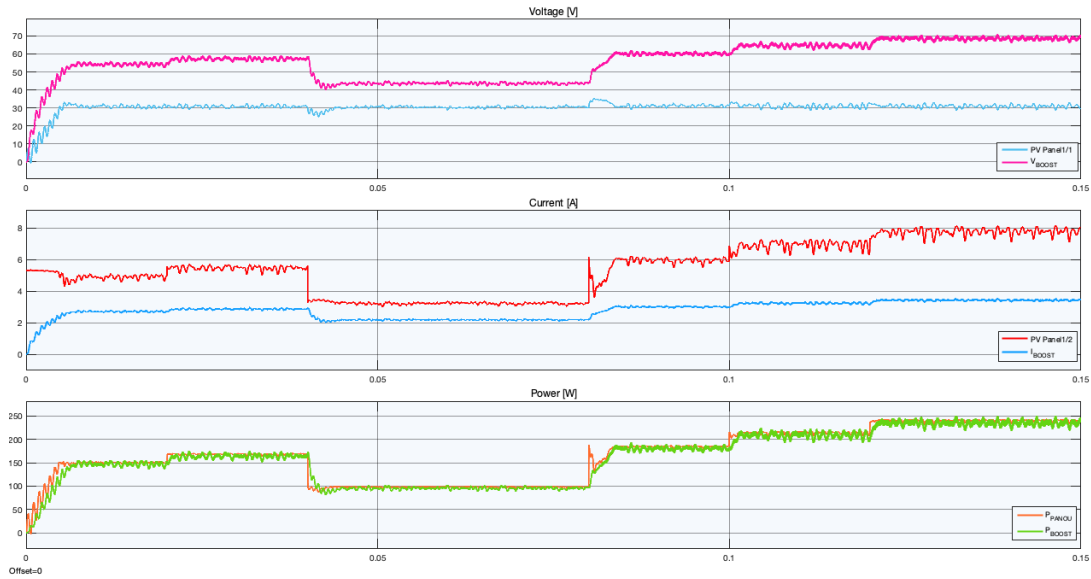


Figura 4.18: Rezultatele simulării folosind algoritmul de urmărire  $P\&O$  cu sarcină de 20  $\Omega$

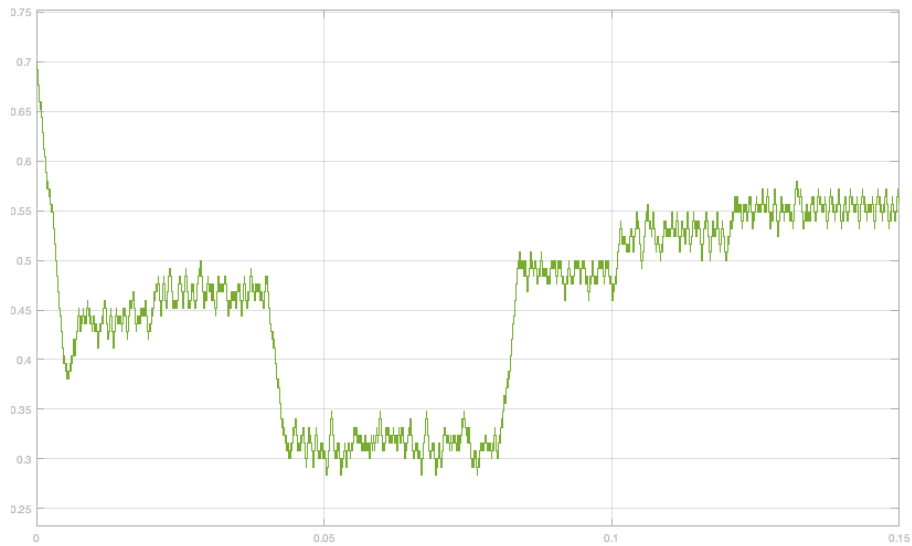


Figura 4.19: Valoarea factorului de umplere pentru algoritmul  $P\&O$

#### 4.1.5. Comparatia puterii maxime a algoritmilor si eficienta lor in scenariul de sarcina de 20 $\Omega$

Algoritm	Puterea medie la ieșire	Nivel de oscilație	Pasul actualizării ( $\Delta D$ )
Algoritmul P&O	246.12 W	18.8 W	$8 \times 10^{-4}$
Algoritmul IncCond	243.1 W	24.2 W	$8 \times 10^{-4}$

