

**IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**  
**Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești**



# **REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

## **CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA PERFORMANȚELOR SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE**

**Doctorand,  
Ing. Alexandru DUȘA**

**Conducător științific,  
Prof. univ. dr. ing. habil. Petru LIVINȚI**

**Seria I3: Inginerie Electrică Nr. 8  
GALAȚI, 2024**

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI  
Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



# REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

## CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA PERFORMANȚELOR SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

**Doctorand**

**Ing. Alexandru DUȘA**

**Președinte,**

**Prof. univ. dr. ing. habil. Gabriela RÂPEANU**  
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

**Conducător științific,**

**Prof. univ. dr. ing. habil. Petru LIVINȚI**  
Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău

**Referenți științifici**

**Prof. univ. dr. ing. habil. Laurențiu-Dan MILICI**  
Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava

**Prof. univ. dr. ing. habil. Mihaela POPESCU**  
Universitatea din Craiova

**Prof. univ. dr. ing. habil. Marian GĂICEANU**  
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

**Seria I3: Inginerie Electrică Nr. 8**  
**GALAȚI, 2024**

## CUPRINS

<b>CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL.....</b>	<b>1</b>
1.1 SISTEME FOTOVOLTAICE.....	1
1.1.1 Panouri fotovoltaice .....	1
1.1.2 Tipuri de conexiuni .....	3
1.1.3 Metode de comandă MPPT .....	4
1.2 FILTRE ACTIVE DE PUTERE .....	4
1.2.1 Invertoare utilizate.....	4
1.2.2 Topologii .....	6
1.2.3 Metode de comanda .....	6
1.2.4 Metode de generare a impulsurilor de comandă .....	7
1.3 ÎMBUNĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE UTILIZÂND SISTEME FOTOVOLTAICE .....	8
1.3.1 Filtru Activ Paralel cu panouri fotovoltaice .....	8
1.3.2 Filtru Activ serie cu panouri fotovoltaice .....	8
1.3.3 Filtru hibrid - activ cu conexiune mixtă cu panouri fotovoltaice .....	9
<b>CAPITOLUL 2. DIMENSIONAREA ELEMENTELOR PASIVE .....</b>	<b>10</b>
2.1 DIMENSIONAREA CONVERTORULUI RIDICĂTOR DE TENSIUNE.....	10
2.2 DIMENSIONAREA FILTRULUI ACTIV DE PUTERE .....	12
2.2.1 Determinarea nivelului de tensiune.....	12
2.2.2 Determinarea capacității.....	12
2.2.3 Determinarea inductivităților .....	12
<b>CAPITOLUL 3. SIMULAREA SISTEMULUI PROPUS.....</b>	<b>14</b>
3.1 SIMULAREA UNUI SISTEM FOTOVOLTAIC ÎN MEDIUL DE PROGRAMARE MATLAB/SIMULINK .....	14
3.1.1 Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat .....	18
3.1.2 Simulări în condițiile unui surplus energetic.....	19
3.1.3 Simulări în condițiile unui deficit energetic .....	20
3.1.4 Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică ..	21
3.1.5 Centralizarea rezultatelor .....	22
3.2 ALEGEREA METODEI DE COMANDA COMANDĂ A FILTRULUI ACTIV DE PUTERE.....	23
3.3 SIMULAREA SISTEMULUI PROPUS ÎN MEDIUL DE PROGRAMARE MATLAB/SIMULINK .....	25
3.3.1 Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat .....	26

3.3.2 Simulări în condițiile unui surplus energetic.....	27
3.3.3 Simulări în condițiile unui deficit energetic.....	28
3.3.4 Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică ..	29
3.3.5 Centralizarea rezultatelor .....	30
3.4 CONCLUZII.....	31
<b>CAPITOLUL 4. VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A FUNCȚIONALITĂȚII ȘI STABILITĂȚII SISTEMULUI INTEGRAT PROPUȘ</b> .....	<b>32</b>
4.1 SISTEM INTEGRAT .....	32
4.2 SISTEMUL DE INTERCONECTARE A PANOURILOR FOTOVOLTAICE LA FILTRU ACTIV DE PUTERE.....	34
4.3 COMANDA SISTEMULUI .....	34
4.4 REZULTATE EXPERIMENTALE .....	36
4.4.1 Rezultate experimentale în condițiile unui surplus energetic.....	38
4.4.2 Rezultate experimentale în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică.....	40
4.5 CONCLUZII.....	42
<b>CAPITOLUL 5. CONCLUZIILE GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE.....</b>	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ .....</b>	<b>47</b>

## INTRODUCERE

Cererea de energie electrică este în continuă creștere, ceea ce a condus la o orientare semnificativă către utilizarea surselor regenerabile de energie pentru a satisface această nevoie tot mai mare. Totuși, odată cu extinderea capacităților de producție din surse regenerabile și creșterea volumului de energie injectat în rețea, menținerea securității și stabilității operaționale a sistemelor de alimentare devine tot mai complexă. În paralel, creșterea numărului de sarcini neliniare în instalațiile electrice contribuie semnificativ la poluarea armonică, amplificând riscurile pentru siguranța și stabilitatea rețelei de alimentare, deja supusă provocărilor în urma integrării surselor regenerabile.

Această lucrare prezintă un studiu asupra integrării sistemelor fotovoltaice în rețelele electrice de joasă tensiune, utilizând filtrul activ paralel pentru îmbunătățirea calității energiei electrice.

Capitolul 1 analizează tendințele actuale în domeniul energiei regenerabile, subliniind creșterea cererii de energie electrică și trecerea către sursele regenerabile, cu accent către sistemele fotovoltaice. În acest context, este descrisă structura panourilor fotovoltaice, metodele de optimizare a eficienței acestora prin algoritmi MPPT și tipurile de conectare la rețele electrice. De asemenea, sunt prezentate principalele topologii ale filtrelor active de putere și metodele de comandă, precum și tendințele actuale în injectarea energiei regenerabile folosind filtre active.

Capitolul 2 tratează dimensionarea convertorului ridicător de tensiune în funcție de configurația și puterea instalată a panourilor fotovoltaice. Tot în acest capitol este detaliată dimensionarea Filtrului Activ de Putere, având în vedere conectarea panourilor fotovoltaice pe partea de curent continuu.

Capitolul 3 prezintă o analiză comparativă realizată de autor între un sistem fotovoltaic convențional și Sistemul Integrat propus. În această analiză au fost dezvoltate patru studii distincte, care explorează posibilele moduri de operare ale ambelor sisteme.

Capitolul 4 descrie standul experimental dezvoltat pentru testarea Sistemului Integrat. În acest capitol au fost realizate, de asemenea, două studii distincte care evidențiază funcționalitatea și stabilitatea sistemului integrat propus.

Capitolul final sintetizează concluziile tezei de doctorat și evidențiază contribuțiile aduse de autor în domeniul cercetării.

Part of this study was supported by the CRESC INTEL project „Knowledge Transfer Regarding the Energy Efficiency Increase and Intelligent Power Systems”, code Smis 105803, project co-funded by the European Union from the European Regional Development Fund through the Competitiveness Operational Program 2014-2020.

## CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL

În prezent, cererea de energie electrică se află într-o creștere constantă, iar pentru a satisface această necesitate tot mai mare, se remarcă o tendință semnificativă de tranziție către utilizarea surselor de energie regenerabilă.

Tendențele actuale și prognozele privind creșterea producției de energie electrică din surse regenerabile de energie și reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, arată un trend accelerat, prezentat în *Tabelul 1.1* [1]. Pentru perioada 2021-2031, se estimează o creștere cu 139,71% a puteri instalate pentru sursele de energie din resurse regenerabile, în special din energia solară, care este prognozată să înregistreze un salt considerabil până în 2031.

*Tabelul 1.1. Evoluția surselor regenerabile de energie [1]*

Tip SRE	2021	2022	2025	2026	2030	2031
Eoliană [MW]	2965	3400	4334	4500	5255	5300
Solară [MW]	1308	1500	3393	3500	5054	5100
Biomasă [MW]	124	125	126	128	137	140

Această tendință de creștere a puterii instalate a surselor fotovoltaice, se datorează atât reducerii costurilor de instalare, cât și creșterii performanței sistemelor. [2]

### 1.1 Sisteme fotovoltaice

Un sistem fotovoltaic convertește direct energia solară în energie electrică prin efectul fotovoltaic și o adaptează la parametrii electrici ceruți de consumator. Aceste sisteme pot fi: [3] [4]

**Sisteme fotovoltaice conectate la rețea**, acest sistem funcționează în paralel cu rețeaua electrică, permițând schimburi de energie între sistem și rețea, fie pentru alimentarea consumatorilor locali, fie pentru injectarea surplusului de energie în rețea. [5]

**Sisteme fotovoltaice autonome**, acest sistem este independent de rețeaua electrică, fiind compus din panouri fotovoltaice și un sistem de stocare a energiei electrice. [5]

**Sisteme fotovoltaice hibride**, acest sistem combină panourile fotovoltaice cu alte surse de energie electrică, cum ar fi rețeaua electrică, generatoarele electrice sau sistemele eoliene, și adesea include baterii pentru stocarea energiei. [3]

#### 1.1.1 Panouri fotovoltaice

##### a) Construcția panourilor fotovoltaice

Panoul fotovoltaic este construit din celule grupate în module, iar pentru obținerea tensiunii și curentului dorit acestea se conectează fie în serie, fie în paralel. Un panou fotovoltaic este format, în medie, din 72 celule, în prezent în funcție de dimensiunile panourilor fotovoltaice pot ajunge și până la 156 celule [6] [7] [8]. În *Figura 1.1* se prezintă un aranjament al celulelor fotovoltaice.

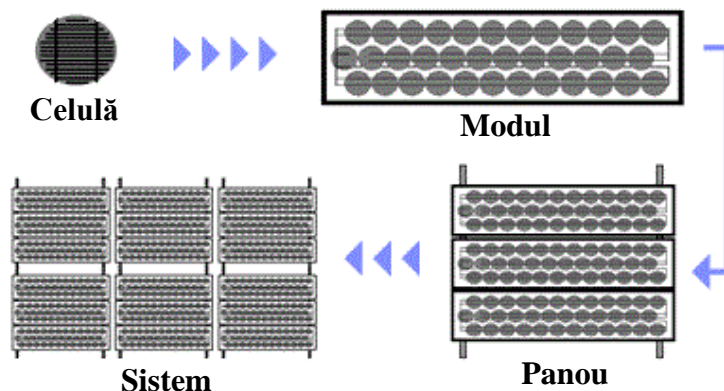


Figura 1.1. Modul de aranjare a celulelor fotovoltaice [9]

În Figura 1.2 este prezentată construcția panoului fotovoltaic, detaliată pe straturi [8] [10].

**Rama din aluminiu** are un rol esențial, protejând marginile celulelor fotovoltaice și asigură o structură solidă pentru montarea panoului solar în poziția corespunzătoare.

**Sticla** asigură protecția celulelor fotovoltaice împotriva intemperiilor, aceasta este călită și oferă o înaltă rezistență.

**EVA** (etilen-vinil-acetat) este un strat special de polimer foarte transparent, folosit pentru încapsularea celulelor fotovoltaice, protejându-le de stresul mecanic și umiditate.

**Celulele solare** fotovoltaice permit conversia directă a luminii solare în energie electrică.

**Stratul de protecție** funcționează ca o barieră împotriva umezelii și oferă protecție mecanică și izolație electrică.

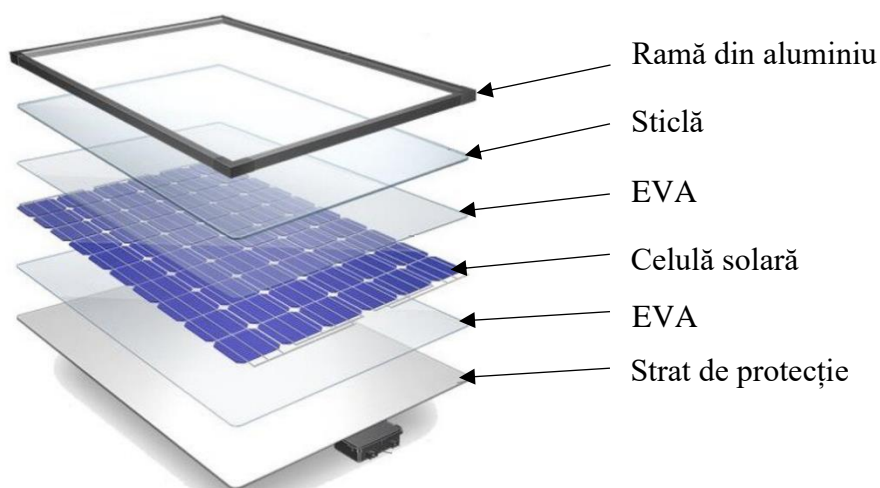


Figura 1.2. Construcția panoului fotovoltaic [11]

## b) Clasificarea panourilor fotovoltaice

Tehnologia fotovoltaică este într-o continuă evoluție care a dat naștere mai multor tipuri de celule. Panourile fotovoltaice se pot clasifica pe materialele fotovoltaice utilizate: [10] [12] [13] [14]

**Celulele monocristaline** sunt realizate din siliciu monocristalin, o formă extrem de pură a siliciului, cu atomii orientați pe o singură direcție.

**Celulele policristaline** sunt fabricate din cristale de siliciu orientate în direcții diferite.

**Celulele cu siliciu amorf (a-Si)** utilizează o formă necristalină de siliciu, având o eficiență redusă în comparație cu celulele cristaline.

**Celulele cu telurură de cadmiu (CdTe)** au fost printre primele tipuri de celule fotovoltaice cu strat subțire. Din motive legate de protecția mediului, utilizarea lor pe scară largă este puțin probabilă.

**Celule cu sulfură de Galiu-Indiu-Germaniu (GIGS)** acest tip de celulă prezintă cea mai ridicată eficiență din categoria celor cu strat subțire.

**Celulele fotovoltaice concentrate (CPV)** funcționează pe același principiu ca celulele fotovoltaice tradiționale, cu excepția utilizării lentilelor optice și oglinzilor curbate pentru a concentra lumina solară pe panou.

**Celulele sensibilizate cu coloranți (DSSC)** folosesc structuri organice pentru a converti lumina în energie electrică, printr-un proces similar cu fotosinteza.

**Celulele organice** sunt simple, fabricate din semiconductori organici. Aceste celule se disting prin coeficienți de absorbție optică ridicați și costuri reduse de producție, având un potențial promițător pentru viitor.

**Celule Hibride** reprezintă o combinație de celule, care pot fi organice și anorganice sau celule de siliciu cristalin combinate cu celule de siliciu amorf.

### 1.1.2 Tipuri de conexiuni

În funcție de configurația și conectarea panourilor fotovoltaice la inverter, pot exista următoarele tipuri de sisteme fotovoltaice conectate la rețea:

#### **Sistem fotovoltaic cu inverter central**

Această configurație implică utilizarea unui singur inverter alimentat de la mai multe șiruri fotovoltaice. Avantajele acestui sistem constau în capacitatea de a gestiona puteri instalate mari, o fiabilitate sporită și costuri reduse. Dezavantajele acestui sistem includ reducerea eficienței generale în cazul defectării unui singur panou fotovoltaic, precum și utilizarea unui singur sistem MPPT comun. [15] [16]

#### **Sistem fotovoltaic cu inverter pe șir**

Sistemul presupune utilizarea unui inverter alimentat de un singur șir de panouri fotovoltaice, reprezentând o variantă de dimensiuni reduse a inverterului central. Această configurație este utilizată pe scară largă în aplicațiile rezidențiale. [15] [16]

#### **Sistem fotovoltaic cu inverter central cu mai multe șiruri**

Această configurație utilizează câte un convertor *c.c.-c.c.* pentru fiecare șir de panouri fotovoltaice, fiecare convertor operând la punctul de putere maximă și conectat ulterior la un inverter comun. Care permite controlul individual al fiecărui șir, îmbinând avantajele sistemelor fotovoltaice cu inverter central și ale celor cu inverter de șir. [15] [16]

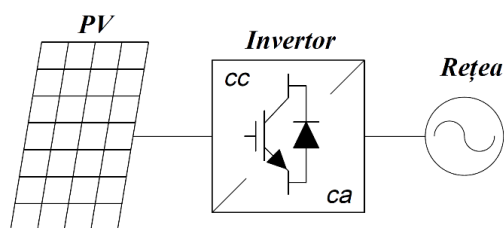
#### **a) Structurile invertoarelor fotovoltaice**

Literatura de specialitate distinge două configurații ale sistemelor fotovoltaice: cu o singură treaptă de funcționare și cu două trepte de funcționare.

#### **Sistem fotovoltaic cu o singură treaptă de funcționare**



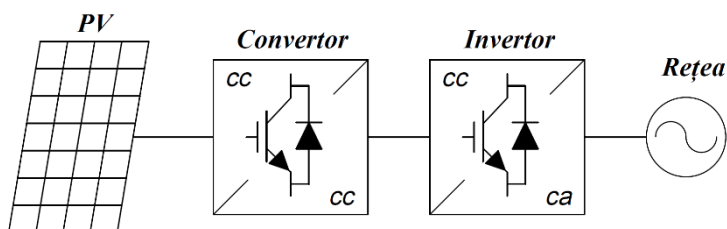
Sistemul fotovoltaic prezentat în *Figura 1.3* constă într-un inverter cu o singură treaptă de funcționare, care trebuie să îndeplinească toate funcțiile, inclusiv MPPT, injectarea curentului în rețea și sincronizarea cu tensiunea rețelei, în mod independent. [15] [16]



*Figura 1.3. Sistem fotovoltaic cu o singură treaptă de funcționare*

### Sistem fotovoltaic cu două trepte de funcționare

Schema bloc a sistemului fotovoltaic cu două trepte de funcționare, este prezentată în *Figura 1.4*. Convertorul asigură extragerea puterii maxime în prima etapă, după care inverterul transformă tensiunea continuă în tensiune alternativă. [15] [17]



*Figura 1.4. Sistem fotovoltaic cu două trepte de funcționare*

#### 1.1.3 Metode de comandă MPPT

În literatura de specialitate există peste 50 de metode MPPT, fiecare având propriile procese, avantaje, dezavantaje și domenii de aplicare [18]. Cele mai utilizate, simple și robuste metode sunt algoritmul Perturbă și Observă (P&O) și metoda Conductanței Incrementale (INC).

##### Metoda perturbă și observă (P&O)

Această metodă clasică este una dintre cele mai utilizate și simple [19], care funcționează la punctul de putere maximă atunci când raportul dintre derivata puterii și derivata tensiunii este egal cu zero. În caz contrar, tensiunea panourilor va crește sau scădea: atunci când panta este pozitivă, tensiunea crește, iar când panta devine negativă, tensiunea scade. [20] [21]

##### Metoda conductanței incrementale (INC)

Algoritmul de conductanță incrementală face parte din metodele clasice și este utilizat pe scară largă datorită preciziei ridicate în urmărirea punctului de putere maximă și adaptării rapide la modificările intensității radiației solare, în comparație cu algoritmul P&O. Similar metodei P&O, INC se bazează pe variația puterii în raport cu tensiunea, care devine zero la punctul de putere maximă [22].

## 1.2 Filtre active de putere

### 1.2.1 Invertoare utilizate

Filtrele active de putere pot fi considerate surse de curent sau de tensiune controlate, capabile să compenseze diverse probleme legate de calitatea energiei electrice, precum:

- Compensarea armonicilor de curent;
- Compensarea armonicilor de tensiune;
- Compensarea puterii reactive;
- Controlul curentului prin conductorul de nul;
- Limitarea flickerului;
- Echilibrarea sistemului de tensiuni trifazate;
- Compensarea golurilor și căderilor de tensiune.

Majoritatea filtrelor active de putere adoptă o topologie clasică pe două niveluri de tensiune pentru convertorul de putere [23]. În cazul sistemelor trifazate, se disting două configurații de invertoare:

### Invertorul alimentat în tensiune

Figura 1.5 prezintă schema invertorului trifazat alimentat în tensiune, frecvent utilizat în implementarea Filtrelor Active. Ieșirea în curent a invertorului permite compensarea armonicilor de curent, fiind astfel una dintre cele mai răspândite soluții în rețelele electrice. [24]

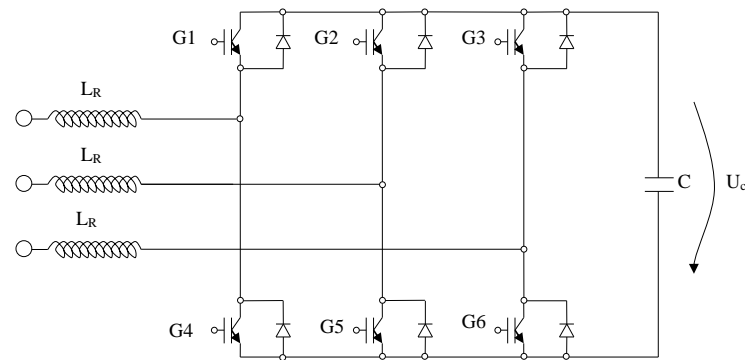


Figura 1.5. Invertor trifazat alimentat în tensiune

### Invertorul alimentat în curent

Schema invertorului trifazat alimentat în curent, prezentată în Figura 1.6, aceasta are unele dezavantaje, cum ar fi necesitatea utilizării unei inductanțe de acumulare de valoare mare și a unei baterii de condensatoare pe partea de rețea. În cazul utilizării IGBT-urilor pentru realizarea convertorului, acestea trebuie înseriate cu diode pentru a preveni conducția inversă, ceea ce duce la dublarea pierderilor de putere și la reducerea randamentului. [24]

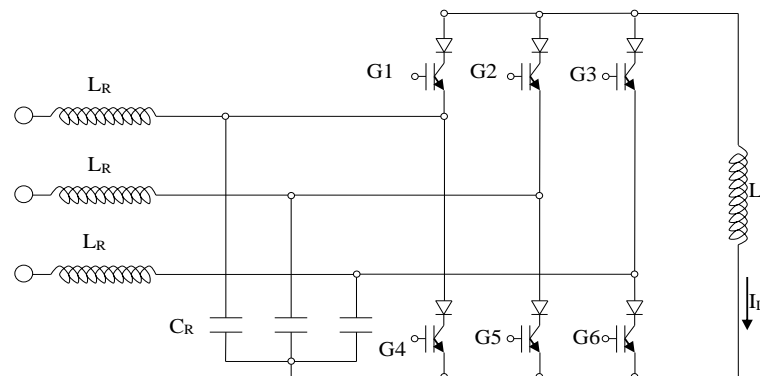


Figura 1.6. Invertor trifazat alimentat în curent

### 1.2.2 Topologii

În literatura de specialitate se regăsesc mai multe topologii ale tehnicilor de utilizare pentru îmbunătățirea calității energiei electrice, ele sunt prezentate mai jos: [25] [26] [27] [28]

- Filtru activ paralel
  - Invertor alimentat în tensiune;
  - Invertor alimentat în curent.
- Filtru activ serie
  - Invertor alimentat în tensiune;
- Filtru activ hibrid
  - Filtru activ paralel și pasiv paralel;
  - Filtru activ serie și pasiv paralel;
  - Filtru activ serie cu filtru pasiv paralel;
  - Filtru activ cu conexiune mixtă – UPQC.

### 1.2.3 Metode de comandă

Comanda filtrelor active implică generarea semnalelor de referință pentru filtrul activ de putere, care corespund curenților ce trebuie injectați de acesta și a impulsurilor de comandă, necesare pentru dispozitivele semiconductoare de putere. [29]

Metodele de comandă se clasifică în două categorii principale: comandă în buclă deschisă și comandă în buclă închisă.

**Comanda în buclă deschisă** – se injectează în rețea un curent electric destinat compensării unei părți considerabile a armonicilor. Această abordare nu implică utilizarea unui sistem de feedback, ceea ce înseamnă că nu se colectează informații referitoare la efectele compensării realizate de filtru asupra rețelei electrice.

**Comanda în buclă închisă** – integrează un sistem de feedback care optimizează performanța filtrului prin identificarea componentelor poluante și actualizarea continuă a semnalului de compensare.

La rândul său, comanda filtrelor în buclă închisă se poate realiza în domeniul timp sau în domeniul frecvență.

#### **Determinarea referinței în domeniul timp**

Există două abordări pentru identificarea componentelor poluante în domeniul timp.

##### *Metoda cu filtru trece sus*

Metoda implică utilizarea unui filtru trece sus pentru a elimina componenta fundamentală din curentul electric de sarcină, obținând astfel curentul armonic. Curentul armonic, în opoziție de fază, este apoi utilizat ca referință pentru filtrul activ. Totuși, această metodă prezintă o eroare semnificativă de fază și amplitudine, fiind, sensibilă la zgomotele de frecvență înaltă, ceea ce poate afecta performanța sistemului. [29]

##### *Metoda cu filtru trece-jos*

Pentru implementarea acestei metode se utilizează un filtru trece jos pentru a elimina componentele de frecvență înaltă din curentul electric absorbit de sarcină, obținând componenta fundamentală. Referința pentru filtrul activ se generează prin scăderea componentei

fundamentale din curentul distorsionat al sarcinii, rezultând semnalul de referință necesar pentru compensare. [29] [30]

În continuare sunt prezentate principalele metode de comandă în domeniul timp:

- **Metoda de comandă a puterilor instantanee (p-q)**

Metoda de comandă a puterilor instantanee (p-q) utilizează transformarea Clarke pentru a descompune tensiunile și curenții trifazați din sistemul a-b-c în cadrul de referință staționar  $\alpha$ - $\beta$ . Această metodă separă componentele active și reactive ale puterii instantanee, eliminând componenta fundamentală activă, pentru a genera semnalul de referință în coordonatele  $\alpha$ - $\beta$ . Semnalul de referință este apoi transformat înapoi în sistemul a-b-c prin transformarea Clarke inversă, asigurând controlul filtrului activ [31] [30].

- **Metoda de comandă a algoritmului sincron (dq)**

Această metodă utilizează transformarea Clarke pentru a obține componentele curentului de sarcină în coordonatele  $\alpha$ - $\beta$ , urmată de aplicarea transformării Park pentru a genera sistemul de referințe sincron  $id$  și  $iq$ . Prin aceste transformări, componenta fundamentală a curentului de sarcină devine continuă, iar armonicile devin componente alternative. Un filtru trece-sus poate elimina componenta continuă, iar transformarea inversă furnizează referința de curent pentru controlul filtrului activ [29].

- **Metoda de comandă indirectă**

Metoda de comandă indirectă permite controlul filtrului activ de putere fără a cunoaște spectrul curenților sarcinii neliniare. Aceasta generează curenții de referință pe baza erorilor dintre curenții măsurați și cei impuși, asigurând astfel compensarea armonicilor și îmbunătățirea calității energiei electrice [32] [33].

- **Metoda de comandă – sincronizarea curentului circulat cu componenta secvență pozitivă a tensiunii**

Metoda de comandă bazată pe sincronizarea curentului absorbit cu secvență pozitivă a tensiunii de la sursă. Aceasta asigură compensarea armonicilor și puterii reactive, reducerea curentului de nul, îmbunătățind astfel calitatea energiei electrice [30].

#### 1.2.4 Metode de generare a impulsurilor de comandă

Literatura de specialitate prezintă mai multe tipuri de tehnici de control pentru filtrele active. [23] [27]

##### **Control histerezis cu bandă fixă**

Această metodă detectează diferențele dintre semnalul de referință și curentul de compensare, iar eroarea este încadrată într-o bandă de histerezis predefinită. Avantajele acestei metode includ performanța ridicată, implementarea ușoară, răspunsul tranzitoriu rapid și robustețea. Ca dezavantaj, se remarcă frecvența de comutație variabilă [23] [27].

##### **Control histerezis cu bandă variabilă**

Această metodă permite ajustarea dinamică a limitelor benzii de histerezis, obținând astfel o frecvență constantă. [23] [27] [30]

##### **Tehnica de control liniar sau semnal triunghiular purtător**

Această metodă compară eroarea cu o undă purtătoare triunghiulară de amplitudine și frecvență prestabilite. Eroarea este procesată printr-un regulator PI înainte de a fi comparată cu semnalul purtător. Metoda este ușor de implementat și asigură răspunsuri rapide [27] [30].

### Model de control predictiv

Această metodă poate anticipa curenții armonici și puterea reactivă utilizând un model care prognozează acțiunile viitoare. Curenții de compensare sunt determinați pe baza comportamentului anticipat, iar acest calcul implică frecvent utilizarea metodelor de optimizare pentru a minimiza discrepanțele dintre curenții mășurați și cei preconizați. Dezavantajul acestei metode constă în complexitatea calculului [23] [27].

### Control logic fuzzy

Această metodă nu necesită un model matematic și poate fi implementată cu ușurință pentru sistemele neliniare, oferind un răspuns rapid și o frecvență de comutație constantă [23] [27].

### Control curentului cu timp mort

Această metodă calculează două variabile de stare la fiecare interval de eșantionare, utilizate pentru a determina lățimea semnalului de comandă astfel încât tensiunea de ieșire să corespundă referinței la fiecare moment de eșantionare. Metoda este robustă, oferind un răspuns rapid și o frecvență de comutație constantă [23] [27].

## 1.3 Îmbunătățirea calității energiei electrice utilizând sisteme fotovoltaice

Pentru a îmbunătăți calitatea energiei electrice și a asigura o integrare eficientă a sistemelor fotovoltaice, se pot utiliza filtrele active de putere care s-a dovedit o soluție eficientă și adecvată în contextul actual.

### 1.3.1 Filtru Activ Paralel cu panouri fotovoltaice

Această abordare prezentată în *Figura 1.7* oferă numeroase beneficii, inclusiv îmbunătățirea calității energiei electrice prin reducerea armonicilor de curent și compensarea puterii reactive generate de sarcinile neliniare din rețea. În plus, soluția permite injectarea energiei fotovoltaice în rețea, contribuind astfel la optimizarea fluxului de energie și la diminuarea dependenței de surse convenționale de energie. [34] [35] [36] [37]

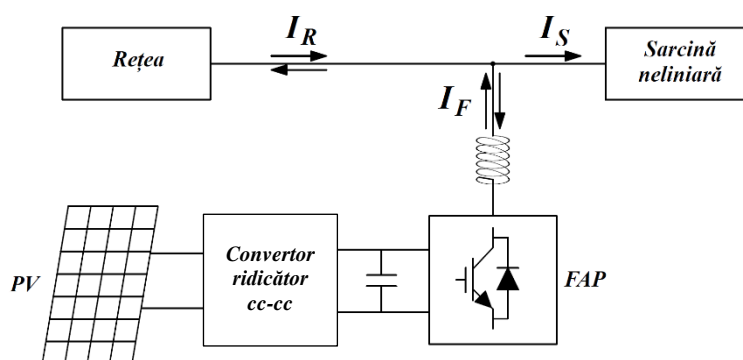


Figura 1.7. Schema bloc a Filtrului Activ Paralel alimentat de la panouri fotovoltaice

### 1.3.2 Filtru Activ serie cu panouri fotovoltaice

*Figura 1.8* ilustrează integrarea panourilor fotovoltaice prin intermediul unui filtru activ serie. Această soluție combină avantajele filtrului activ serie și poate compensa variațiile și căderile de tensiune, contribuind astfel la atenuarea problemelor legate de calitatea energiei electrice [38].

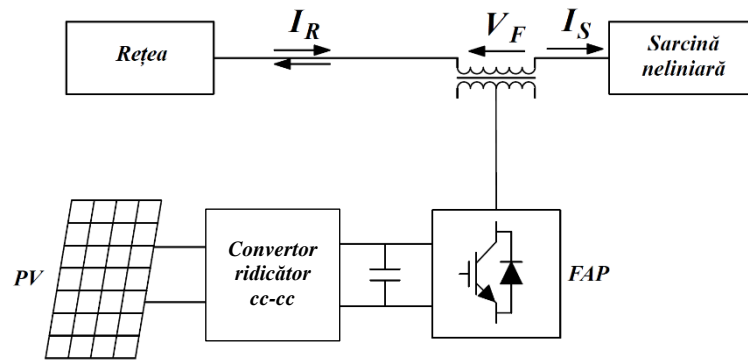


Figura 1.8. Schema bloc a Filtrului Activ Serie alimentat de la panouri fotovoltaice

### 1.3.3 Filtru hibrid - activ cu conexiune mixtă cu panouri fotovoltaice

În această configurație prezentată în Figura 1.9, Filtrul Activ cu conexiune mixtă este alimentat de panouri fotovoltaice, conectate la bara de curent continuu. Această abordare nu doar că permite injectarea energiei produse de panourile fotovoltaice în rețeaua electrică, dar contribuie și la îmbunătățirea calității energiei electrice, beneficiind de toate avantajele oferite de Filtrul Activ cu conexiune mixtă. [39] [40] [41]

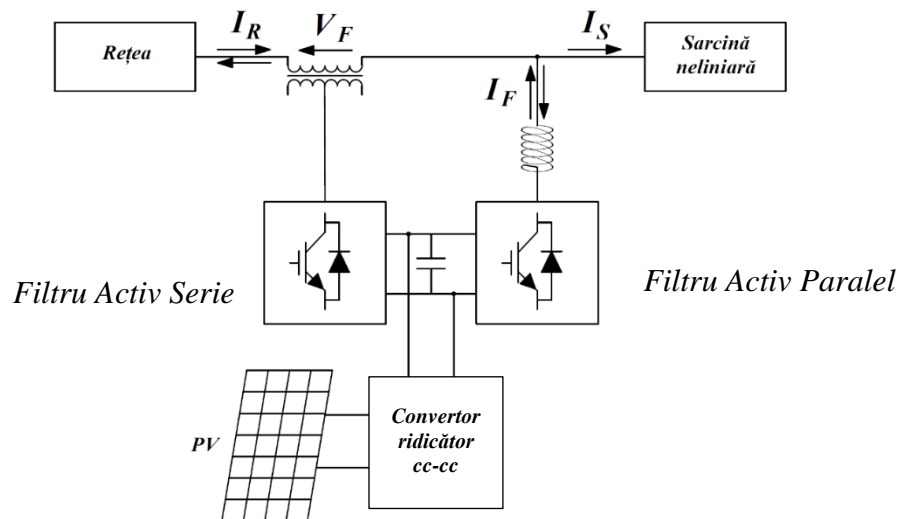


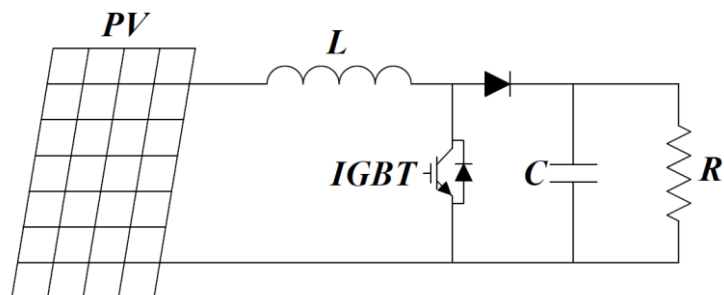
Figura 1.9. Schema bloc a Filtrului Hibrid - activ cu conexiune mixtă alimentat de la panouri fotovoltaice

## CAPITOLUL 2. DIMENSIONAREA ELEMENTELOR PASIVE

### 2.1 Dimensionarea convertorului ridicător de tensiune

Convertorul ridicător de tensiune *c.c.-c.c.* permite transformarea tensiunii de intrare într-o tensiune de ieșire superioară. Pe măsură ce tensiunea de ieșire a convertorului crește, curentul scade, asigurându-se astfel că puterea de ieșire rămâne egală cu puterea de intrare, conform relației  $P = U \cdot I$ . [24]

Schema electrică a convertorului ridicător de tensiune alimentat de la panouri fotovoltaice este prezentată în *Figura 2.1*.



*Figura 2.1. Schema electrică a convertorului ridicător de tensiune*

S-au utilizat panouri fotovoltaice modelul LG365Q1C-A5, cu caracteristicile tehnice prezentate în *Tabelul 2.1*.

*Tabelul 2.1. Caracteristicile tehnice a panourilor fotovoltaice*

Tensiune de mers în gol ( $V_{oc}$ )	42,8 [V]
Tensiunea la puterea maximă ( $V_{mpp}$ )	36.7 [V]
Curentul de scurtcircuit ( $I_{sc}$ )	10.8 [A]
Curentul la puterea maximă ( $I_{mpp}$ )	9.95 [A]
Coeficientul de temperatură la $V_{oc}$	-0,24 [%/°C]
Coeficientul de temperatură la $I_{sc}$	0,037 [%/°C]
Puterea maximă ( $P_{max}$ )	365 [W]

Dimensionarea convertorului ridicător de tensiune s-a realizat cu ajutorul relațiilor de calcul prezentate mai jos. [42] [43]

Determinarea puterii de intrare  $P_{in}$ :

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} \quad (2.1)$$

unde:  $V_{in}$  – tensiune de intrare;

$I_{in}$  – curentul de intrare.

Se presupune că eficiența convertorului va fi cel puțin  $\eta = 95 \%$ , cu relația de calcul (2.2) putem calcula puterea de ieșire  $P_{out}$ .

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta \quad (2.2)$$

Curentul de ieșire  $I_{out}$  se calculează:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad (2.3)$$

unde:  $V_{out}$  – tensiunea de ieșire

Determinarea rezistenței  $R$  care simulează sarcina se determină cu relația de calcul (2.4), ea permite determinarea parametrilor convertorului ridicător de tensiune.

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} \quad (2.4)$$

Ciclul de funcționare  $D$  depinde de tensiunea de intrare și de ieșire, relația de calcul (2.5).

$$D = -\left(\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1\right) \quad (2.5)$$

Timpul  $T$  corespunde unei perioade de comutație:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.6)$$

unde:  $f$  – frecvența de comutație.

Timpul tranzitoriu  $t_{on}$ :

$$t_{on} = D \cdot T \quad (2.7)$$

Determinarea bobinei  $L$ .

Curentul mediu prin bobină  $i_L$  se calculează cu relația de calcul (2.8).

$$i_L = \frac{I_{out}}{1 - D} \quad (2.8)$$

Pierdere de curent prin bobină  $\Delta i_L$  trebuie să fie cel mult 10 %.

$$\Delta i_L = i_L \cdot 10\% \quad (2.9)$$

Bobina se calculează cu relația de calcul (2.10). Iar valoarea obținută a bobinei pentru a face față cerințelor trebui să fie mai mare cu aproximativ 20 %.

$$L = \frac{V_{in} \cdot t_{on}}{\Delta i_L} \quad (2.10)$$

Determinarea condensatorului  $C$ .

Pierderile de tensiune  $\Delta V_c$  trebuie să fie mai mici de 1 %.

$$\Delta V_c = V_{out} \cdot 1\% \quad (2.11)$$

Valoarea condensatorului  $C$  se determină cu ecuația (2.12).

$$C = \frac{I_{out} \cdot t_{on}}{\Delta V_c} \quad (2.12)$$

În urma calculelor, valorile convertorului ridicător de tensiune sunt prezentate în Tabelul 2.2.

Tabelul 2.2. Caracteristici tehnice a convertorului ridicător de tensiune

Condensator [ $\mu\text{F}$ ]	25,19
Bobină [ $\text{mH}$ ]	4,7
Frecvența de comutație [ $\text{Hz}$ ]	25000
Tensiunea de intrare [ $\text{V}$ ]	367
Tensiunea de ieșire [ $\text{V}$ ]	750
Puterea de intrare [ $\text{W}$ ]	7300
Randament [%]	0,95



## 2.2 Dimensionarea Filtrului Activ de Putere

### 2.2.1 Determinarea nivelului de tensiune

Tensiunea continuă pe condensator trebuie să fie mai mare decât tensiunea de vârf a sistemului electric în orice moment [44] [45]. Astfel:

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{fază} < U_{dc} \leq 4 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{fază} \quad (2.13)$$

Unde:

$U_{fază}$  - tensiunea efectivă de fază.

Aplicând (2.13), intervalul tensiunii pe condensator este:

$$U_{dc} = 650 \div 1300 [V] \quad (2.14)$$

Valoarea tensiunii continue s-a ales 750 V.

### 2.2.2 Determinarea capacității

Condensatorul are două funcții esențiale: menținerea tensiunii  $U_{cc}$  și stocarea energiei în regim tranzitoriu pentru a facilita compensarea.

Determinarea valorii condensatorului se bazează pe analiza simplificată a fluxului instantaneu a puterii aparente pentru încărcarea bateriei atunci când se efectuează echilibrarea sarcinii la puterea nominală [46]. Expresia de proiectare a condensatorului este prezentată în (2.15).

$$C = \frac{S}{2 \cdot \omega \cdot U_{cc} \cdot \Delta U_{cc}} \quad (2.15)$$

Unde:

$S$  - puterea sistemului fotovoltaic;

$\omega$  - pulsația ( $2 \cdot \pi \cdot f$ );

$f$  - frecvența rețelei;

$U_{cc}$  - tensiunea barei de  $cc$  a inverterului.

$\Delta U_{cc}$  - variațiile de tensiune.

Calculul valorii condensatorului este prezentat în relația de calcul (2.16).

$$C = \frac{7300}{2 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 750 \cdot 7.5} = 2065 [\mu F] \quad (2.16)$$

Valoarea capacității de stocare s-a ales 2000  $\mu F$ .

### 2.2.3 Determinarea inductivităților

Inductivitățile sunt conectate între PCC și inverterul trifazat, iar dimensionarea corectă a acestora contribuie la îmbunătățirea capacității de filtrare.

Inductivitățile Filtrului Activ de Putere trebuie proiectate astfel încât să asigure o compensare eficientă, în condițiile modificărilor de sarcină neliniară și ale fluctuațiilor de putere generate de panourile fotovoltaice.

Abaterea maximă de curent prin bobină  $\Delta i_{f \max}$  trebuie să fie în jur de 10 % din valoarea efectivă a curentului prin bobină  $I_f$ .

$$\frac{U_{cc}}{8 \cdot f_s \cdot (Nivel - 1) \cdot \Delta i_{f \max}} \leq L \leq \frac{(0.1 \sim 0.3) \cdot U_{cc}}{h \cdot \omega \cdot I_f} \quad (2.17)$$

Unde:

$U_{cc}$  - tensiunea barei de  $cc$  a inverterului;

$f_s$  - frecvența de comutație;

$Nivel$  - nr nivele de tensiune inverter;

$\Delta i_{f \max}$  - abaterea maximă de curent prin bobină;

$h$  - ordinul celei mai mari armonici;

$\omega$  - pulsația;

$I_f$  - valoarea efectivă a curentului prin bobină.

Utilizând relația de calcul (2.17), s-a determinat valoarea inductivității, aceasta clasificându-se în intervalul  $L_{min} = 3,90 \text{ mH}$ ,  $L_{max} = 4,97 \text{ mH}$ .

$$L_{min} = \frac{750}{8 \cdot 25000 \cdot (2 - 1) \cdot 0.961} = 0.0039 [H]$$
$$L_{max} = \frac{0.1 \cdot 750}{5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9.61} = 0.00497 [H] \quad (2.18)$$

Valoarea inductivităților s-a ales  $4,7 \text{ mH}$ .

### CAPITOLUL 3. SIMULAREA SISTEMULUI PROPUS

În ultimii ani, calitatea energiei electrice a devenit o problemă semnificativă din cauza creșterii rapide a numărului de consumatori neliniari, care absorb curenți distorsionați, ca urmare a dezvoltării electronice de putere. Odată cu dezvoltarea tehnologică, cererea de energie electrică pe piață a crescut considerabil. Pentru a face față acestor cereri, se recomandă utilizarea surselor regenerabile de energie. Integrarea surselor regenerabile în rețeaua electrică, având în vedere menținerea calității energiei electrice, poate fi realizată prin utilizarea Filtrelor Active de Putere alimentate pe partea de curent continuu de către panourile fotovoltaice. [47] [48] [49] [50]

În continuare, conexiunea dintre filtrul activ de putere cu convertorul ridicător de tensiune și panourile fotovoltaice reprezintă sistemul propus de autor și va fi numit **Sistem Integrat**.

Acest capitol prezintă patru studii distincte care permit compararea unui sistem fotovoltaic clasic cu sistemul propus de autorul tezei.

Studiile examinate sunt:

- Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat;
- Simulări în condițiile unui surplus energetic;
- Simulări în condițiile unui deficit energetic;
- Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică.

#### 3.1 Simularea unui sistem fotovoltaic în mediul de programare Matlab/Simulink

Pentru a stabili o bază inițială de referință s-a simulat în mediul de programare Matlab/Simulink un sistem fotovoltaic conectat la o rețea trifazată.

În *Figura 3.1* este prezentată schema multifilară sistemului fotovoltaic conectat la rețeaua electrică.

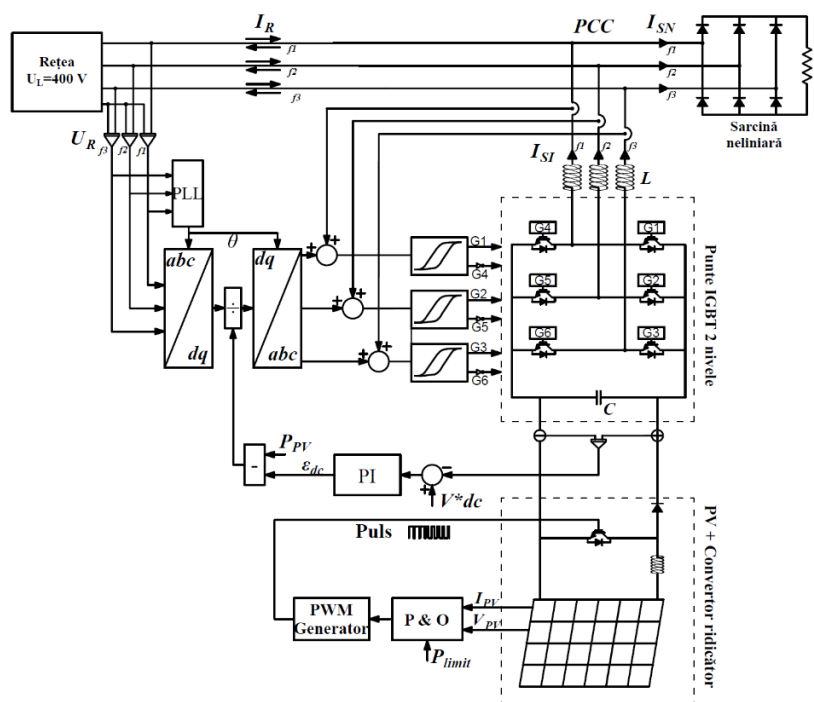


Figura 3.1. Schema multifilară a sistemului fotovoltaic conectat la rețea

Rețeaua electrică trifazată a fost proiectată cu o putere de 25 kVA, o tensiune de fază de 230 V și o frecvență de 50 Hz. Sarcina neliniară este formată dintr-o punte redresoare necomandată care alimentează o rezistență de 97 Ω.