Tabela 4.1: Puterea medie și oscilația puterii în jurul  $MPP$  în condiții de radianță maxima în cazul scenariului nostru ( $972 \text{ W/m}^2$ )

4.1.6. Comparatia puterii maxime a algoritmilor si eficienta lor în scenariul de sarcina de 15 *Ohm*

Algoritm	Puterea medie la ieșire	Nivel de oscilație	Pasul actualizării ( $\Delta D$ )
Algoritmul P&O	238.37 W	38.8 W	$8 \times 10^{-4}$
Algoritmul IncCond	240.78 W	29.3 W	$8 \times 10^{-4}$
Fara MPPT	85 W		

Tabela 4.2: Puterea medie și oscilația puterii în jurul *MPP* în condiții de radianță maxima în cazul scenariului nostru ( $972 \text{ W/m}^2$ )

# Capitolul 5

## Concluzii

În cadrul acestei lucrări am elaborat modele pentru componentele specifice sistemelor fotovoltaice, în urma unei analize detaliate asupra funcționalității lor și a fenomenelor fizice și electrice ce vizează aceste sisteme. Aceste modele au fost folosite ulterior pentru a integra sistemul fotovoltaic cu algoritmi de urmărire, în vederea sporirii eficienței sistemului. Atât partea fixă, cât și partea de control, au fost proiectate utilizând mediul de dezvoltare MATLAB/Simulink. De asemenea, și partea de simulare și reprezentare grafică a rezultatelor a fost efectuată folosind MATLAB/Simulink.

### 5.1. Rezultate Obținute

Modelele obținute în urma analizei și a proiectării reprezintă, cu o acuratețe bună, caracteristicile lor de performanță. În cazul panourilor fotovoltaice, acestea au fost utilizate pentru a simula comportamentul sub diverse condiții de iradiere și temperatură. De asemenea, am creat modele pentru convertorul ridicător, esențial în scopul integrării eficiente a panourilor fotovoltaice cu algoritmi de urmărire a punctului de putere maximă. Algoritmii *MPPT* au fost implementați și evaluați în diferite scenarii pentru a optimiza extragerea puterii maxime din panourile fotovoltaice. Scopul eficientizării sistemului a fost atins atât prin modelarea și parametrizarea corectă a componentelor sistemului, cât și prin utilizarea corectă a algoritmilor și ajustarea lor pentru a respecta cerințele sistemului. Mai mult, aceste sisteme dezvoltate pe componente pot constitui un punct de pornire spre dezvoltarea eficientă atât a sistemelor fotovoltaice pentru case și ansambluri rezidențiale, cât și pentru parcuri fotovoltaice, prin ușurința parametrizării și a schimbării topologiei lor. Problemele întâmpinate pe parcursul implementării au fost legate de integrarea modelului panoului fotovoltaic cu algoritmul de control și interfațarea lor cu sistemul de stocare al energiei. Astfel, modelul panoului a fost adaptat utilizând componente din librăria *Simscape*, iar testarea modelului bateriei s-a realizat separat de acest model.