Pentru optimizarea puterii maxime de la sistemul fotovoltaic s-a utilizat algoritmul de comandă Perturbă și Observă (P&O) modificat [51] [52]. Această metodă permite extragerea puterii maxime din panourile fotovoltaice sau limitarea acesteia la valoarea impusă. Diagrama algoritmului de comandă P&O modificat este prezentat în *Figura 3.2*.

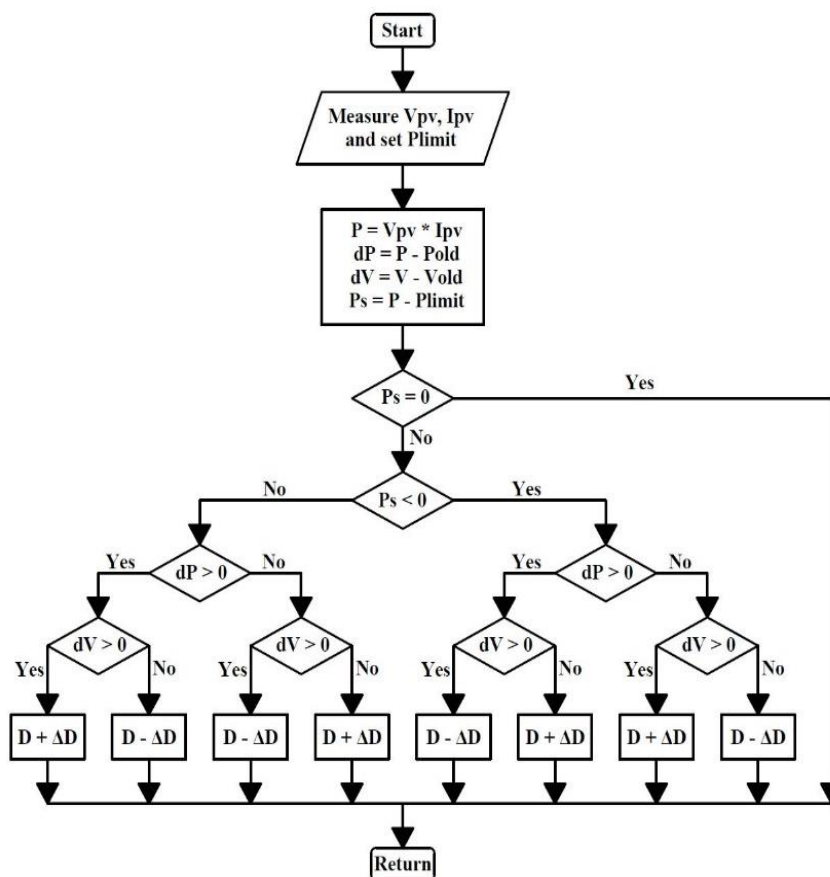


Figura 3.2. Algoritmul de comandă P&O modificat [52]

În *Figura 3.3* este prezentat modelul convertorului ridicător de tensiune realizat în mediul de programare Matlab/Simulink.

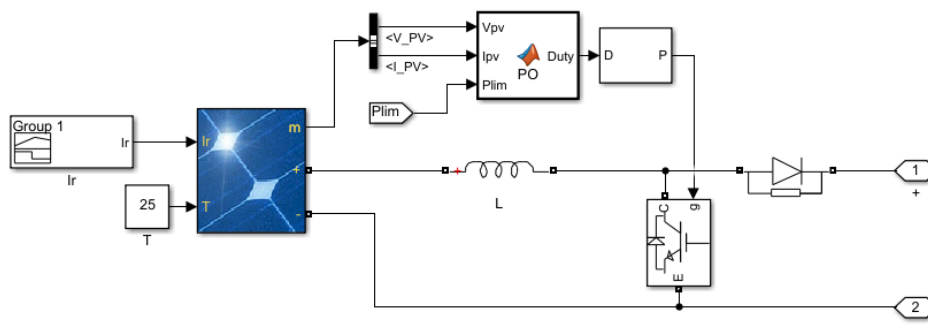


Figura 3.3. Convertor ridicător de tensiune Matlab/Simulink

Comanda inverterului trifazat se realizează prin utilizarea tehnicii de comandă a algoritmului sincron DQ [53] [54].

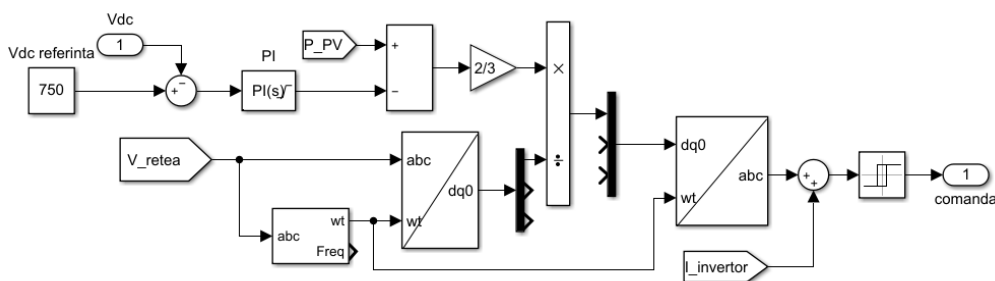
Cu ajutorul buclei de blocare a fazelor (Phase Locked Loop) putem determina unghiul de sincronizare  $\theta$ , care este folosit pentru transformata Park ( $abc \rightarrow dq0$ ).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

De unde, componenta tensiunii după axa  $d$  va fi controlată prin intermediul regulatorului PI care acționează drept comanda tensiunii de referință impusă la 750 V. După care aceste semnale vor fi din nou transformate în 3 faze ( $dq0 \rightarrow abc$ ).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & +\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Comanda inverterului trifazat realizată în Matlab/Simulink este prezentată în *Figura 3.4*



*Figura 3.4. Comanda inverterului trifazat*

Pentru comanda inverterului, s-a utilizat modularea PWM cu histerezis la o frecvență variabilă.

În continuare sunt prezentate rezultatele simulărilor efectuate pentru conectarea sistemului fotovoltaic la o rețea trifazată, în absența unei sarcini electrice. Astfel, puterea generată de panourile fotovoltaice este injectată direct în rețea.

Pentru intensitatea radiației solare  $I_r$  și temperatura  $T$ , s-au setat următoarele valori:  $I_r = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Variațiile curentului, tensiunii și puterii generate de panourile fotovoltaice și de convertorul ridicător de tensiune sunt prezentate în *Figura 3.5*.

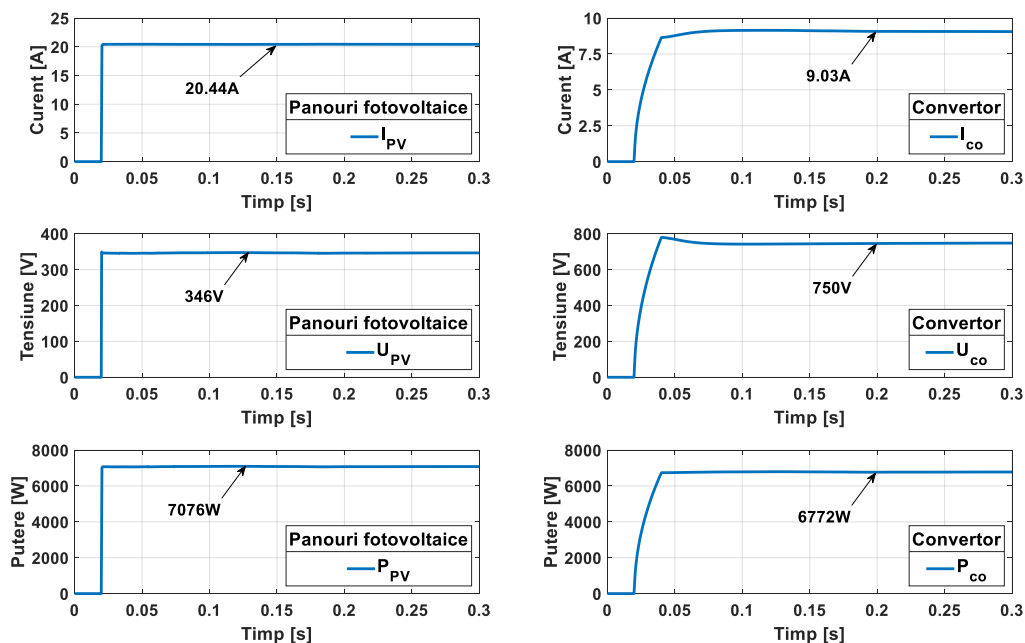


Figura 3.5. Variația curentului, tensiunii și puterii a panourilor fotovoltaice și a convertorului ridicător de tensiune

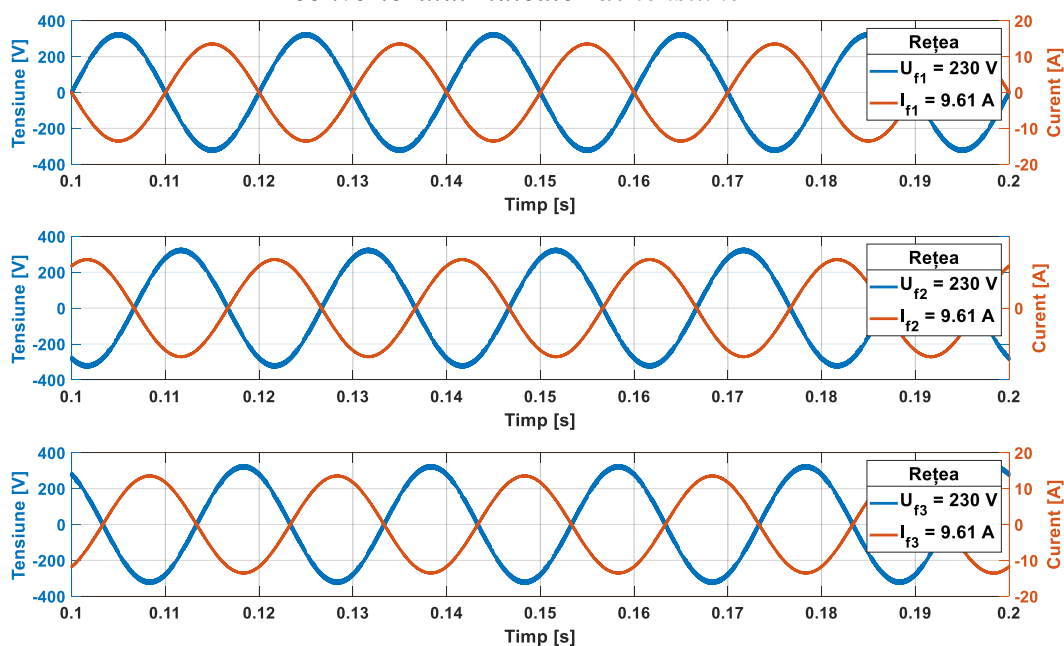


Figura 3.6. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei – fără sarcină neliniară

Figura 3.6 prezintă formele de undă ale tensiunii și curentului pentru fiecare fază a rețelei. Se observă că aceste forme de undă sunt sinusoidale, iar curentul este defazat față de tensiune, fiind în anti-fază. Sistemul fotovoltaic injectează în rețea un curent de 9,61 A.

Rezultatele analizelor transformatei Fourier rapide (FFT) pentru vizualizarea nivelului armonic al tensiunii și curentului sunt prezentate în Figura 3.7. Se poate observa că distorsiunea armonică totală a tensiunii este de 2,21%, în timp ce distorsiunea armonică totală a curentului este de 0,55%.

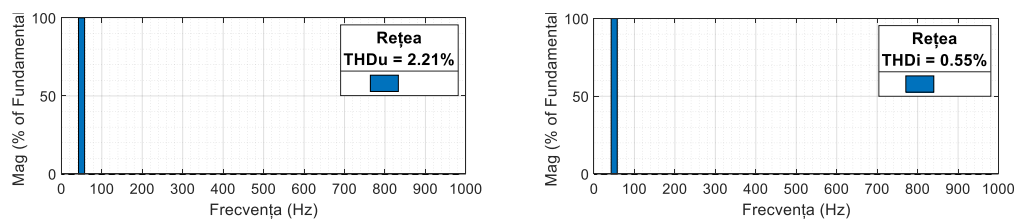


Figura 3.7. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului fără sarcină neliniară

Pentru a evidenția potențialele probleme asociate conectării sistemelor fotovoltaice și sarcinilor neliniare la rețea, au fost definite patru studii distincte:

- 1) Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat [t=0...3]s;
- 2) Simulări în condițiile unui surplus energetic [t=0,3...0,6s];
- 3) Simulări în condițiile unui deficit energetic [t=0,6...0,9s];
- 4) Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică [t=0,9...1,2s].

### 3.1.1 Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat

În cadrul primului studiu, sistemul fotovoltaic este conectat la rețeaua electrică trifazată, iar puterea electrică generată de panourile fotovoltaice este ajustată în funcție de cerințele de consum ale sarcinii neliniare. Acest mod de operare previne apariția supratensiunilor prin limitarea producției de energie electrică la nivelul necesar pentru consumul local.

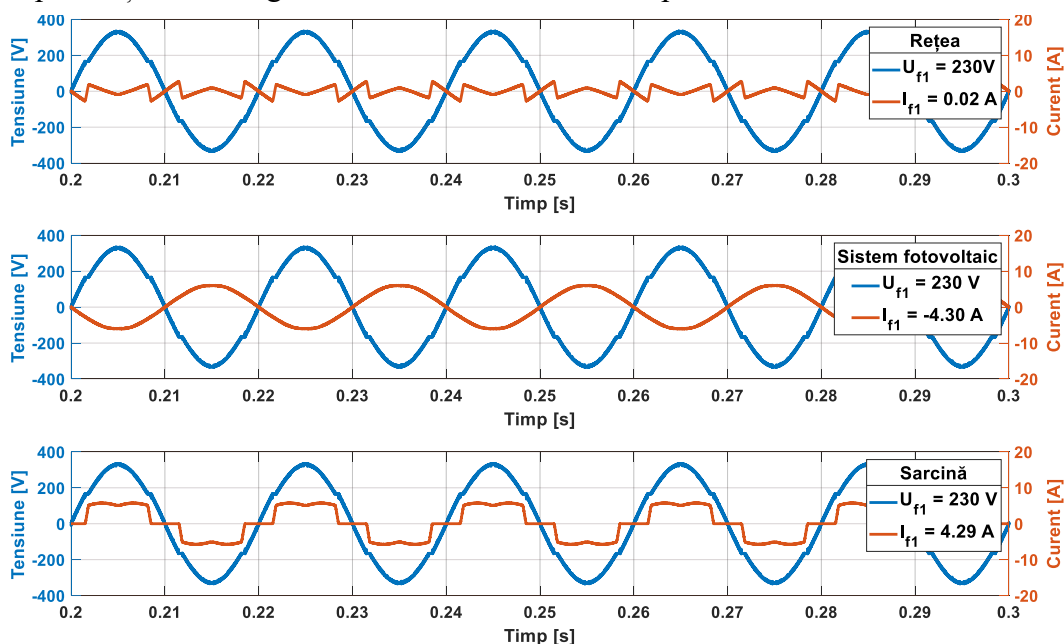


Figura 3.8. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiul 1

Formele de undă a tensiunii de alimentare și ale curentilor sunt prezentate în Figura 3.8. Se observă că sistemul fotovoltaic injectează în PCC un curent sinusoidal de 4,30 A, în opoziție de fază cu tensiunea, suficient pentru a alimenta sarcina neliniară, care absoarbe un curent de 4,29 A. Acest fapt confirmă buna funcționare a metodei de comandă P&O modificată. De asemenea, această abordare contribuie la eliminarea problemelor de supratensiune în rețea.

Rezultatele analizelor FFT ale tensiunii și curentului sunt prezentate în Figura 3.9. Se observă că, curentul absorbit de sarcina neliniară, cu un THDi de 28,21%, contribuie la distorsiunea tensiunii rețelei și influențează asupra curentul injectat de sistemul fotovoltaic,

rezultând un THDu de 3,93% și un THDi de 2,10%, comparativ cu valorile prezentate în Figura 3.7, în absența sarcinii neliniare.

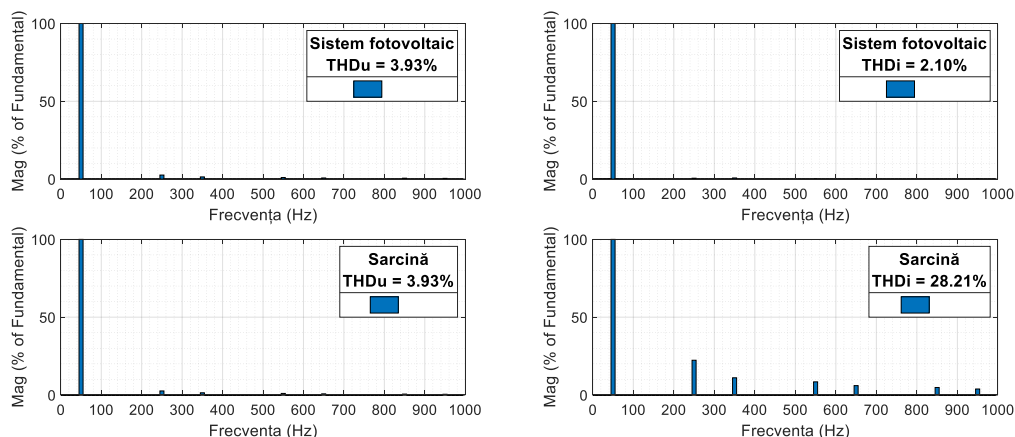


Figura 3.9. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiu 1

### 3.1.2 Simulări în condițiile unui surplus energetic

În cel de-al doilea studiu, sistemul fotovoltaic este conectat la rețeaua electrică trifazată, generând o putere electrică mai mare decât cea necesară pentru alimentarea sarcinilor neliniare, iar surplusul de energie electrică este injectat în rețea.

Formele de undă a tensiunii de alimentare și ale curenților sunt prezentate în Figura 3.10. În acest caz, sistemul fotovoltaic injectează în PCC un curent de 9,61 A, suficient pentru a alimenta sarcina neliniară, care absoarbe un curent de 4,29 A, iar surplusul de 5,34 A este injectat în rețea.

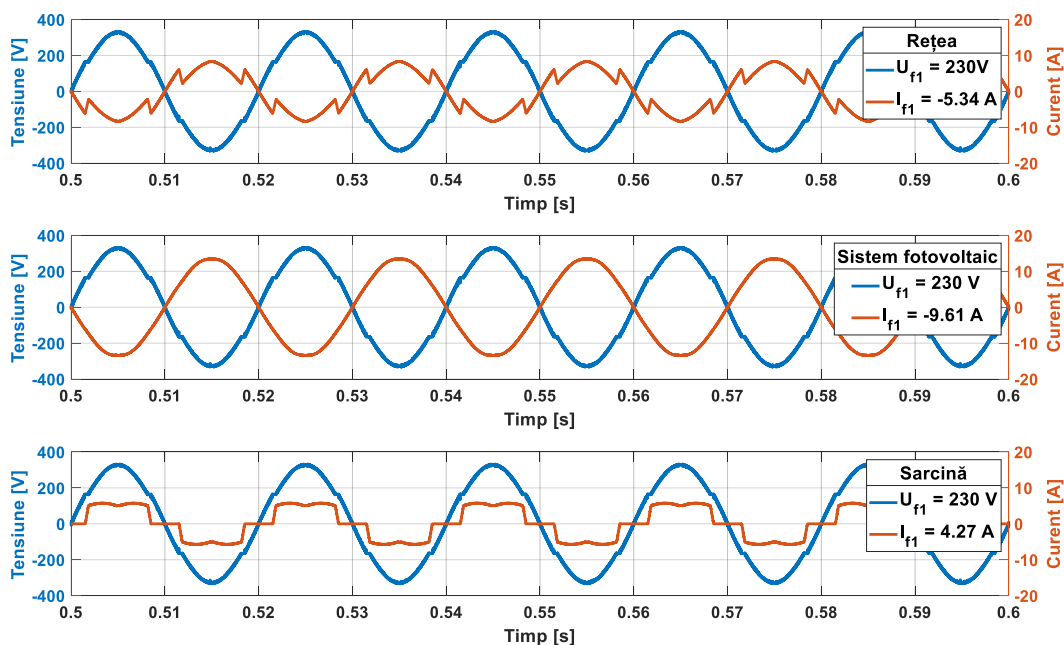


Figura 3.10. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiu 2

Rezultatele analizelor FFT ale tensiunii și curentului sunt prezentate în Figura 3.11. Curentul absorbit de sarcina neliniară, cu o distorsiune armonică totală de 28,23%, contribuie



la poluarea tensiunii din rețea, rezultând un THDu de 3,90%. De asemenea, aceasta influențează și asupra curentului injectat în rețea, care prezintă un THDi de 22,42%, precum și curentul injectat de sistemul fotovoltaic, cu un THDi de 1,14%. Comparativ cu rezultatele din *Figura 3.7*, se poate observa că sarcina neliniară poluează întreaga rețea.

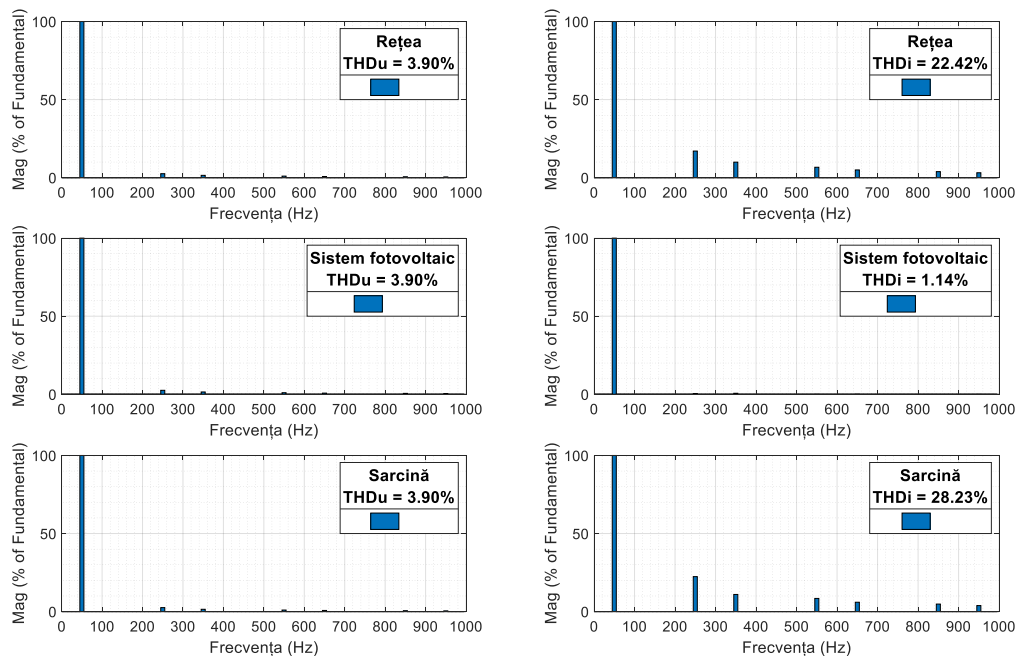


Figura 3.11. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiul 2

### 3.1.3 Simulări în condițiile unui deficit energetic

În cadrul celui de-al treilea studiu, sistemul fotovoltaic este conectat la o rețea electrică trifazată, generând o putere electrică inferioară cerințelor necesare pentru alimentarea sarcinii neliniare. Astfel, deficitul de putere este acoperit prin absorbția energiei electrice din rețea.

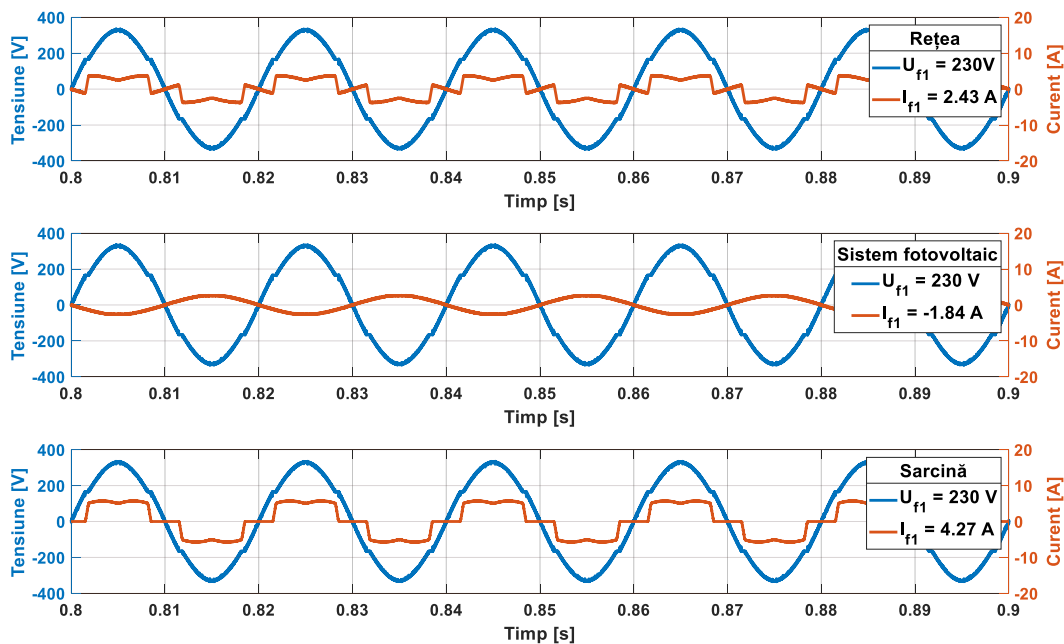
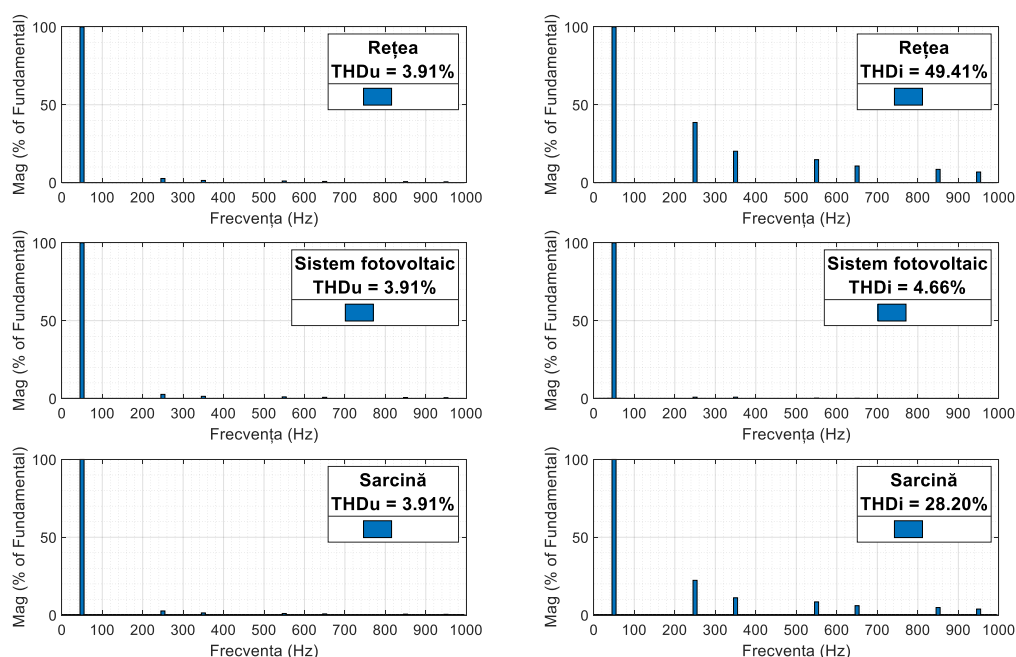


Figura 3.12. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiul 3

Formele de undă ale tensiunii de alimentare și ale curenților sunt prezentate în *Figura 3.12*. În acest studiu, sistemul fotovoltaic injectează în PCC un curent de 1,84 A, asigurând alimentarea parțială a sarcinii neliniare, care absoarbe un curent de 4,27 A. Deficitul de energie electrică este compensat de rețea, cu un curent absorbit de 2,43 A.

Rezultatele analizelor FFT ale tensiunii și curentului sunt prezentate în *Figura 3.13*. Curentul absorbit de sarcina neliniară, cu un THDi de 28,20%, contribuie la distorsiunea tensiunii din rețea, care prezintă un THDu de 3,91%. De asemenea, influențează curentul injectat de sistemul fotovoltaic, care are un THDi de 4,66%, și curentul absorbit din rețea, cu un THDi de 49,41%. Comparativ cu rezultatele din *Figura 3.7*, și în acest studiu se observă că sarcina neliniară poluează întreaga rețea.



*Figura 3.13. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiul 3*

### 3.1.4 Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică

În cadrul studiului patru, sistemul fotovoltaic este conectat la o rețea electrică trifazată. În absența intensității radiației solare, aceasta nu generează energie electrică, iar puterea necesară pentru alimentarea sarcinii neliniare este absorbită din rețea.

Formele de undă ale tensiunii de alimentare și ale curenților sunt prezentate în *Figura 3.14*. În condițiile acestui studiu, sistemul fotovoltaic nu produce energie electrică, iar curentul generat de acesta este zero. Drept urmare, întreg consumul sarcinii neliniare este preluat de rețeaua electrică. Sarcina neliniară absoarbe un curent de 4,30 A, ceea ce corespunde în totalitate cu curentul absorbit din rețea.

Rezultatele analizelor FFT ale tensiunii și curentului sunt prezentate în *Figura 3.15*. Curentul absorbit de sarcina neliniară, cu un THDi de 28,20%, contribuie la distorsiunea tensiunii din rețea, care are un THDu de 3,90%, și la distorsiunea curentului absorbit din rețea, cu un THDi de 27,43%. Comparativ cu rezultatele din *Figura 3.7*, se observă din nou că sarcina neliniară afectează negativ întreaga rețea.

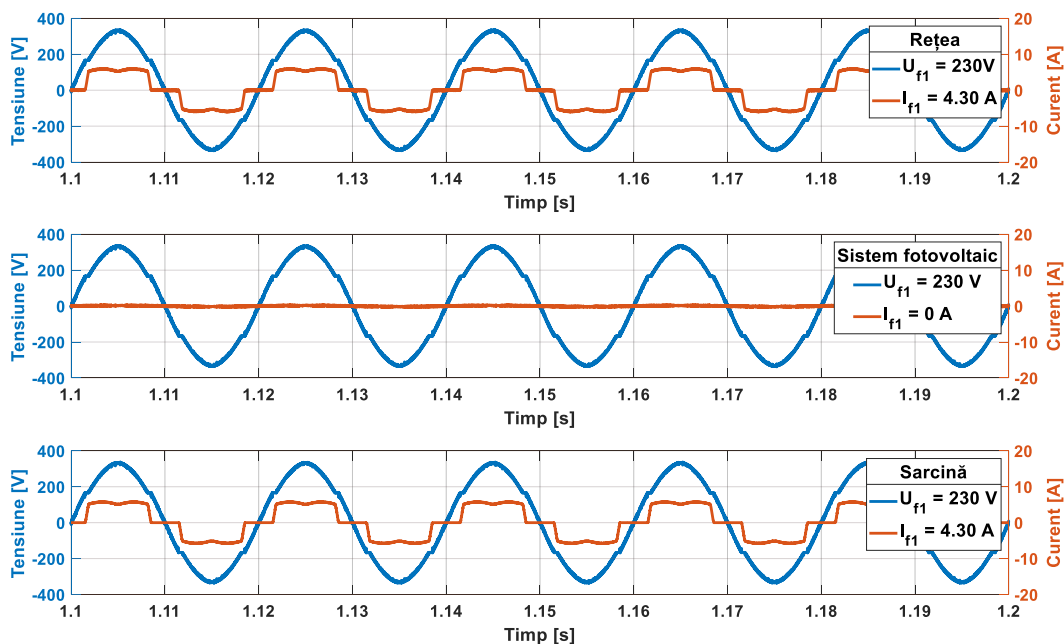


Figura 3.14. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiul 4

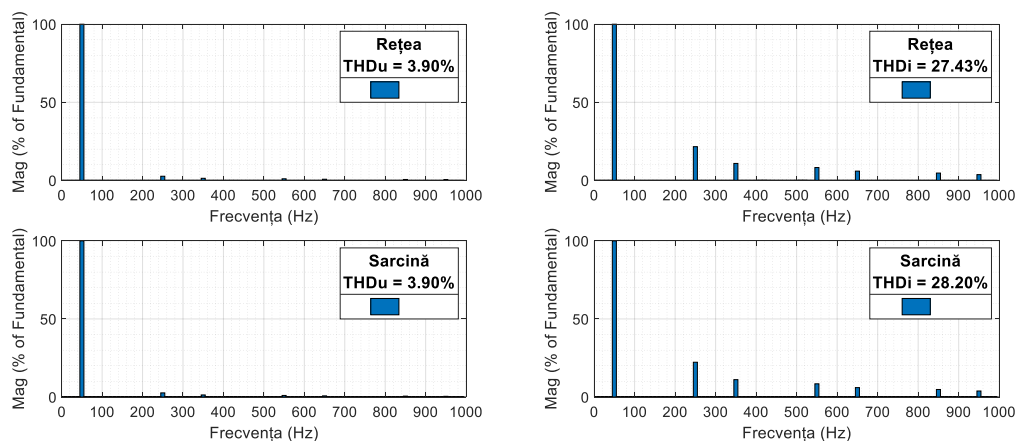


Figura 3.15. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului rețelei, sistemului fotovoltaic și sarcinii neliniare - studiul 4

### 3.1.5 Centralizarea rezultatelor

Analizând rezultatele obținute în cadrul acestui paragraf centralizate în graficele din Figura 3.16 și Figura 3.17, se poate afirma că integrarea sistemelor fotovoltaice în rețeaua electrică de joasă tensiune nu generează armonici dacă se folosește o metodă adecvată a comenzii inverterului. Cu toate acestea, situația se modifică semnificativ în prezența unei sarcini neliniare. Sarcinile neliniare generează distorsiuni armonice în rețea, afectând atât curentul, cât și tensiunea, ceea ce duce la o degradare a calității energiei electrice în rețea.

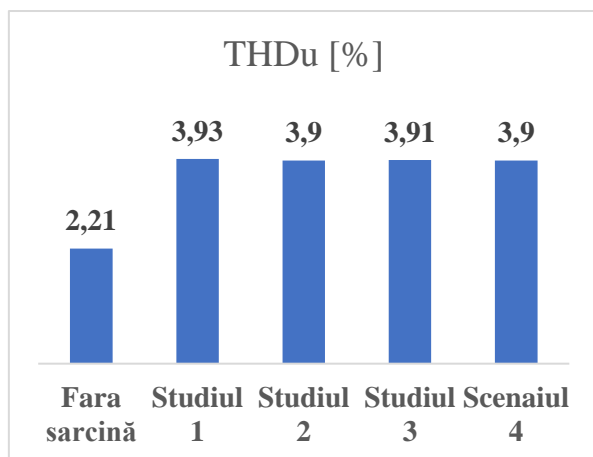


Figura 3.16. Analiza comparativă a nivelului armonic de tensiune

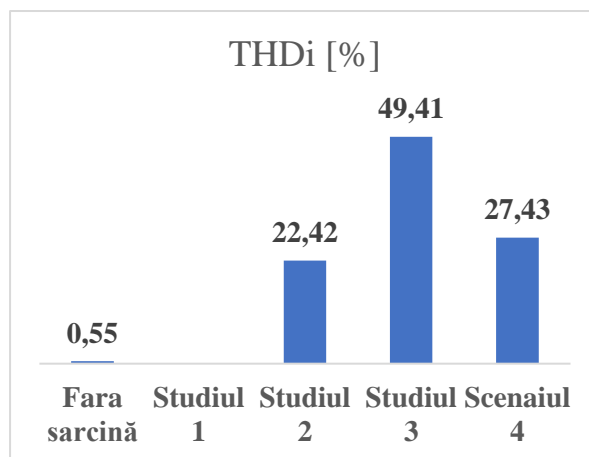


Figura 3.17. Analiza comparativă a nivelului armonic de curent

### 3.2 Alegerea metodei de comandă a Filtrului Activ de Putere

În urma analizelor comparative realizate în lucrarea [55], s-a ajuns la concluzia că metoda de comandă a Controlului Indirect este cea mai bună, având cele mai bune rezultate. Totodată, în lucrările [56] [57] Controlul Indirect demonstrează rezultate mai bune prin volumul de calcul și cu un numărul de dispozitive de măsură mai mic în comparație cu celelalte metode de comandă.

Din acest considerent s-a ales metoda de comandă Controlul Indirect a Filtrului Activ de Putere.

Strategia de comandă Controlul Indirect a fost propusă pentru prima dată în lucrarea [32]. Această metodă nu necesită cunoașterea spectrului curentului electric absorbit de sarcină.

Curentul electric absorbit de la sursă pe faza  $a$ :

$$i_{sa}(t) = i_{La}(t) + i_{fa}(t) \quad (3.3)$$

Curentul electric absorbit de sarcina neliniară pe faza  $a$ :

$$i_{La}(t) = i_{La}^1(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) \quad (3.4)$$

Unde:

$i_{La}^1(t)$  – este componenta activă a fundamentalei;

$\sum_k i_{Lak}(t)$  – este suma armonicilor superioare;

$i_{Laq}(t)$  – este componenta reactivă a fundamentalei.

Curentul electric prin filtru este:

$$i_{fa}(t) = i_{fa}^1(t) + \tilde{i}_{fa}(t) \quad (3.5)$$

Unde:

$i_{fa}^1(t)$  – are aceeași semnificație ca și  $i_{La}^1(t)$ ;

$\tilde{i}_{fa}(t)$  – reprezintă componenta armonică a curentului electric de filtru.

Curentul electric de la rețea trebuie să fie în fază cu tensiunea și aibă o undă sinusoidală. Componenta pe care o compensează de filtrul activ este:

$$\tilde{i}_{fa}(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) = \tilde{i}(t) \quad (3.6)$$

Din (3.3) ... (3.6) rezultă:

$$i_{sa} = i_{La}^1 + i_{fa}^1 + \tilde{i} \quad (3.7)$$

Pentru regulatorul de curent al fazei  $a$  se generează semnalul:

$$i_a^*(t) = \varepsilon_{DC} \frac{V_a}{\sqrt{2}V} = \varepsilon_{DC} \sin \omega t \quad (3.8)$$

Unde:

$V$  este valoarea efectivă a tensiunii de fază a alimentării;

$\varepsilon_{DC}$  este ieșirea regulatorului tensiunii de pe condensator.

Impunerea de mai sus se compară cu valoarea măsurată a curentului electric absorbit de la rețea  $i_{sa}$ , rezultând pentru comanda filtrului pe faza  $a$ :

$$u_{ca}^* = k(i_a^* - i_{sa}) = k(i_a^* - \tilde{i} - i_{La}^1 - i_{fa}^1) \quad (3.9)$$

Unde:  $k$  amplificarea regulatorului.

Componentele sinusoidale ale filtrului și sarcinii regulatorul fiind liniar, se regăsesc în impunerea sinusoidală pentru regulatorul:

$$i_a^* = i_{La}^1 + i_{fa}^1 \quad (3.10)$$

Cu această remarcă rezultă impunerea pentru faza „a” a filtrului activ sub forma:

$$u_{ca}^* = -k\tilde{i} = -k \left( \tilde{i}_{fa}(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) \right) \quad (3.11)$$

adică proporțională cu componenta poluantă. În regim staționar regulatorul, dacă este corect proiectat, anulează eroare staționară la intrare:

$$\tilde{i}_{fa}(t) = - \left( \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) \right) \quad (3.12)$$

filtrul va genera însuși componenta poluantă necesară sarcinii neliniare.

Impunerea  $\varepsilon_{DC}$  de la regulatorul  $RV_{DC}$  pentru încărcarea condensatorului „C” este transformată în referință pentru curent astfel:

$$\begin{cases} i_a^* = \varepsilon_{DC} \sin \omega t \\ i_b^* = \varepsilon_{DC} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_c^* = \varepsilon_{DC} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (3.13)$$

Schema de comandă este prezentată în *Figura 3.18*.

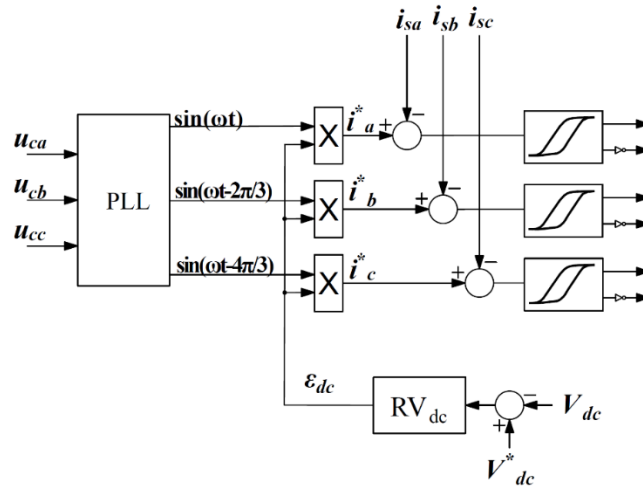


Figura 3.18. Strategia de comandă a Controlului Indirect

### 3.3 Simularea sistemului propus în mediul de programare Matlab/Simulink

Integrarea energiei regenerabile în rețeaua electrică, având în vedere îmbunătățirea calității energiei electrice, se poate realiza prin utilizarea filtrelor active de putere. Conectarea panourilor fotovoltaice se realizează pe partea de curent continuu a Filtrului Activ de Putere. Acest sistem facilitează extragerea puterilor maxime de la panourile fotovoltaice, reducerea nivelului distorsiunilor armonice din rețea și compensarea puterii reactive. [49] [50]

În Figura 3.19 este prezentată schema multifilară a Sistemului Integrat conectat în punctul de cuplare comun, într-o rețea electrică trifazată și sarcina neliniară.

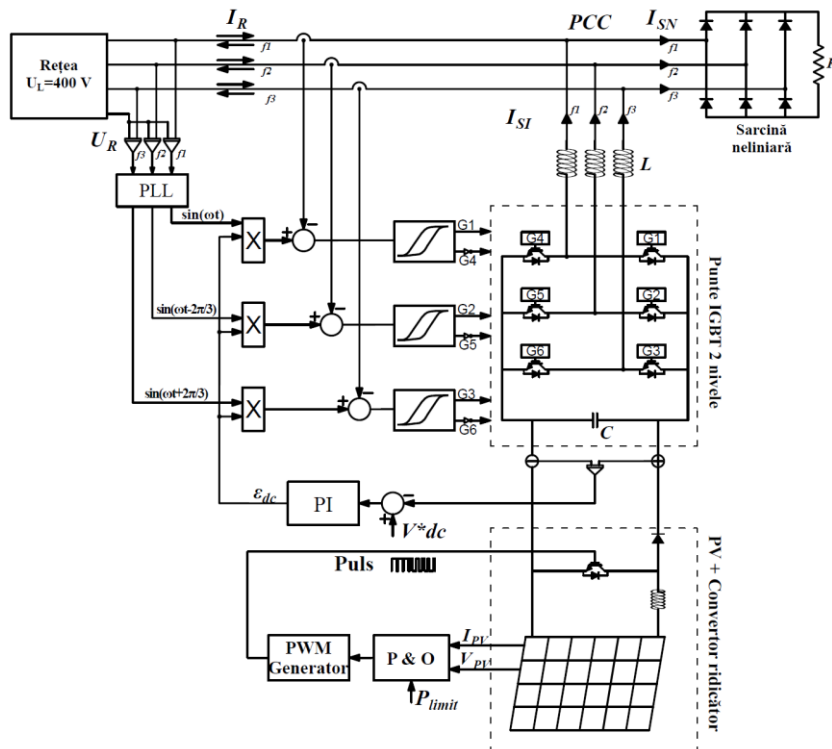


Figura 3.19. Schema multifilară a Sistemului Integrat conectat la rețea

Pentru comanda Filtrului Activ de Putere s-a utilizat metoda Controlul Indirect, detaliată anterior. Figura 3.20 prezintă modelarea Controlului Indirect realizată în Matlab/Simulink.

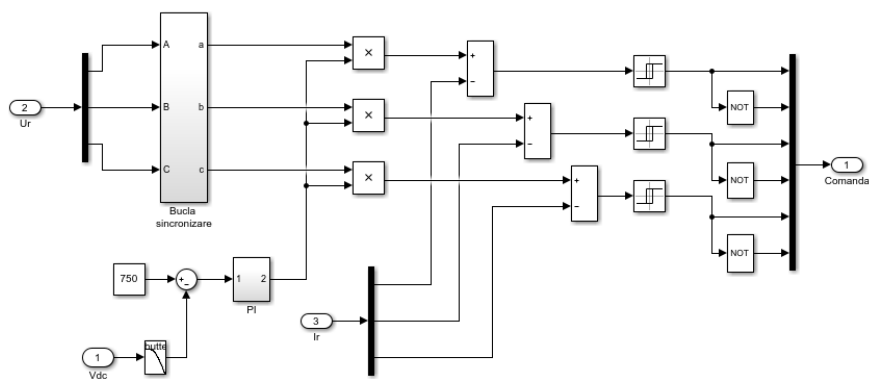


Figura 3.20. Schema Matlab/Simulink a Controlului Indirect

În cadrul acestor simulări, au fost aplicate aceleași studii distincte prezentate anterior.

### 3.3.1 Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat

În cadrul acestui studiu, panourile fotovoltaice sunt conectate la rețeaua electrică trifazată prin intermediul unui Filtru Activ de Putere. Controlul convertorului ridicător de tensiune permite reglarea puterii generate de panourile fotovoltaice în funcție de cerințele de consum ale sarcinii neliniare. Astfel, prin adaptarea producției de energie electrică la necesarul consumului local, se previne apariția supratensiunilor, asigurând o funcționare optimă a sistemului.