#### 5.1.1. Contribuții personale

Am adus o serie de contribuții personale în scopul îndeplinirii obiectivelor propuse. Începând cu analiza și documentarea asupra sistemelor fotovoltaice, a convertoarelor de putere, a sistemelor de stocare și a tehnologiilor folosite în industrie, specifice fiecărui sistem. Proiectarea sistemului fotovoltaic, a convertorului de putere și a bateriei pentru a respecta comportamentul lor real. Implementarea și adaptarea algoritmilor de control pentru a corespunde specificațiilor și cerințelor sistemului și, nu în ultimul rând, integrarea și testarea întregului sistem în condiții apropiate de cele reale pentru a valida rezultatele obținute. În urma testării am identificat limitările sistemului propus și eventualele îmbunătățiri ce ar putea fi aduse pentru a putea crește performanțele și capabilitățile

acestui. În primul rând, costul computațional și timpul de simulare ar putea fi redus găsind o soluție la problema interfatarei modelului panoului fotovoltaic, al convertorului și a bateriei. Modelul bateriei dezvoltat prezintă capabilități excelente de rulare în timp real. Însă restul sistemului, care modelează în detaliu fenomene electrice rapide, necesită un pas de simulare foarte mic. Acest lucru împiedică o interfațare eficientă. Situația poate fi ameliorată prin adaptarea și optimizarea modelelor pentru a permite o integrare mai eficientă și unificarea pasului de simulare.

## 5.2. Direcții de dezvoltare

În urma testelor efectuate am determinat posibilele direcții de dezvoltare pentru a îmbunătăți și extinde proiectul. Începând cu integrarea mai multor algoritmi de control dezvoltați recent, fiind posibilă dezvoltarea unei strategii de control ce folosește o combinație a algoritmilor prezentați în lucrare. O altă direcție este cea a integrării cu rețeaua de energie electrică și folosirea altor tehnologii de stocare a energiei, precum cele bazate pe hidrogen (*Fuel Cell*), în vederea creșterii numărului de locuințe alimentate de surse de energie regenerabilă și asigurării independenței energetice pentru mai mulți consumatori casnici. O altă direcție de dezvoltare este utilizarea algoritmilor bazați pe inteligența artificială în monitorizarea datelor despre consumul specific al unei locuințe și eficiența termică respectiv electrică a acesteia, precum și a defectelor la nivelul micro-componentelor sistemului fotovoltaic.

# Bibliografie

- [1] C. P. I. IRENA, 2023, investments Solar. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1387662/global-investment-in-solar-pv/>
- [2] Ember, “Leading countries in solar electricity generation worldwide in 2022 (in terawatt hours) [graph],” April 12 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1421748/global-solar-energy-generation-leading-countries/>
- [3] Ember, “Percentage change in electricity generation worldwide in 2022 relative to 2021, by source [graph],” July 17 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1243434/electricity-generation-percent-change-worldwide-by-source/>
- [4] P. Löper, D. Pysch, A. Richter, M. Hermle, S. Janz, M. Zacharias, and S. Glunz, “Analysis of the temperature dependence of the open-circuit voltage,” *Energy Procedia*, vol. 27, pp. 135–142, 2012.
- [5] F. ISE, “Photovoltaics report,” Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, Tech. Rep., May 2024.
- [6] D. Lee and S. Son, “PV forecasting model development and impact assessment via imputation of missing PV power data,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 12 843–12 852, 2024.
- [7] W. Lo, H. S. Chung, R. T. C. Hsung, H. Fu, and T. Shen, “PV panel model parameter estimation by using particle swarm optimization and artificial neural network,” *Sensors*, vol. 24, no. 10, p. 3006, 2024.
- [8] C. Huang, Y. Huang, S. Chen, S. Yang, P. Huang, and C. Chiu, “Parameters estimation of PV modules for a three-diode model using an enhanced salp swarm algorithm,” in *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2024, Bristol, UK, March 25-27, 2024*. IEEE, 2024, pp. 1–6.
- [9] M. E. Marghichi, “A solar PV model parameter estimation based on the enhanced self-organization maps,” *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 67, no. 4, pp. 413–424, 2023.
- [10] G. Shafique, J. Boukhenfouf, F. Gruson, S. Samimi, P. Delarue, P. L. Moigne, F. Colas, M. Merlin, and X. Guillaud, “Reduce order modeling of the modular multilevel dc/dc converter (m2dc) for hvdc grid.” Aalborg, Denmark: IEEE, 2023, pp. 1–8.
- [11] Y. Wang, S. Song, L. Zhu, and Z. Fu, “An adaptive sliding mode control algorithm for boost dc-dc converter of fchevs,” in *Proceedings of the 2019 8th International Conference on Networks, Communication and Computing*, ser. ICNCC ’19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1 2020, p. 212–216. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3375998.3376021>