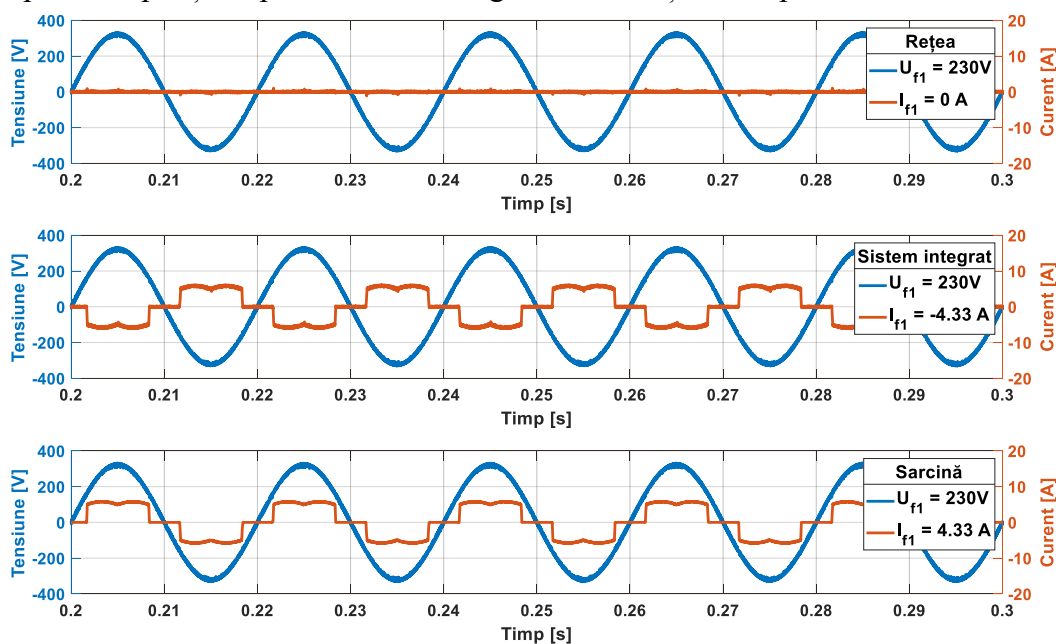
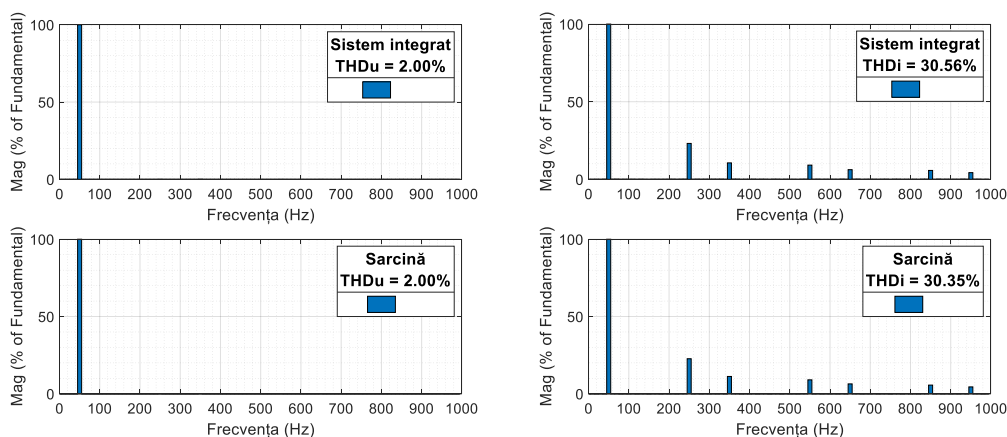


Figura 3.21. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 1

Formele de undă ale tensiunii de alimentare din PCC, precum și al curentului din rețea, al Sistemului Integrat și al sarcinii neliniare, sunt prezentate în Figura 3.21. Se observă că Sistemul Integrat injectează în PCC un curent de 4,33 A, cu o formă distorsionată, care este în opoziție de fază cu armonicile generate de sarcina neliniară. Acest proces permite atenuarea armonicilor de curent din rețea și asigură alimentarea completă a sarcinii neliniare, care absoarbe un curent de 4,33 A. Astfel, consumul energetic din rețea este eliminat, contribuind la reducerea problemelor de supratensiune în rețea.

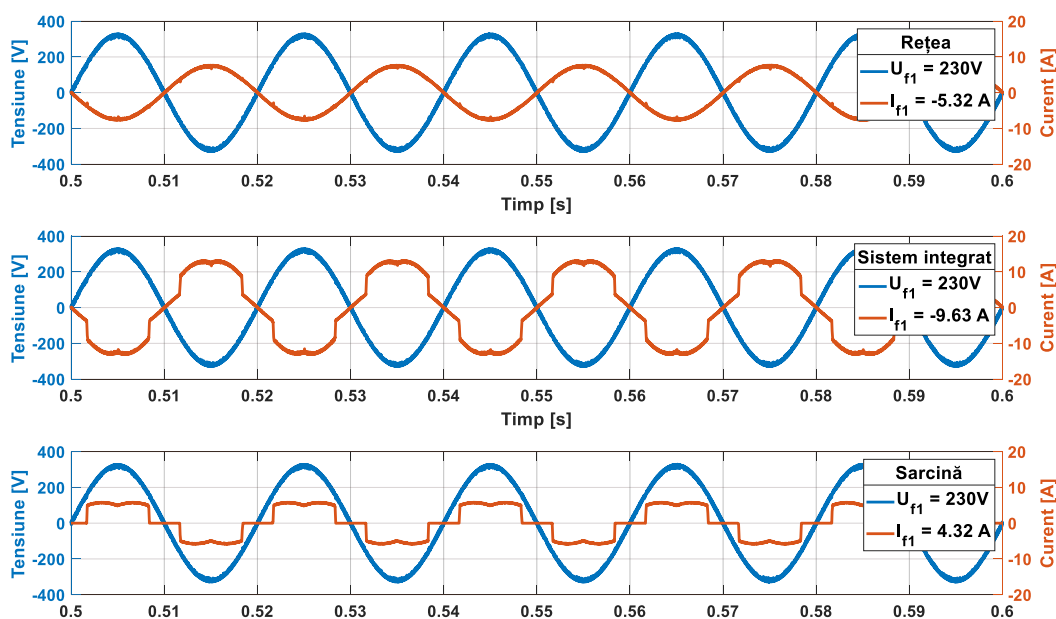
În acest context, *Figura 3.22* prezintă curentul injectat de Sistemul Integrat, cu un THDi de 30,56%, ce contribuie la reducerea distorsiunii armonice de tensiune la 2,00 %, în comparație cu sistemul fotovoltaic, care în aceleași condiții prezintă un THDu de 3,93% (*Figura 3.9*).



*Figura 3.22. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 1*

### 3.3.2 Simulări în condițiile unui surplus energetic

În acest studiu, Sistemul Integrat este conectat la rețeaua electrică trifazată, generând o putere electrică care depășește necesarul pentru alimentarea sarcinilor neliniare, surplusul de energie electrice fiind astfel injectat în rețea.



*Figura 3.23. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 2*

Formele de undă ale tensiunii de alimentare din PCC și al curentului rețelei, Sistemului Integrat și sarcinii neliniare sunt prezentate în *Figura 3.23*. Se observă injectarea în PCC a unui curent cu o valoare de 9,63 A de la Sistemul Integrat, cu o formă distorsionată și în opoziție cu armonicile generate de sarcina neliniară. Acest proces permite atenuarea armonicilor de curent din rețea și asigură alimentarea sarcinii neliniare ( $I = 4,32 A$ ) de către Sistemul Integrat, în timp



ce surplusul de energie electrică este injectat în rețea, curentul având o formă sinusoidală și o valoare de 5,32 A.

Rezultatele analizelor FFT ale formelor de undă ale tensiunii și curentului sunt prezentate în *Figura 3.24*. Comparativ cu rezultatele obținute utilizând un sistem fotovoltaic (*Figura 3.11*), se observă o îmbunătățire semnificativă, cu o distorsiune armonică totală a curentului injectat în rețea de 2,52% și o distorsiune armonică totală a tensiunii de 1,99%.

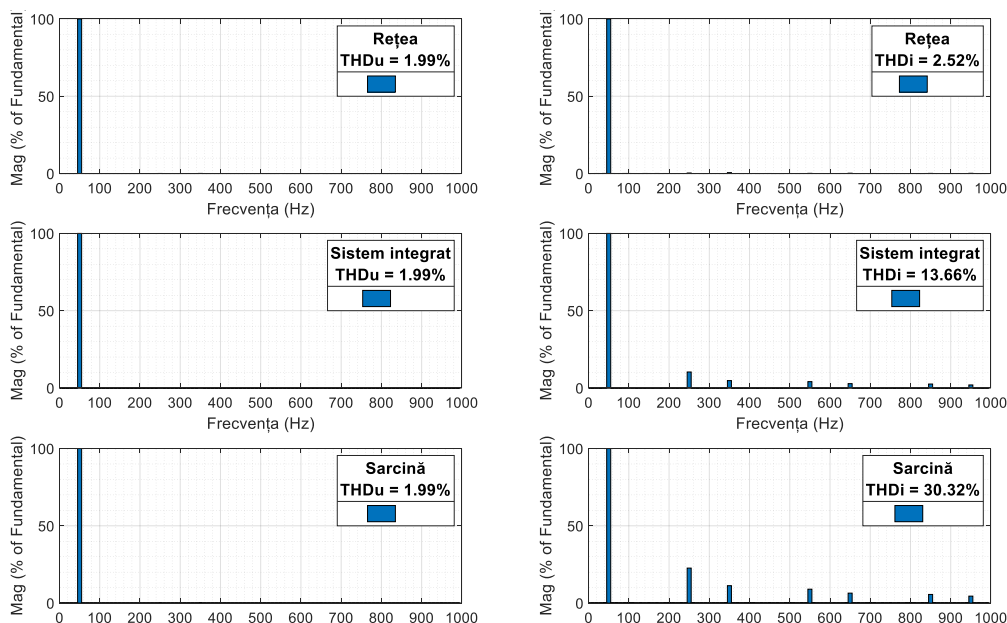


Figura 3.24. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 2

### 3.3.3 Simulări în condițiile unui deficit energetic

În cadrul celui de-al treilea studiu, sistemul integrat este conectat la rețeaua electrică, generând astfel o putere electrică inferioară necesarului pentru alimentarea sarcinii neliniare. Astfel, deficitul de putere este compensat prin absorbția energiei electrice din rețea.

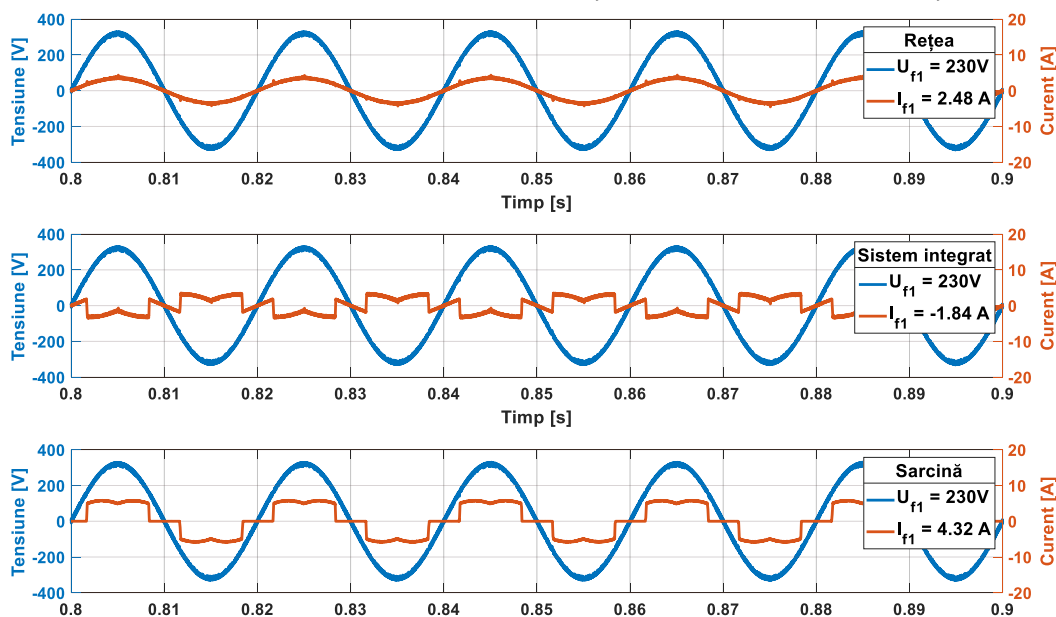
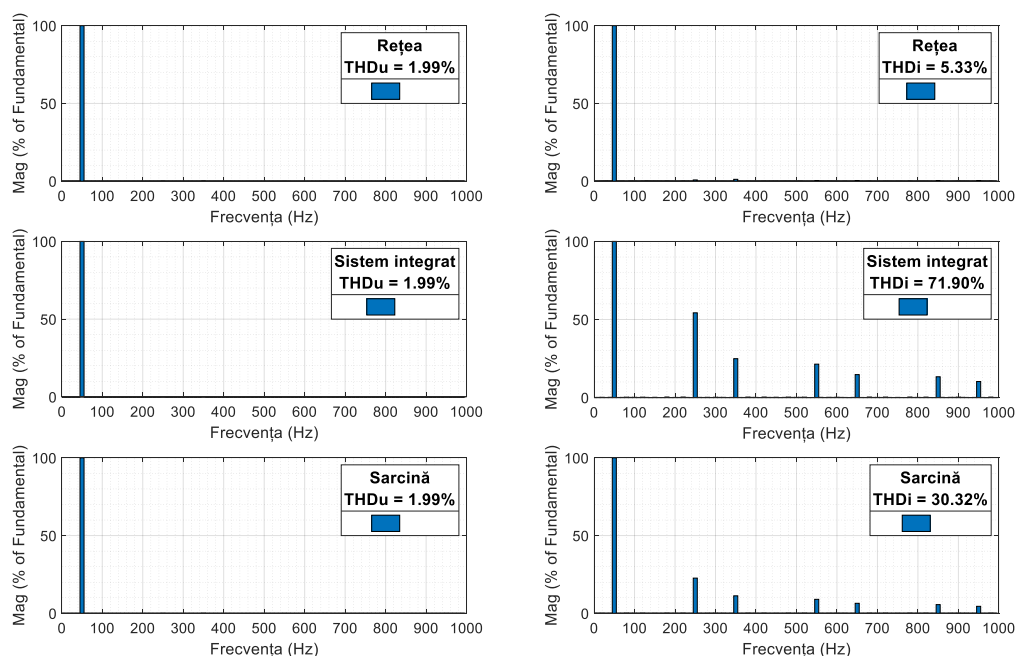


Figura 3.25. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 3

Formele de undă ale tensiunii de alimentare și al curentului din rețea, Sistemului Integrat și al sarcinii neliniare, sunt prezentate în *Figura 3.25*. Se observă injectarea în PCC a unui curent cu o valoare de 1,84 A, provenit de la Sistemul Integrat, care prezintă o formă distorsionată și este în opoziție cu armonicile generate de sarcina neliniară. Această injecție permite atenuarea armonicilor de curent din rețea și asigură alimentarea parțială a sarcinii neliniare, având un curent absorbit de 4,32 A. În același timp, deficitul energetic este compensat din rețea, curentul absorbit având o valoare efectivă de 2,48 A.

Rezultatele analizelor FFT ale tensiunii și curentului sunt prezentate în *Figura 3.26*. Se remarcă o reducere semnificativă a distorsiunii armonice totale a curentului absorbit din rețea, care scade de la 49,41% în condițiile utilizării sistemului fotovoltaic (*Figura 3.13*), la 5,33% în condițiile utilizării Sistemului Integrat. Această reducere determină, de asemenea, o scădere a distorsiunii armonice totale a tensiunii, de la 3,91% (*Figura 3.13*) la 1,99%.



*Figura 3.26. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 3*

### 3.3.4 Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică

În cadrul studiului patru, Sistemul Integrat este conectat la o rețea electrică trifazată și, în absența radiației solare, acesta nu produce energie electrică. În aceste condiții, puterea necesară pentru alimentarea sarcinii neliniare este preluată din rețea, iar Sistemul Integrat funcționează ca un Filtru Activ de Putere paralel.

Formele de undă ale tensiunii de alimentare și al curentului din rețea, Sistemului Integrat și sarcinii neliniare, sunt prezentate în *Figura 3.27*. Deoarece panourile fotovoltaice nu produc energie electrică, Sistemul Integrat este alimentat din rețea. În aceste condiții, se observă un curent distorsionat absorbit de Sistemul Integrat, de 0,12 A, care, însumat cu curentul absorbit de sarcina neliniară de 4,34 A, rezultă într-un curent sinusoidal absorbit din rețea, cu o valoare de 4,46 A.

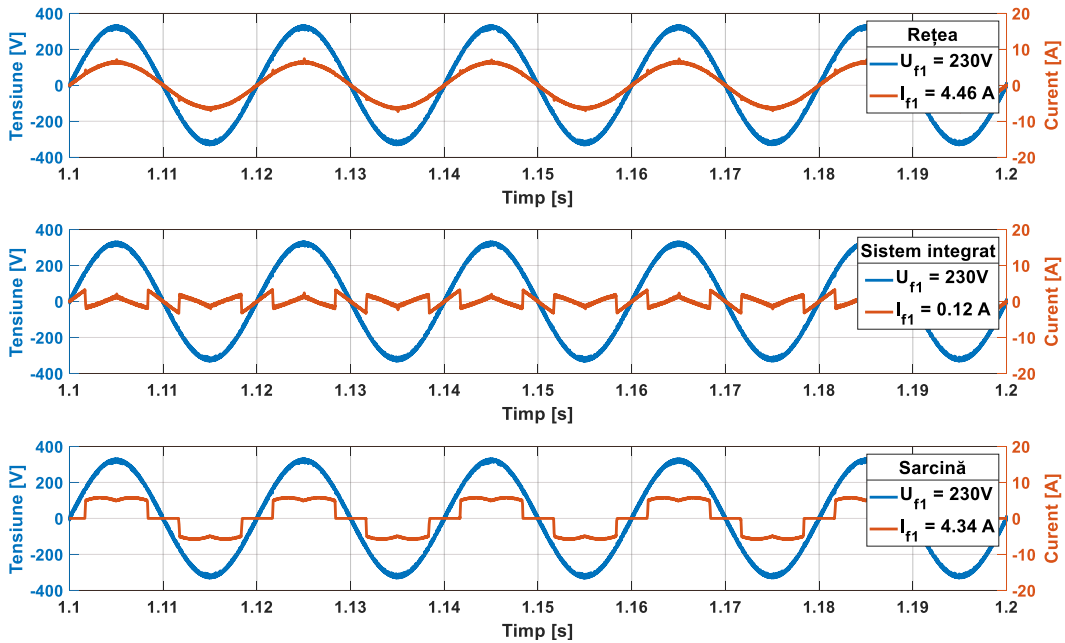


Figura 3.27. Formele de undă a tensiunii și curentului rețelei, Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 4

Rezultatele analizelor FFT ale tensiunii și curentului sunt prezentate în Figura 3.28. Se observă o reducere semnificativă a distorsiunii armonice totale a curentului absorbit din rețea, care scade de la 27,43% în condițiile utilizării sistemului fotovoltaic (Figura 3.15) la 2,99% în condițiile utilizării Sistemului Integrat. Această reducere conduce, de asemenea, la o scădere a distorsiunii armonice totale a tensiunii, de la 3,90% (Figura 3.15) la 1,98%.

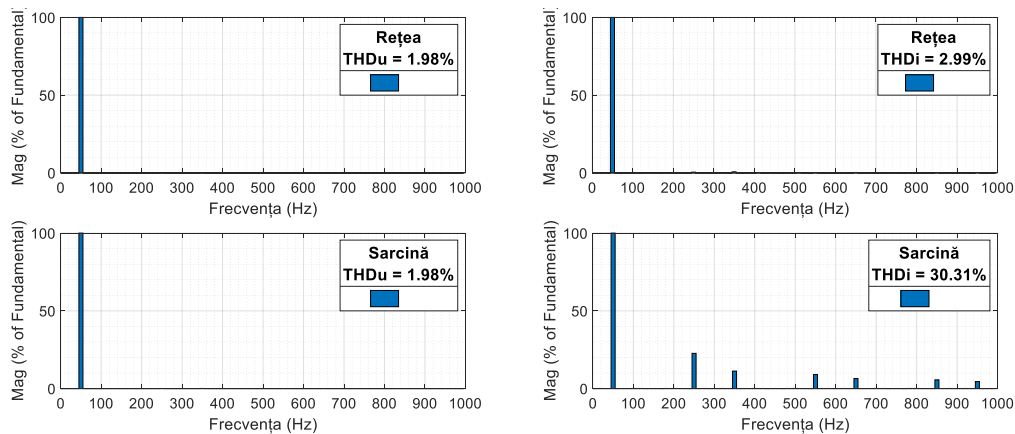


Figura 3.28. Distorsiunea armonică totală a tensiunii și curentului Sistemului Integrat și sarcinii neliniare - studiul 4

### 3.3.5 Centralizarea rezultatelor

În acest paragraf s-a demonstrat, prin simulări, injectarea energiei electrice produse de panourile fotovoltaice în rețea, utilizând un Filtru Activ de Putere paralel. Această tehnologie joacă un rol esențial în atenuarea armonicilor și a creșterii calității energiei electrice.

Dezvoltarea acestui Sistem Integrat, care combină panourile fotovoltaice cu un Filtru Activ de Putere paralel, a adus un efect semnificativ în ceea ce privește stabilitatea și calitatea energiei electrice injectate în rețea. Analizând rezultatele din graficele prezentate în Figura 3.29 și

Figura 3.30, se observă o reducere considerabilă a distorsiunii armonice totale a curentului și tensiunii, comparativ cu utilizarea unui sistem fotovoltaic.

Simulările efectuate în cadrul celor patru studii au demonstrat că Sistemul Integrat este superior din punct de vedere al performanței comparativ cu sistemul fotovoltaic.

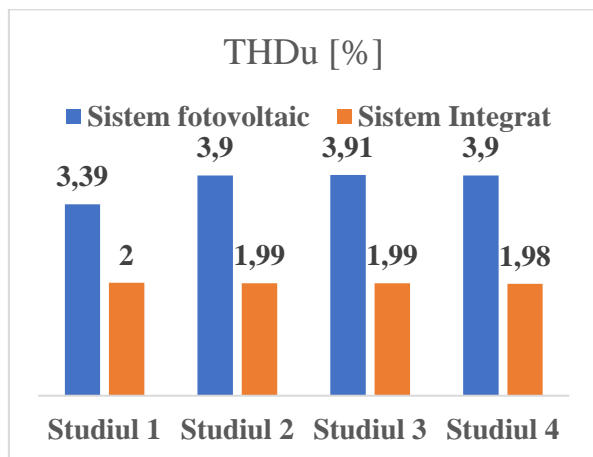


Figura 3.29. Analiza comparativă a nivelului armonic de tensiune

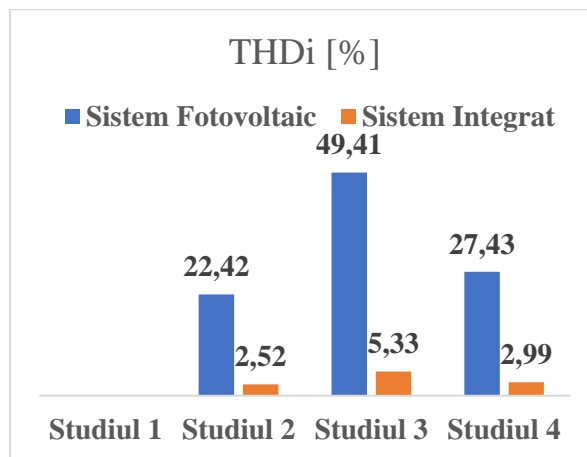


Figura 3.30. Analiza comparativă a nivelului armonic de curent

### 3.4 Concluzii

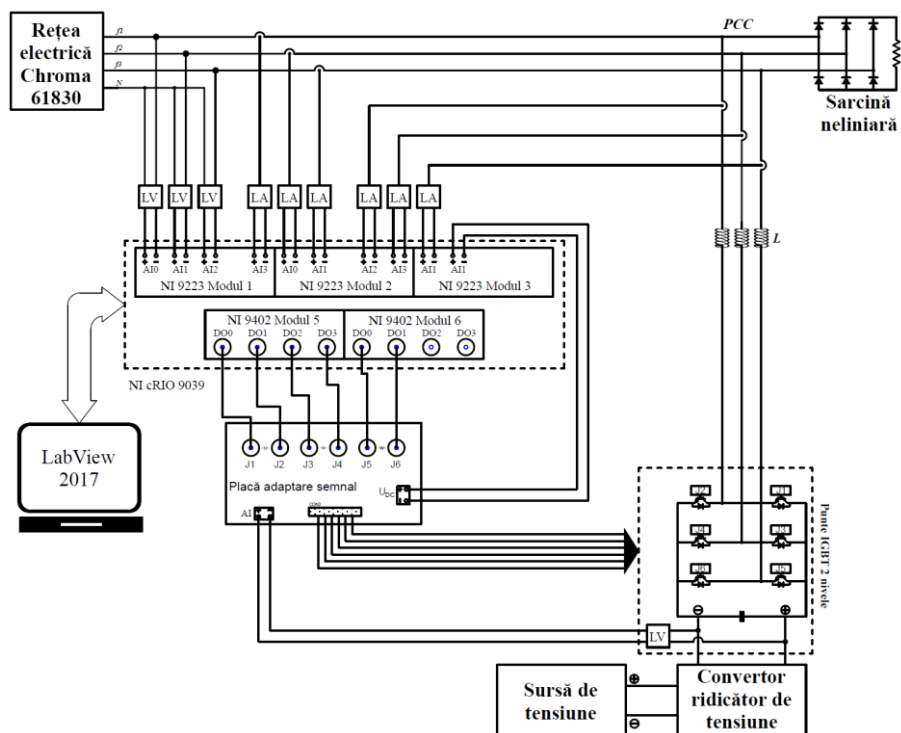
În urma lucrărilor științifice publicate, care certifică alegerea strategiile de comandă utilizate pentru controlul Filtrului Activ de Putere și al convertorului ridicător de tensiune, necesar pentru extragerea energiei maxime din panourile fotovoltaice, au fost realizate multiple simulări. Aceste simulări au evidențiat problemele din rețeaua electrică atunci când sistemele fotovoltaice sunt conectate la rețea simultan cu o sarcină neliniară. În acest context, s-a propus simularea unui Sistem Integrat capabil să abordeze aceste probleme.

Rezultatele obținute, prezentate în Figura 3.29 și Figura 3.30, confirmă buna funcționare a Sistemului Integrat, care poate injecta energie electrică produsă de panourile fotovoltaice în rețea, îmbunătățind în același timp calitatea energiei electrice. De asemenea, utilizarea algoritmului MPPT P&O modificat previne supratensiunile rețelei, limitând producția de energie la nivelul consumului local.

## CAPITOLUL 4. VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A FUNCȚIONALITĂȚII ȘI STABILITĂȚII SISTEMULUI INTEGRAT PROPUS

### 4.1 Sistem integrat

Schema electrică a Sistemului Integrat realizat în laborator Elanv b, este prezentată în *Figura 4.1*. Realizarea propriu-zisă a Filtrului Activ de Putere a fost posibilă cu ajutorul finanțării oferite prin proiectul de cercetare „CRESC-INTEL”, la care autorul prezentei teze de doctorat a făcut parte din echipă.



*Figura 4.1. Schema electrică a Sistemului Integrat realizat în laborator*

O imagine de ansamblu a standului experimental este prezentată în *Figura 4.2*. Echipamentele utilizate sunt numerotate în *Figura 4.2*, conform următoarei descrieri:

1. Rețea electrică trifazată - Chroma 61830;
2. Invertor trifazat cu tranzistoare IGBT;
3. Bobină de conectare;
4. Punct comun de cuplare (PCC) și interfața de măsură;
5. Interfața de achiziție date, comandă și control;
6. Placă de adaptare;
7. Calculator – LabView 2017;
8. Sursă de tensiune c.c. ;
9. Sistem de interconectare (convertor ridicător);
10. Analizor de calitatea energiei electrice - Fluke 437-II;
11. Sistem achiziție date - DeweSoft Siriusi-HS;
12. Sarcină neliniară.

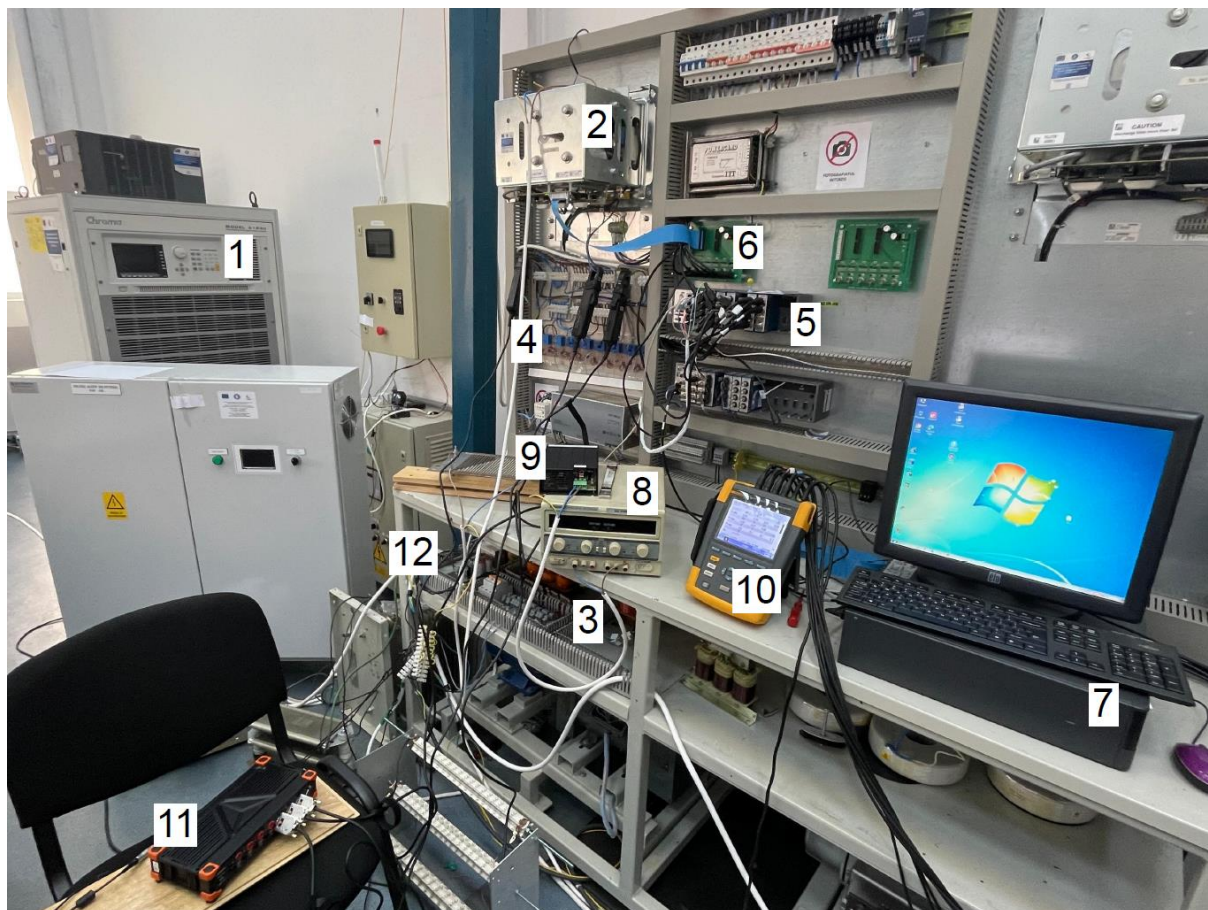


Figura 4.2. Standul experimental

Principalele caracteristici tehnice care au fost utilizate în realizarea Sistemului Integrat sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Date tehnice Sistem Integrat

Denumire	Valoare	Unitate de măsură
Tensiunea de fază a rețelei	15	Vc.a.
Sarcina neliniară/ Redresor necomandat	17	$\Omega$
Inductivitate	1,92	mH
Capacitate	1555	$\mu\text{F}$
Tensiune condensator	60	Vc.c.
Frecvență de comutație	25	kHz
Tensiune ieșire sursă tensiune	51	Vc.c.
Tensiune ieșire convertor ridicător	65	Vc.c.
Număr nivel inverter		2
Banda de histerezis		0,2
Regulator PI	Kp	0,4
	Ki	0,0001

## 4.2 Sistemul de interconectare a panourilor fotovoltaice la Filtru Activ de Putere

Sistemul de interconectare (convertor ridicător de tensiune), ilustrat în *Figura 4.3*, are rolul de a converti tensiunea continuă de intrare într-o tensiune continuă de ieșire, la un nivel superior.

Acest sistem de interconectare a fost conceput de autorul tezei și realizată practic de o firmă contractată pentru a îndeplini cerințele de conectare a sursei de tensiune cu Filtrul Activ de Putere. Sistemul Integrat realizează o separare galvanică, asigurând astfel protecția componentelor sensibile, precum invertorul Filtrului Activ de Putere.



*Figura 4.3. Sistem de interconectare*

## 4.3 Comanda sistemului

Pentru buna funcționare a Filtrului Activ de Putere, este necesară monitorizarea continuă a tensiunii și curentului, esențiale pentru calculul referinței curentului de compensare.

Pentru controlul Filtrului Activ de Putere a fost utilizat modulul de bază cRIO 9039, împreună cu modulele de achiziție NI 9223 și de generare a semnalelor de comandă NI 9402, produse de National Instruments care construiesc interfața de achiziție date, comandă și control.

Pentru implementarea algoritmului de comandă a fost utilizat pachetul software LabVIEW 2017.

Implementarea algoritmului de comandă poate fi divizată în patru etape:

- 1) **Achiziția datelor** (*Figura 4.4*) – Acest proces constă în achiziția semnalelor de tensiune și curent necesare pentru calculul referinței Filtrului Activ de Putere, preluate de la traductoare. Achiziția se realizează cu ajutorul modulului NI 9223.
- 2) **Extragerea semnalelor de referință** (*Figura 4.5*) – după achiziția semnalelor de tensiune, se pot calcula semnalele de referință.

- 3) **Regulatorul PI** (Figura 4.6) - regulatorul PI are rolul de a menține tensiunea pe condensator la valoarea impusă, asigurând astfel stocarea energiei necesare funcționării Filtrului Activ.
- 4) **Implementarea comenzii și generarea semnalelor de comandă** (Figura 4.7) – constă în prelucrarea tuturor datelor pentru obținerea semnalelor de referință ale curentului de compensare.

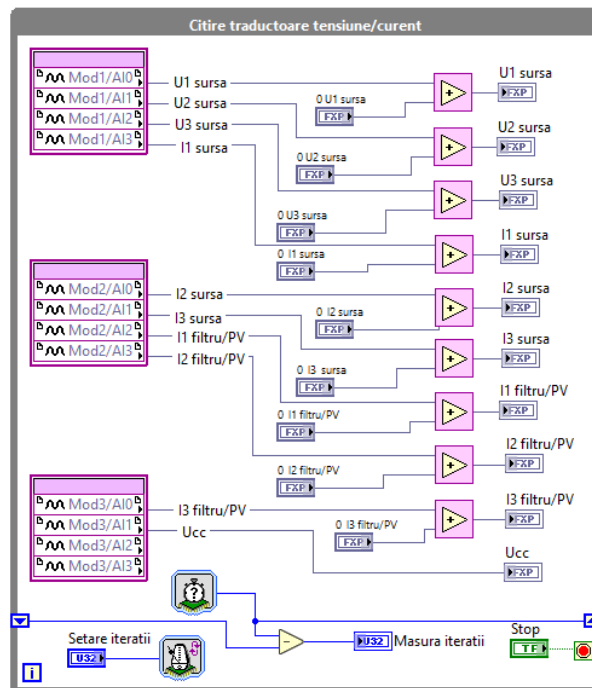


Figura 4.4 Achiziția datelor de intrare

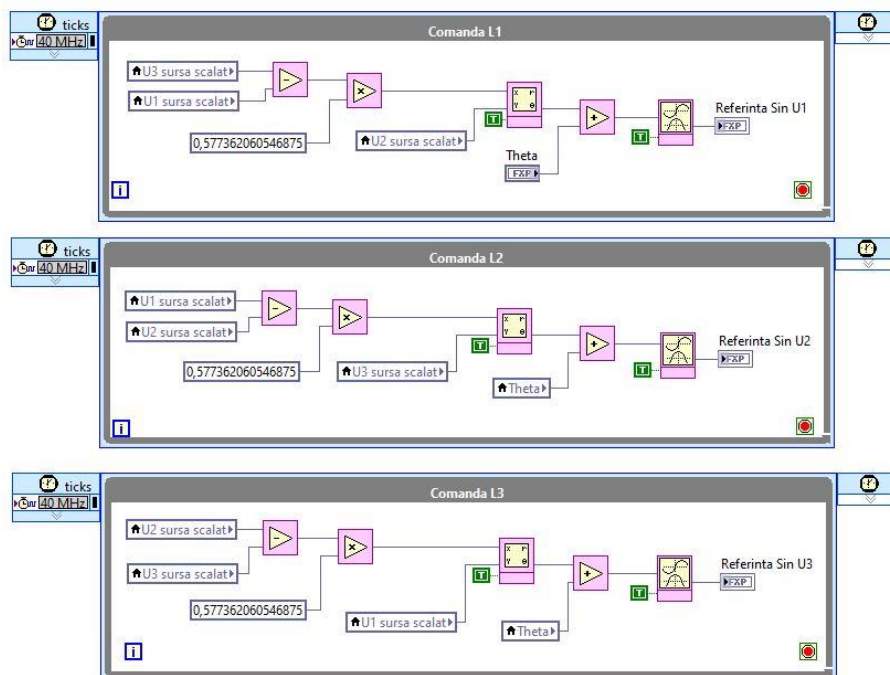


Figura 4.5. Calcul semnal referință



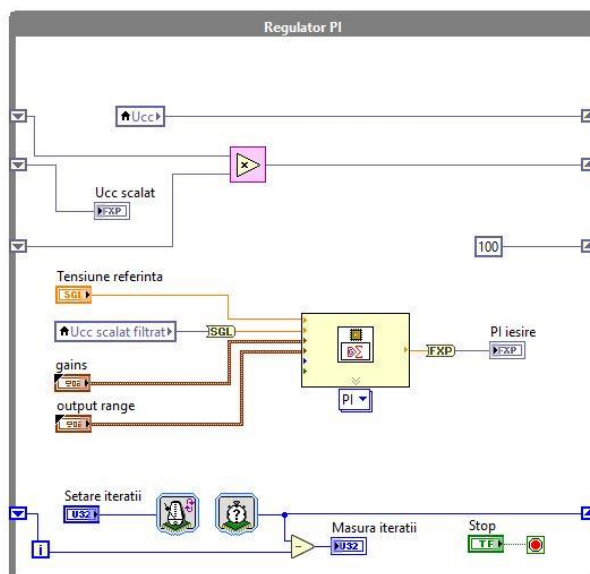


Figura 4.6. Regulatorul PI

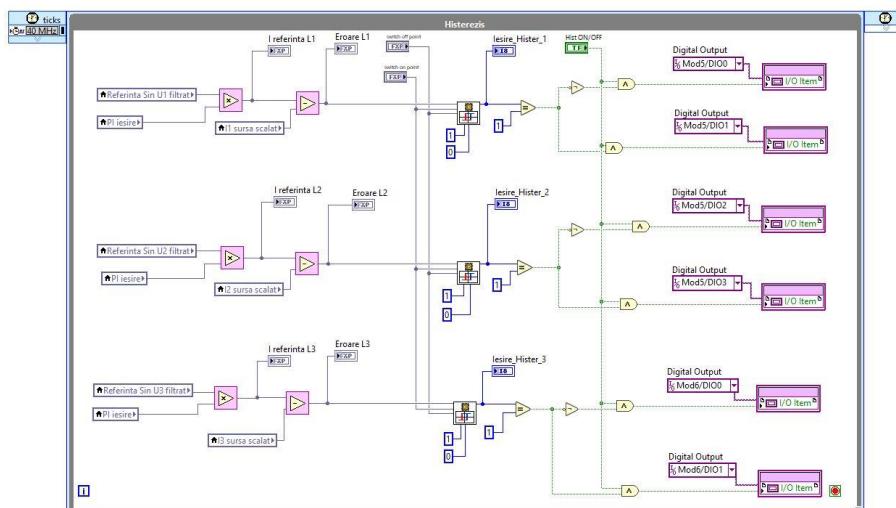


Figura 4.7. Implementarea Controlului Indirect

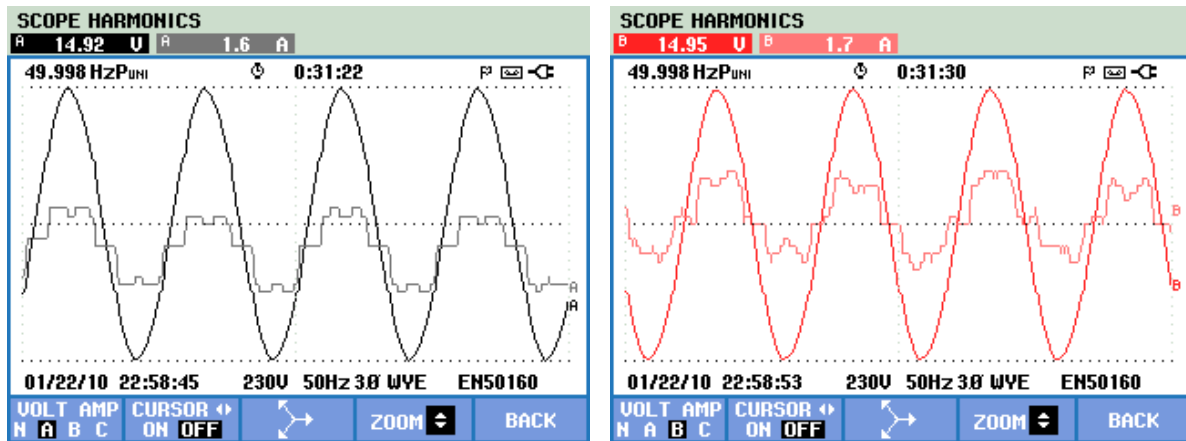
Parametrii utilizați pentru comanda Controlul Indirect:

- Setpoint – valoarea impusă pentru tensiunea condensatorului = 60 V;
- $K_p$  – coeficientul proporțional al regulatorului PI = 4;
- $K_i$  – coeficientul integral al regulatorului PI = 0,0001;
- Output range – Limita superioară/inferioară a comenzii regulatorului PI = 8, -8;
- Theta – Defazajul dintre tensiunea și curentul electric impus = 0,5;
- Switch on point – Limita superioară a benzii de histerezis = 0,1;
- Switch off point – Limita inferioară a benzii de histerezis = -0,1;
- Output when on – Valoarea de ieșire a regulatorului cu histerezis când este pornit = 1;
- Output when on – Valoarea de ieșire a regulatorului cu histerezis când este oprit = 0;

#### 4.4 Rezultate experimentale

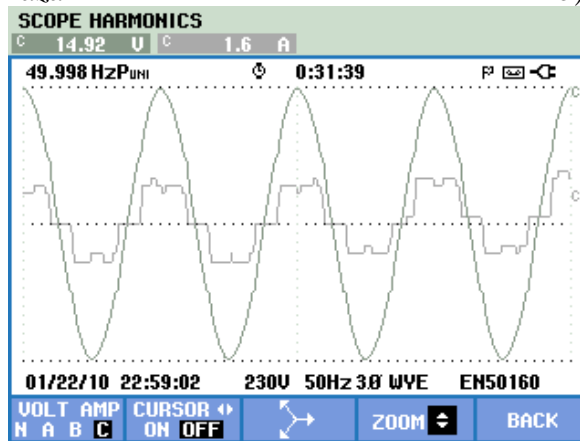
Pentru a stabili un punct de referință clar, a fost alimentată de la rețeaua electrică trifazată o sarcină neliniară formată dintr-o punte redresoare trifazată care alimentează o rezistență.

În Figura 4.8 sunt prezentate formele de undă ale tensiunii de alimentare și ale curentului absorbit de sarcina neliniară.



a) Faza 1

b) Faza 2



c) Faza 3

Figura 4.8. Formele de undă ale tensiunii rețelei și curentului absorbit de sarcina neliniară

Valoarea distorsiunii armonice totale a tensiunii este prezentată în Figura 4.9, indicând o distorsiune a tensiunii de 2,7%. În Figura 4.10 este prezentată distorsiunea armonică totală a curentului, cu un nivel de poluare a curentului de 28,5%.