- 
- [12] E. Isaacson and H. B. Keller, *Analysis of numerical methods*, repr. der ausg. new york, wiley, 1966 ed., ser. Dover books on advanced mathematics. London: Constable, 1994, literaturverz. S. 531 - 533.
  - [13] A. N. Mahmood Mohammad, M. A. Mohd Radzi, N. Azis, S. Shafie, and M. A. Atiqi Mohd Zainuri, "An enhanced adaptive perturb and observe technique for efficient maximum power point tracking under partial shading conditions," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3912, Jun. 2020.
  - [14] C. Li, Y. Chen, D. Zhou, J. Liu, and J. Zeng, "A high-performance adaptive incremental conductance mppt algorithm for photovoltaic systems," *Energies*, vol. 9, no. 4, p. 288, Apr. 2016.
  - [15] E. Mammeri, A. Necaibia, A. Ahriche, A. Bouraiou, and I. Hassani, "A hybrid gwo-pso algorithm for global mpp tracking in pv systems under pscs." Adrar, Algeria: IEEE, 2023, pp. 1–5.
  - [16] I. Pervez, C. Antoniadis, and Y. Massoud, "A reduced search space exploration metaheuristic algorithm for mppt," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26 090–26 100, 2022.
  - [17] R. A. Huggins, *Advanced batteries*. New York, NY: Springer, 2009.
  - [18] S. Gao, C. Xiang, and T. H. Lee, "Highly efficient photovoltaic parameter estimation using parallel particle swarm optimization on a gpu," in *2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, Jun. 2021.
  - [19] A. M. Eltamaly and H. M. H. Farh, *PV Characteristics, Performance and Modelling*. Springer International Publishing, Jul. 2019, pp. 31–63.
  - [20] D. Fregosi and M. Bolen, "An evaluation of empirical models for use in normalizing pv plant performance data." Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2022, pp. 0116–0120.
  - [21] R. Jackey, M. Saginaw, P. Sanghvi, J. Gazzarri, T. Huria, and M. Ceraolo, "Battery model parameter estimation using a layered technique: An example using a lithium iron phosphate cell," in *SAE Technical Paper Series*, ser. ANNUAL. SAE International, Apr. 2013.
  - [22] A. Gismero, E. Schaltz, and D.-I. Stroe, "Recursive state of charge and state of health estimation method for lithium-ion batteries based on coulomb counting and open circuit voltage," *Energies*, vol. 13, no. 7, p. 1811, Apr. 2020.
  - [23] M. Ruba, R. Nemeş, S. Ciornei, and C. Marţiş, *Parameter Identification, Modeling and Testing of Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles*. IntechOpen, Mar. 2020.
  - [24] G. dos Reis, C. Strange, M. Yadav, and S. Li, "Lithium-ion battery data and where to find it," *Energy and AI*, vol. 5, p. 100081, Sep. 2021.
  - [25] C. Yanarates, Y. Wang, and Z. Zhou, "Unity proportional gain resonant and gain scheduled proportional (PR-P) controller-based variable perturbation size real-time adaptive perturb and observe (p&o) MPPT algorithm for PV systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 138 468–138 482, 2021.

- [26] F. Paz and M. Ordonez, “High-accuracy impedance detection to improve transient stability in microgrids,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 8167–8176, Oct. 2017.
- [27] ———, “Fast and efficient solar incremental conductance mppt using lock-in amplifier,” in *2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, Jun. 2015.