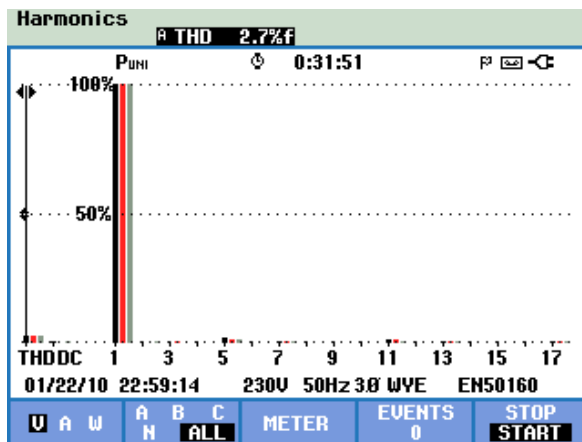


Figura 4.9. Distorsiunea armonică totală a tensiunii pentru sarcina neliniară

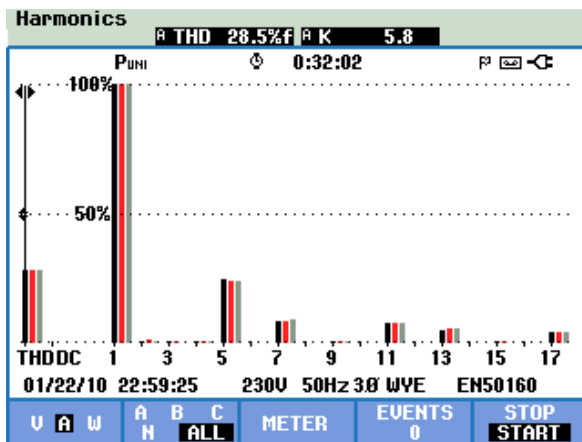
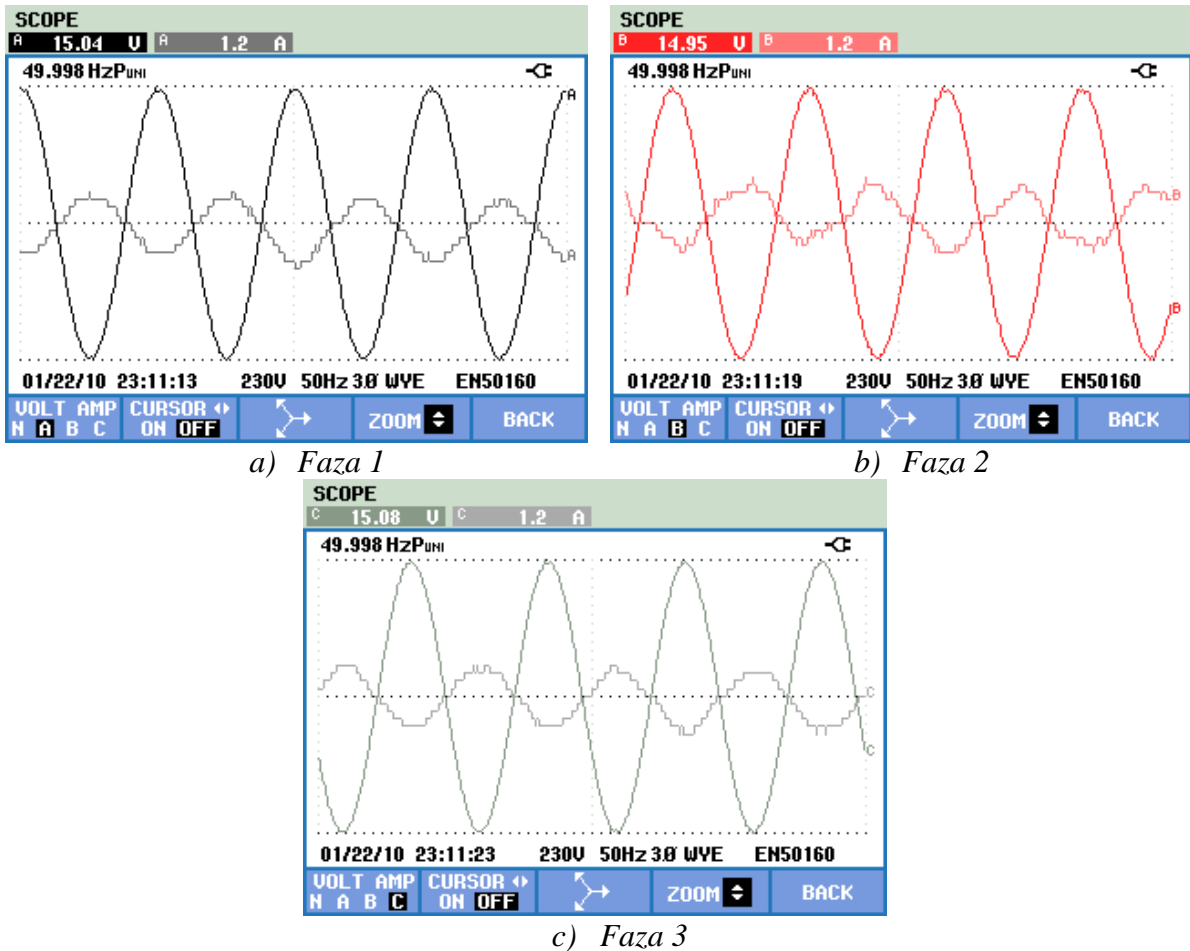


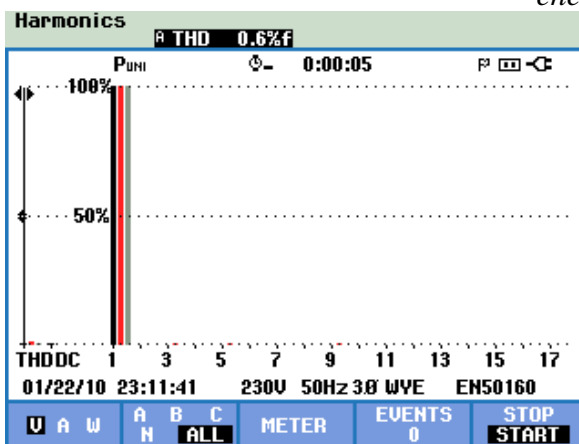
Figura 4.10. Distorsiunea armonică totală a curentului pentru sarcina neliniară

#### 4.4.1 Rezultate experimentale în condițiile unui surplus energetic

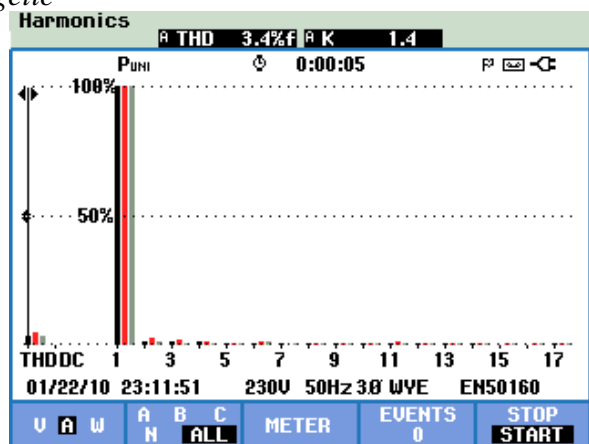
În acest studiu, Sistemul Integrat este conectat la rețeaua electrică trifazată și generează o putere electrică ce depășește cerințele pentru alimentarea sarcinii neliniare. Surplusul de energie este injectat în rețea. *Figura 4.11* prezintă formele de undă ale tensiunii și curentului din rețea în condițiile injectării surplusului de energie electrică în rețea.



*Figura 4.11. Formele de undă ale tensiunii și curentului rețelei în condițiile unui surplus energetic*

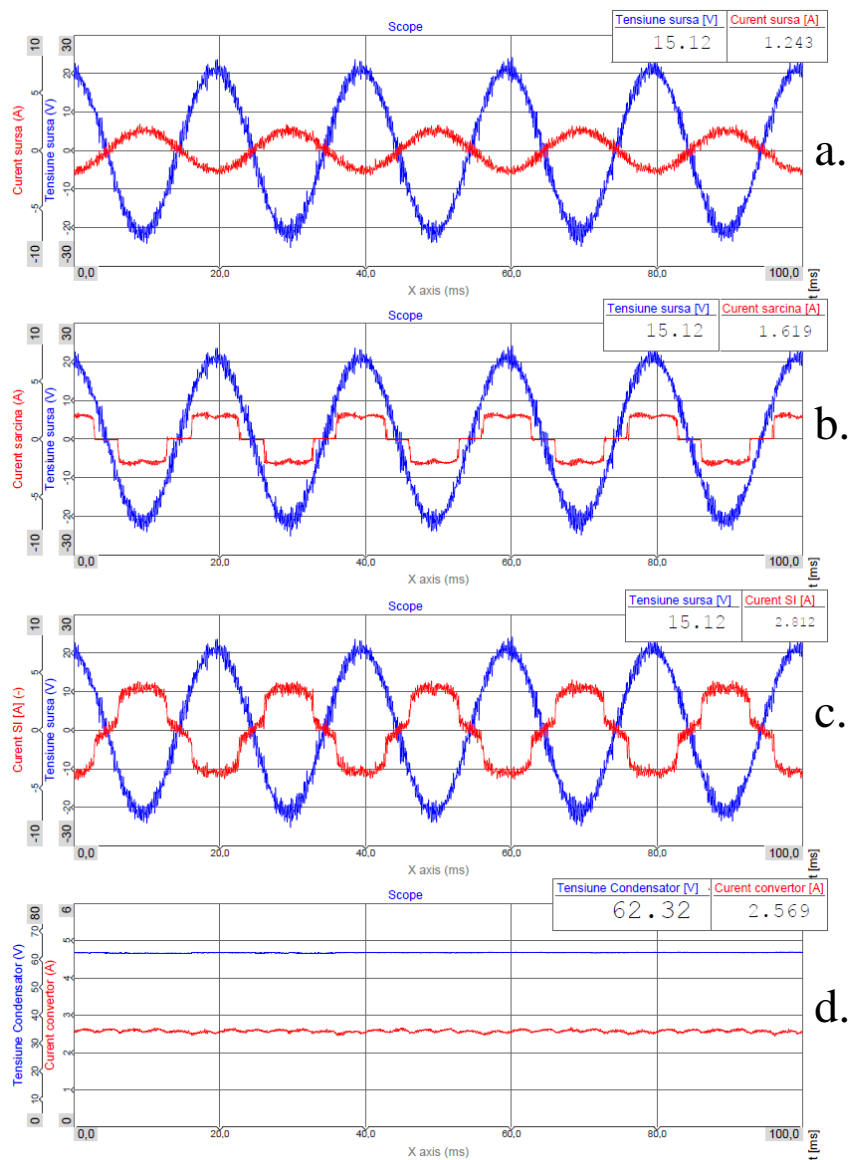


*Figura 4.12. Distorsiunea armonică totală a tensiunii după conectarea Sistemului Integrat în condițiile unui surplus energetic*



*Figura 4.13. Distorsiunea armonică totală a curentului după conectarea Sistemului Integrat în condițiile unui surplus energetic*

Valorile distorsiunii armonice totale pentru tensiune și curent sunt prezentate în *Figura 4.12* și *Figura 4.13*. Comparativ cu rezultatele obținute în cazul alimentării unei sarcini neliniare, prezentate în *Figura 4.9* și *Figura 4.10*, se observă o reducere semnificativă a THD-ului. Astfel, distorsiunea armonică totală a tensiunii scade de la 2,7% la 0,6%, iar distorsiunea armonică totală a curentului scade de la 28,5% la 3,4%, rezultând injectarea unui curent sinusoidal în rețea.



*Figura 4.14. Momentul funcționării Sistemului Integrat în condițiile unui surplus energetic – DeweSoft*

Formele de undă a tensiunii din PCC și a curentului generat de Sistemul Integrat sunt prezentate în *Figura 4.14 c*. Curentul generat de Sistemul Integrat are o valoare de 2,8 A și o formă distorsionată pentru a atenua armonicile de curent produse de sarcina neliniară, care absoarbe un curent de 1,6 A, așa cum se observă în *Figura 4.14 b*. Prin însumarea curentului generat de Sistemul Integrat cu cel absorbit de sarcina neliniară, rezultă un curent sinusoidal injectat în rețea, cu o valoare de 1,2 A, prezentat în *Figura 4.14 a*.

În Figura 4.14 d. este prezentat curentul și tensiunea la ieșirea convertorului ridicător, cu o tensiune de 62 V și un curent de 2,57 A, rezultând o putere injectată de 160 W.

#### 4.4.2 Rezultate experimentale în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică

În acest studiu, Sistemul Integrat este conectat la o rețea electrică trifazată și, în absența intensității radiației solare, nu produce energie electrică. În aceste condiții, puterea necesară pentru alimentarea sarcinii neliniare este furnizată de rețea, iar Sistemul Integrat funcționează ca un Filtru Activ de Putere paralel. În acest experiment, sursa de tensiune care înlocuiește panourile fotovoltaice este deconectată. Figura 4.15 ilustrează formele de undă ale tensiunii și curentului rețelei în condițiile alimentării sarcinii neliniare din rețea.

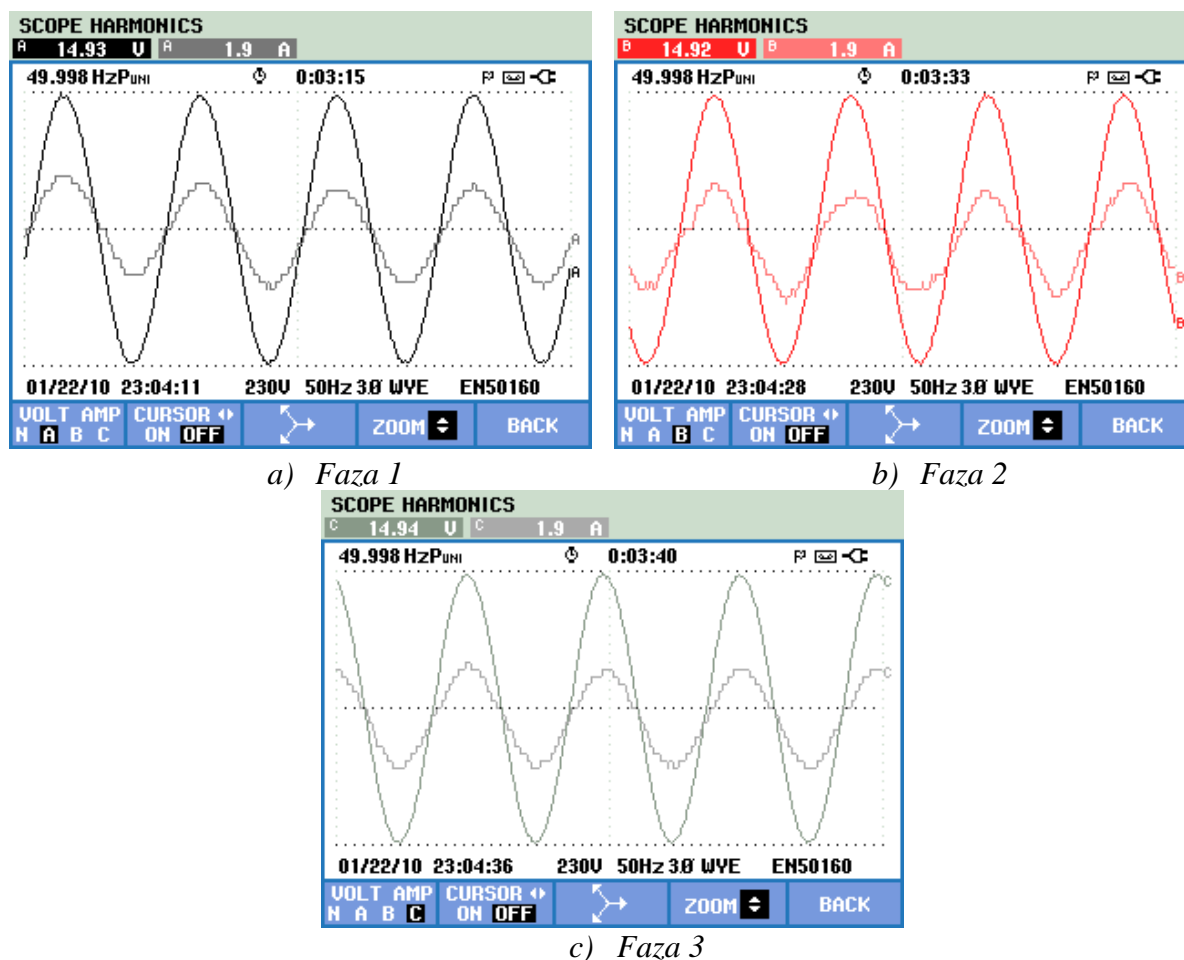


Figura 4.15. Formele de undă ale tensiunii și curentului rețelei în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică

Valorile distorsiunii armonice totale pentru tensiune și curent sunt prezentate în Figura 4.16 și Figura 4.17. Comparativ cu rezultatele obținute în cazul alimentării unei sarcini neliniare direct de la rețea, prezentate în Figura 4.9 și Figura 4.10, se observă o reducere semnificativă a THD-ului. Distorsiunea armonică totală a tensiunii scade de la 2,7% la 0,7%, iar cea a curentului scade de la 28,5% la 2,1%, ceea ce duce la absorbția unui curent sinusoidal din rețea.

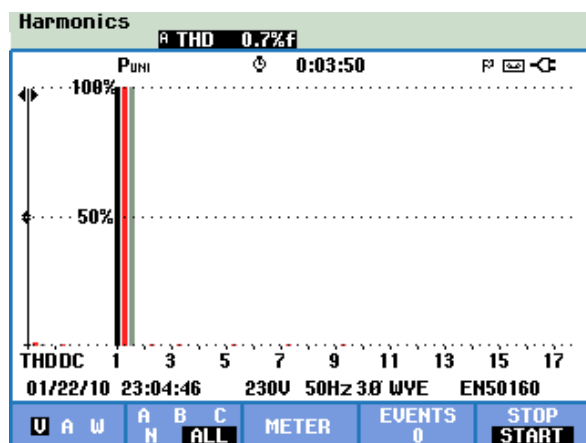


Figura 4.16. Distorsiunea armonică totală a tensiunii după conectarea Sistemului Integrat în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică

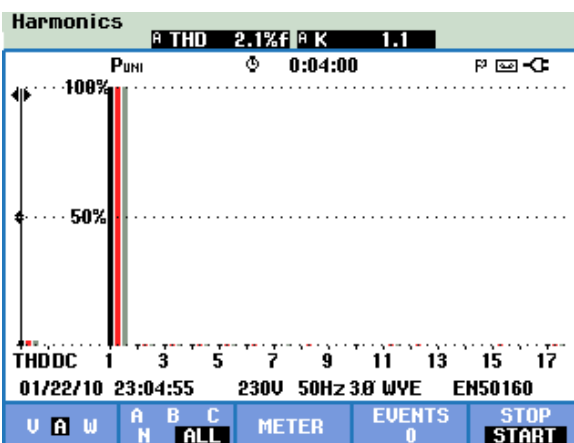


Figura 4.17. Distorsiunea armonică totală a curentului după conectarea Sistemului Integrat în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică

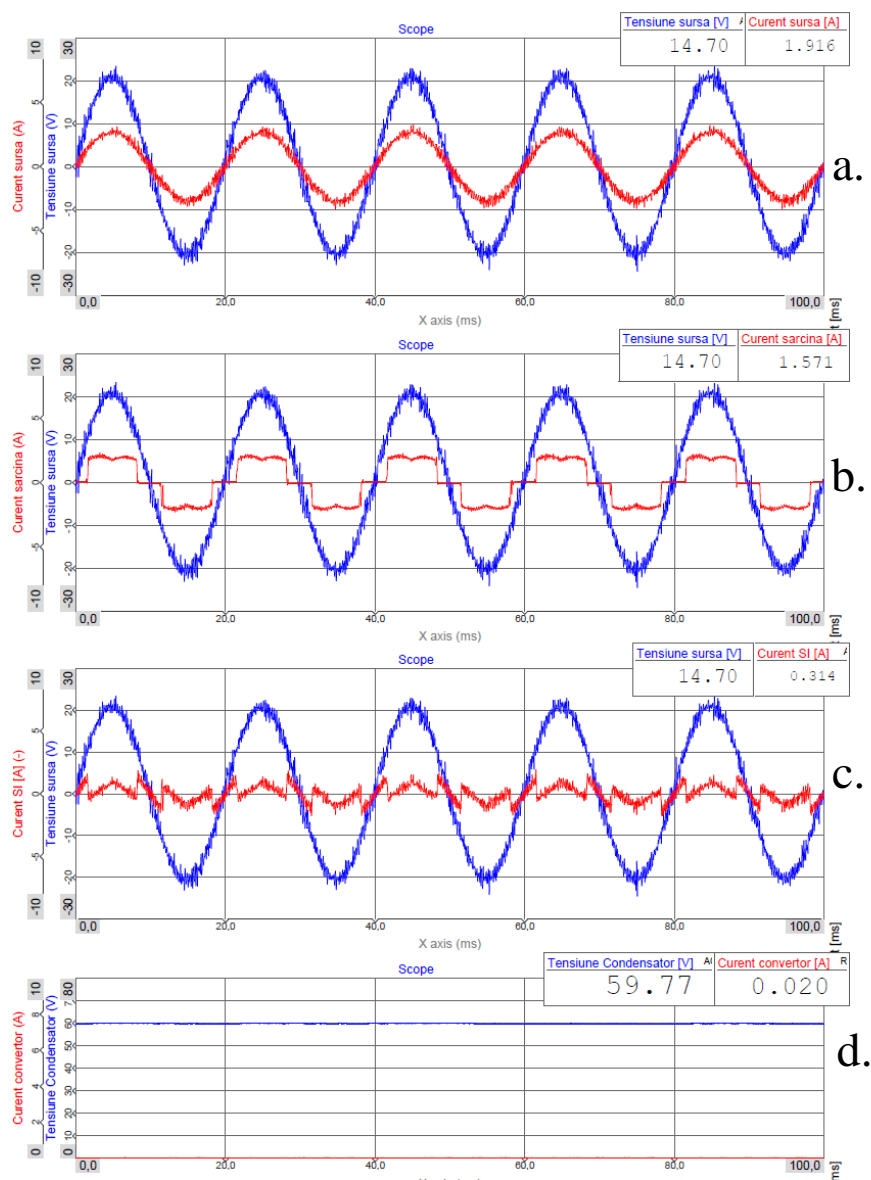


Figura 4.18. Momentul funcționării Sistemului Integrat în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică – DeweSoft

Formele de undă ale tensiunii din PCC și ale curentului absorbit de sarcina neliniară în momentul funcționării sunt prezentate în *Figura 4.18 b*, având o valoare de 1,57 A. În acest studiu, Sistemul Integrat este alimentat din rețea, absorbind un curent distorsionat de 0,31 A, injectând componente armonice în opoziție cu cele generate de sarcina neliniară, cu formele de undă prezentate în *Figura 4.18 c*. Ca rezultat, curentul absorbit de sarcina neliniară, însumat cu cel absorbit de Sistemul Integrat, generează un curent sinusoidal absorbit din rețea, cu o valoare de 1,91 A, așa cum se observă în *Figura 4.18 a*. În *Figura 4.18 d* este ilustrat nivelul tensiunii pe condensator, având o valoare de 59,77 V.

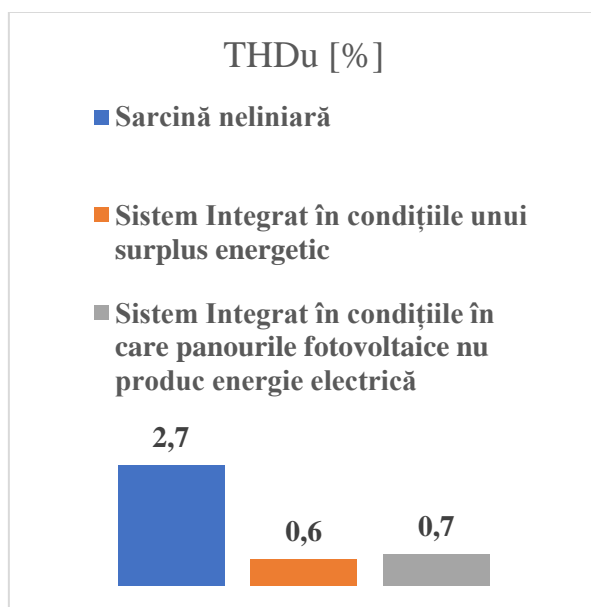
#### 4.5 Concluzii

Acest capitol a prezentat rezultatele experimentale privind integrarea panourilor fotovoltaice în rețelele electrice de joasă tensiune prin utilizarea unui Filtru Activ de Putere, cu scopul creșterii performanțelor surselor regenerabile de energie. Comanda Filtrului Activ de Putere a fost implementată pe modulul cRIO 9039, utilizând mediul de programare LabView 2017, unde a fost realizată strategia de comandă Control Indirect.

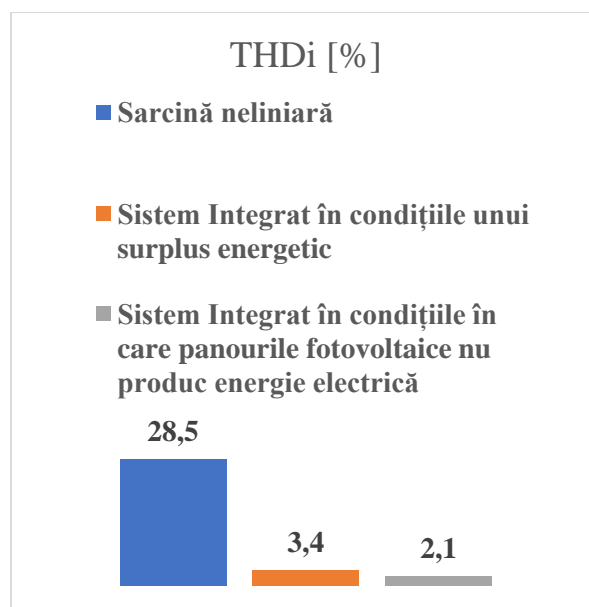
Pentru a analiza comportamentul Sistemului Integrat în diferite condiții de funcționare, au fost dezvoltate două studii distincte:

- Rezultate experimentale în condițiile unui surplus energetic;
- Rezultate experimentale în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică.

Analizând rezultatele experimentale prezentate în graficele din *Figura 4.19* și *Figura 4.20*, se observă o reducere semnificativă a distorsiunii armonice totale a curentului și tensiunii, confirmând astfel buna funcționare a Sistemului Integrat. Acesta poate injecta eficient energia electrică produsă de panourile fotovoltaice în rețea, îmbunătățind simultan calitatea energiei electrice. În absența intensității radiației solare, Sistemul Integrat continuă să contribuie la îmbunătățirea calității energiei electrice.



*Figura 4.19. Analiza comparativă a nivelului armonic de tensiune*



*Figura 4.20. Analiza comparativă a nivelului armonic de curent*

## **CAPITOLUL 5. CONCLUZIILE GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE**

Integrarea panourilor fotovoltaice în rețeaua electrică a crescut considerabil, fiind impulsionată de progresele tehnologice și de sprijinul oferit prin programe guvernamentale. Cu toate acestea, prezența consumatorilor neliniari și perturbările provocate de variațiile intensității radiației solare, precum și de umbrirea panourilor fotovoltaice, produc distorsiuni semnificative în rețea. Pentru a remedia aceste probleme și a facilita o integrare eficientă a sistemelor fotovoltaice, utilizarea Filtrelor Active de Putere s-a dovedit a fi o soluție eficientă și adecvată în contextul actual.

**Capitolul 1** oferă o prezentare succintă a consumului actual de energie electrică în România, precum și a tendințelor propuse pentru creșterea producției de energie regenerabilă. De asemenea, sunt detaliate construcția sistemului fotovoltaic, incluzând structura panourilor fotovoltaice, tipurile acestora și randamentul lor. Capitolul descrie modul de conectare la rețea a panourilor și structurile invertoarelor fotovoltaice existente. Sunt prezentate, de asemenea, principalele algoritme utilizate pentru extragerea puterii maxime din panourile fotovoltaice, evidențiind posibilele probleme legate de conectarea acestor sisteme la rețea.

Tot în acest capitol au fost prezentate principalele topologii ale Filtrelor Active de Putere și metodele de comandă disponibile în literatura de specialitate. De asemenea, au fost prezentate principalele topologii pentru integrarea sistemelor de energie regenerabilă în rețea, prin utilizarea Filtrelor Active de Putere, care pot contribui semnificativ la îmbunătățirea calității energiei electrice.

**Capitolul 2** prezintă dimensionarea convertorului ridicător de tensiune, în funcție de configurația și puterea instalată a panourilor fotovoltaice. De asemenea, în acest capitol a fost detaliată și dimensionarea Filtrului Activ de Putere, având în vedere conectarea panourilor fotovoltaice pe partea de curent continuu, realizând astfel un Sistem Integrat.

**Capitolul 3** prezintă o analiză comparativă între un sistem fotovoltaic și Sistemul Integrat propus de autor. În cadrul acestei analize au fost dezvoltate patru studii distincte, care explorează posibilele moduri de funcționare ale ambelor sisteme. Rezultatele analizei comparative au demonstrat că Sistemul Integrat îmbunătățește semnificativ calitatea energiei electrice din surse regenerabile și oferă performanțe superioare în comparație cu sistemul fotovoltaic.

**Capitolul 4** prezintă rezultatele experimentale obținute pe standul experimental, în care au fost evaluate două moduri de funcționare distincte. Aceste rezultate confirmă buna funcționare și stabilitate a Sistemului Integrat propus în ceea ce privește integrarea panourilor fotovoltaice în rețelele electrice de joasă tensiune, prin utilizarea unui Filtru Activ de Putere, având ca scop creșterea performanțelor surselor regenerabile de energie.

***Contribuții aduse prin această lucrare sunt:***

### **Capitolul 2**

- Determinarea inductivităților de conectare la rețea pentru Sistemul Integrat;
- Determinarea capacității pe partea de curent continuu a Sistemului Integrat;
- Dimensionarea convertorului ridicător de tensiune.



### Capitolul 3

Modelarea și simularea convertorului ridicător de tensiune utilizând algoritmul de comandă P&O modificat;

Modelarea și simularea sistemului fotovoltaic trifazat conectat la rețea utilizând strategia de comandă în cadrul de referință DQ;

Modelarea și simularea Sistemului Integrat utilizând algoritmul de comandă Control Indirect (CI);

Realizarea unei analize comparative între un sistem fotovoltaic și Sistemul Integrat. Analiza a fost efectuată pe baza a patru studii distincte:

- Simulări în condițiile asigurării necesarului energetic solicitat;
- Simulări în condițiile unui surplus energetic;
- Simulări în condițiile unui deficit energetic;
- Simulări în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică.

### Capitolul 4

Contribuții la realizarea standului experimental al Filtrului Activ de Putere de către autorul acestei lucrări, în calitate de membru al echipei de cercetare din cadrul proiectului „Transfer de cunoștințe privind creșterea eficienței energetice și sisteme inteligente de putere - CRESC-INTEL”.

Integrarea Filtrului Activ de Putere cu convertorul ridicător de tensiune și sursa de tensiune pentru realizarea Sistemului Integrat.

Conceperea convertorului ridicător de tensiune.

Elaborarea schemei electrice a Sistemului Integrat.

Implementarea strategiei de comandă Control Indirect a Filtrului Activ de Putere în LabView 2017.

Conectarea și gestionarea echipamentelor de măsură Fluke 437-II și DeweSoft Sirius-HS;

Evidențierea celor două moduri de funcționare al Sistemului Integrat:

- Rezultate experimentale în condițiile unui surplus energetic;
- Rezultate experimentale în condițiile în care panourile fotovoltaice nu produc energie electrică.

Validarea performanței a funcționalității și stabilității Sistemului Integrat.

## Listă lucrări publicate și prezentate

1. G. Gurguiatu, C. D. Bălănuță, **A. Dușa**, E. M. Roșu, T. Munteanu, "*P-tool - A Software Application for Choosing the Topology for Active Power Filters*", (pp. 31-38)- THE ANNALS OF "DUNĂREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE III, 2018, VOL. 41, NO.2, ISSN 2344-4738, ISSN-L 1221-454X ELECTROTECHNICS, ELECTRONICS, AUTOMATIC CONTROL, INFORMATICS
2. **Dusa Alexandru**, Balanuta Ciprian Daniel, Gurguiatu Gelu, "*Reactive power compensation for a PV park connected at a long dinstance*", THE 6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING, 18-20 octombrie 2019, DOI: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136104.
3. Balanuta Ciprian Daniel, **Dusa Alexandru**, Gurguiatu Gelu, Luca Laurentiu, "*Reactive power compensation for consumers connected at long-distances*", THE 6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING, 18-20 octombrie 2019, DOI: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136108.
4. Gelu Gurguiatu, Ciprian Daniel Bălănuță, **Alexandru Dușa**, Ion Voncilă, Mariana Dumitrescu, Alexandra Anton, Emil Mina Roșu, "*Active Power Filter Control Strategy Choosing by M-Tool Application*", THE 6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING, 18-20 octombrie 2019, DOI: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136154.
5. Ciprian Daniel Bălănuță, Gelu Gurguiatu, **Alexandru Dușa**, Emil Mina Roșu, Ion Voncilă, Constantin Drogeanu, "*L, LC and LCL Filter Choosing by C-Tool Application*", (pp. 10-14)- THE ANNALS OF "DUNĂREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE III, 2019, VOL. 42, NO.2, ISSN 2344-4738, ISSN-L 1221-454X ELECTROTECHNICS, ELECTRONICS, AUTOMATIC CONTROL, INFORMATICS, DOI: <https://doi.org/10.35219/eeaci.2019.2.02>.
6. Autori: Ciprian Daniel Bălănuță, Gelu Gurguiatu, **Alexandru Dușa**, Ion Voncilă, Cătălin Puiu, Daniel Necula, "*Choosing the Control and Data Acquisition System Using Daq-Tool Application*", (pp. 23-27)- THE ANNALS OF "DUNĂREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE III, 2019, VOL. 42, NO.2, ISSN 2344-4738, ISSN-L 1221-454X ELECTROTECHNICS, ELECTRONICS, AUTOMATIC CONTROL, INFORMATICS, DOI: <https://doi.org/10.35219/eeaci.2019.2.05>.
7. **Alexandru Dușa**, "*Integration of photovoltaic systems in a low voltage electrical grid*", (pp. 28-35)- THE ANNALS OF "DUNĂREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE III, 2020, VOL. 43, NO.1, ISSN 2344-4738, ISSN-L 1221-454X ELECTROTECHNICS, ELECTRONICS, AUTOMATIC CONTROL, INFORMATICS, DOI: <https://doi.org/10.35219/eeaci.2020.1.04>.
8. **Alexandru Dușa**, Ciprian Daniel Bălănuță, Gelu Gurguiatu, Constantin Drogeanu, "*Choosing the main elements of an active power filter with FAP-tool application*", (pp. 42-48)- THE ANNALS OF "DUNĂREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE III, 2020, VOL. 43, NO.1, ISSN 2344-4738, ISSN-L 1221-454X ELECTROTECHNICS, ELECTRONICS, AUTOMATIC CONTROL, INFORMATICS, DOI: <https://doi.org/10.35219/eeaci.2020.1.06>.

9. Nicolae Badea, **Alexandru Duşa**, Nicu Roman, "*Power Quality Comparative Analysis between UPF and SAPF*", Journal of Energy and Power Engineering, vol 15. pp. 117 - 127, 2021, DOI:10.17265/1934-8975/2021.04.001.
10. **Alexandru Duşa**, Petru Livinti, Nicolae Badea, Laurentiu Luca, "*Comparative Analysis of the Methods Used for Active Power Filtering in a Grid-Connected Photovoltaic System*", Journal of Energy and Power Engineering, vol 15. pp. 135 - 149, 2021, DOI:10.17265/1934-8975/2021.04.003.
11. **Dusa Alexandru**, Petru Livinti, Daniel Ciprian Balanuta, Gelu Gurguiatu, "*A New Hybrid System Used to Connect PV to a Microgrid*", Digital Technologies and Applications, iunie 2021, DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2\\_123](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2_123).
12. **Alexandru Duşa**, Emil Roşu, Silviu Epure, Răzvan Şolea, Marian Găiceanu, Arsene Liviu Sorin, "*Improving the power quality using the Active Power Filter. Experimental results*", 2021 7th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), octombrie 2021, DOI: 10.1109/ISEEE53383.2021.9628806.
13. Dache Cristinel, Silviu Epure, **Alexandru Duşa**, Răzvan Şolea, Marian Găiceanu, Constantin Drogeanu, "*The influence of the type of connection of the filter coils on the efficiency of the filtration process*", 2021 7th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), octombrie 2021, DOI: 10.1109/ISEEE53383.2021.9628558.
14. Ion Voncilă, **Alexandru Duşa**, Cristi Marin, "*Comparative analysis of APPF modelling and simulation*", The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle III, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics. Februarie 2022, DOI: <https://doi.org/10.35219/eeaci.2021.1.05>.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] „Raportul anual privind activitatea Autorității Naționale de Reglementare în Domeniul Energiei,” 2022.
- [2] P. Hamed H., Reza Vatankhah Barenji și Vahid M. Khojastehnezhad, „Solar energy status in the world: A comprehensive review,” în *Energy Reports*, doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022, 2023, pp. 3474-3493.
- [3] Faiza Belhachat, Cherif Larbes și Rachid Bennis, „Recent advances in fault detection techniques for photovoltaic systems: An overview, classification and performance evaluation,” *Optik*, vol. 306, pp. 1 - 20, 2024.
- [4] Aboubakr El Hammoumi, Smail Chtita, Saad Motahhir și Abdelaziz El Ghzizal, „Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11992-12010, 2022.
- [5] R. O. (. Machidon), CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA CANTITĂȚII DE ENERGIE GENERATE DE SISTEMELE FOTOVOLTAICE, Iași: UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI, 2020.
- [6] A. El-Ghonemy, „Photovoltaic Solar Energy: Review,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, nr. 11, pp. 1-43, 2012.
- [7] N. Badea, Surse regenerabile de energie, Galați: EDITURA FUNDAȚIEI UNIVERSITARE „Dunărea de Jos”, 2017.
- [8] B.-A. ONOSE, CONTRIBUTII PRIVIND ANALIZA CIRCUITELOR NELINIARE IN REGIM PERIODIC, ASOCIATE SISTEMELOR FOTOVOLTAICE, București: ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ, 2023.
- [9] <https://www.creeaza.com/tehnologie/constructii/instalatii/Functionarea-celulelor-fotovolt786.php>. [Accesat 2024].
- [10] Flavia C.S.M. Padoan, Pietro Altimari și Francesca Pagnanelli, „Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development,” *Solar Energy*, vol. 177, pp. 746 - 761, 2019.
- [11] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>. [Accesat 2024].
- [12] L. OLTEANU, CERCETĂRI PRIVIND CONVERSIA FOTOVOLTAICĂ A ENERGIEI SOLARE CU AJUTORUL CELULELOR FOTOVOLTAICE SENSIBILIZATE CU STRUCTURI ORGANICE (DSSC), TÂRGOVIȘTE: UNIVERSITATEA “VALAHIA” DIN TÂRGOVIȘTE, 2022.
- [13] Imran Ahmad, Norhayati Abdullah, Mohd Danish Ahmad, Mohd Danish Ahmad și Ali Yuzir, „Chapter 19 - Harnessing solar radiation for potential algal biomass production,”

în *Handbook of Algal Biofuels, Aspects of Cultivation, Conversion, and Biorefinery*, 2022, pp. 421 - 449.

- [14] A. M. Bagher, M. M. A. Vahid și M. Mohsen, „Types of Solar Cells and Application,” *American Journal of Optics and Photonics*, vol. 3, nr. 5, pp. 94-113, 2015.
- [15] Meghraj Morey, Nitin Gupta, Man Mohan Garg și Ajay Kumar, „A comprehensive review of grid-connected solar photovoltaic system: Architecture, control, and ancillary services,” *Renewable Energy Focus*, vol. 45, pp. 307 - 330, 2023.
- [16] Kamran Zeb, Waqar Uddin, Muhammad Adil Khan, Zunaib Ali, Muhammad Umair Ali, Nicholas Christofides și H.J. Kim, „A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1180 - 1141, 2018.
- [17] Derick Mathew și Rani Chinnappa Naidu, „A review on single-phase boost inverter technology for low power grid integrated solar PV applications,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, nr. 2, 2024.
- [18] A. K. Podder, N. K. Roy și H. R. Pota, „MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature,” *The Institution of Engineering and Technology*, pp. 1-18, 2019.
- [19] I. Yahyaoui, M. Chaabene și F. Tadeo, „Evaluation of Maximum Power Point Tracking algorithm for off-grid photovoltaic pumping,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 25, pp. 65-73, 2016.
- [20] B. Bendib, H. Belmili și F. Krim, „A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems,” *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 45, pp. 637-648, 2015.
- [21] F. L. Tofoli, D. d. C. Pereira și W. J. De Paula, „Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems,” *International Journal of Photoenergy*, pp. 1-10, 2015.
- [22] R. I. Putri, S. Wibowo și M. Rifa'i, „Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Using Incremental Conductance Method,” *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 22-30, 2015.
- [23] Mihaela Popescu, Alexandru Bitoleanu, Constantin Vlad Suru, Mihaita Linca și Laurentiu Alboteanu, „Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review,” *energies*, vol. 17, pp. 1-42, 2024.
- [24] Eflorin Ionescu, Dan Floricău, Smaranda Nițu, Jean-Paul Six, Philippe Delarue și Cristian Boguș, *ELECTRONICĂ DE PUTERE - Conversoare statice*, București: Editură Tehnică, 1998.
- [25] O. P. Mahela și A. G. Shaik, „Topological aspects of power quality improvement techniques: A comprehensive overview,” *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 58, pp. 1129-1142, 2016.

- [26] M. Abuzied, Rating Optimization of Three Phase Series Hybrid Power Filter for Power Quality Compensation and Renewable Energy Integration, Montreal: École de technologie supérieure, 2018.
- [27] Asit Mohanty, Prakash K. Ray, Soumya Ranjan Das, Manzoore Elahi M. Soudagar, S. Ramesh, T.M. Yunus Khan, Naif Almakayeel, M. Mahmood Ali și Muhammad Nasir Bashir, „Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5575-5592, 2024.
- [28] Wajahat Ullah Tareen, Saad Mekhilef, Mehdi Seyedmahmoudian și Ben Horan, „Active power filter (APF) for mitigation of power quality issues in grid integration of wind and photovoltaic energy conversion system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 635 - 655, 2017.
- [29] G. Gurguiatu, Calitatea Energiei Electrice - Filtre Active de Putere, Galați: University Press, 2016.
- [30] C. D. BĂLĂNUȚĂ, CERCETĂRI ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE ÎN SISTEMELE ELECTRICE - Teză de doctorat -, Galați, 2012.
- [31] Edson Hirokazu Watanabe, M. Aredes și Hirofumi Akagi, „The p-q theory for active filter control: some problems and solutions,” *Controle & Automação*, vol. 15, nr. 1, pp. 78 - 84, 2004.
- [32] E. Roșu, M. Culea, T. Dumitriu, T. Munteanu și R. Paduraru , „ACTIVE POWER FILTER WITH INDIRECT CONTROL FOR LINE-FREQUENCY CONTROLLED RECTIFIERS,” *THE ANNALS OF “DUNAREA DE JOS” UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE III*, vol. 32, nr. 1221-454X, pp. 30-36, 2009.
- [33] Gurguiatu Gelu și Toader Munteanu, „Indirect control in Active Power Filters,” *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012.
- [34] Rajendran Boopathi și Vairavasundaram Indragandhi, „Comparative analysis of control techniques using a PV-based SAPF integrated grid system to enhance power quality,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, pp. 1 - 16, 2023.
- [35] Ayoub Benzahia, Rabhi Boualaga, Ammar Moussi, Laeid Zellouma, Memich Meriem și Bouziane Chaima, „A PV powered shunt active power filter for power quality improvement,” *Global Energy Interconnection*, vol. 2, nr. 2, pp. 143 - 149, 2019.
- [36] Naamane Debdouche, Laid Zarour, Ali Chebabhi, Noureddine Bessous, Habib Benboughenni și Ilhami Colak, „Genetic algorithm-super-twisting technique for grid-connected PV system associate with filter,” *Energy Reports*, pp. 4231 - 4252, 2023.
- [37] Alexandru Dusa, Petru Livinti, Nicolae Badea și Laurentiu Luca, „Comparative Analysis of the Methods Used for Active Power Filtering in a Grid-Connected

- Photovoltaic System,” *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 15, pp. 135 - 149 , 2021.
- [38] R. Samikannu și K. Senthilnathan, „Series Active Power Filter for Power Quality Improvement Based on Distributed Generation,” *International Journal of Applied Engineering Research ISSN*, vol. 12, nr. 22, pp. 12214-12218, 2017.
- [39] S. Devassy și B. Singh, „Design and Performance Analysis of Three-Phase Solar PV Integrated UPQC,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1-9, 2017.
- [40] Y. Bouzelata, E. Kurt, R. Chenni și N. Altin, „Design and simulation of a unified power quality conditioner fed by solar energy,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, nr. 44, pp. 15267-15277, 2015.
- [41] Mallikarjuna Golla, K. Chandrasekaran și Sishaj P. Simon, „PV integrated universal active power filter for power quality enhancement and effective power management,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 61, pp. 104 - 117, 2021.
- [42] A. Dușa, „Integration of photovoltaic systems in a low voltage electrical grid,” *The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galati*, vol. 43, nr. 1, pp. 28 - 35, 2020.
- [43] P. Livinti și M. Ghandour, „Fuzzy logic system for controlling of DC/DC boost converter developed in Matlab Simulink,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, nr. 9, pp. 1629 - 1636, 2020.
- [44] S. Kumaresan și H. Habeebullah Sait, „Design and control of shunt active power filter for power quality improvement of utility powered brushless DC motor drives,” *Automatika, Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and*, vol. 61, nr. 3, pp. 507 - 521, 2020.
- [45] S. K. Khadem, M. Basu și M. F. Conlon, „Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters,” *IET Power Electronics*, vol. 7, nr. 2, pp. 418 - 430, 2014.
- [46] M. Bojrup, *Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application*, Lund, 1999.
- [47] V. Manimegalai, N. Senthilnathan și M. Sabarimuthu, „GRID INTERFACED RENEWABLE ENERGY SOURCE TO IMPROVE POWER QUALITY USING SAPF,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, nr. 4, pp. 834 - 839, 2017.
- [48] Y. Yang și F. Blaabjerg, „Overview of Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic,” în *Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS®*, London, CRC Press, 2017, pp. 41 - 66.
- [49] Y. Djeghader, Z. Chelli și S. Rehaimia, „Harmonic Mitigation in Electrical Grid Connected Renewable Energy Sources,” *ACTA ELECTROTEHNICA*, vol. 59, nr. 4, pp. 287 - 291, 2018.

- [50] A. Chaithanakulwat, „Multi-Functionality Control, Power Filtering Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System,” *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 8, nr. 2, pp. 62 - 70, 2019.
- [51] G. BALABAN, H. ALBERT, N. GOLOVANOV și G. C. LAZAROIU, „PROBLEME PRIVIND CONECTAREA ÎN REȚELELE DE MEDIE TENSIUNE A SURSELOR REGENERABILE,” *EMERG*, vol. 4, pp. 7 - 18, 2016.
- [52] Alexandru Dușa, Petru Livinti, Daniel Ciprian Balanuta și Gurguiatu Gelu, „A New Hybrid System Used to Connect PV to a Microgrid,” în *Digital Technologies and Applications - Lecture Notes in Networks and Systems Volume 211*, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2\\_123](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2_123), 2021, pp. 1353-1363.
- [53] P. Livinti, „Comparative Study of a Photovoltaic System Connected to a Three-Phase Grid by Using PI or Fuzzy Logic Controllers,” *MDPI*, vol. 13, nr. 2562, pp. 1-14, 2021.
- [54] V.-R. COCIU și L. COCIU, „PARK TRANSFORMATION FOR AN ASYMMETRIC SYSTEM,” *BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘ*, vol. 63 (67), nr. 2, pp. 15 - 26, 2017.
- [55] Ion VONCILĂ, Alexandru DUȘA și Cristi MARIN, „COMPARATIVE ANALYSIS OF APPF MODELLING AND SIMULATION,” *THE ANNALS OF “DUNĂREA DE JOS” UNIVERSITY OF GALATI*, vol. 44, nr. 1, pp. 29-34, 2021.
- [56] Gelu Gurguiatu, Ciprian Daniel Bălănuță, Alexandru Dușa, Emil Mina Roșu, Ion Voncilă și Mariana Alexandra, „Active Power Filter Control Strategy Choosing by M-Tool Application,” *2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 2020.
- [57] Ciprian Daniel Bălănuță, Gelu Gurguiatu, Alexandru Dușa, Ion Voncilă, Cătălin Puiu și Daniel Necula, „CHOOSING THE CONTROL AND DATA ACQUISITION SYSTEM USING DAQ-TOOL APPLICATION,” *THE ANNALS OF “DUNĂREA DE JOS” UNIVERSITY OF GALATI*, vol. 42, nr. 2, pp. 23-27, 2019.