

Raport Științific Etapa I – 2018

Proiect PCCDI Nr.30/2018

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA

***Proiect 3: Managementul conversiei și stocării  
energiei folosind tehnologii de tip „smart grid”***

***Activitatea 1.6. Realizarea modelelor sub-sistemelor de producere,  
conversie, stocare și sarcini ale microrețelei considerate***

Echipă implementare UPT:

1. Acad.Prof.Dr.Ing. Ion Boldea
2. Prof.Dr.Ing. Nicolae Muntean
3. Prof.Dr.Ing. Lucian Tutelea
4. Conf.Dr.Ing. Ciprian Șorândaru
5. Șl.Dr.Ing. Octavian Cornea
6. Drd.Ing. Dănuț Vitan
7. Drd.Ing. Dan Hulea
8. Ing. Gireadă Mihăiță

Echipă implementare UTC-N:

1. Drd.Ing. Iuoras Adrian
2. S.l.Dr.Ing. Bojan Mircea
3. Conf.Dr.Ing. Teodosescu Petre

Echipă implementare INC DIE ICPE-CA:

1. Dr.Ing. Rareș-Andrei Chihaiia
2. Dr.Ing. Andreea El-Leathey
3. Ing. Constantin Dumitru
4. Drd.Ing. Ion Murgescu
5. Dr.Ing. Emil Tudor
6. Dr.Ing. Mihail Popescu
7. Ing. Liviu Popovici

# **1. Studiu cu privire la cerințele, performanțele și particularitățile tehnice necesare implementării energiei electrice în curent continuu pentru o microrețea de cartier**

Odată cu apariția unor noi echipamente și a necesității de a construi o rețea mai inteligentă, este de așteptat ca HVDC să depășească poziția sa tradițională de accesoriu la transmisia de curent alternativ.

## **1.1. Transportul energiei electrice în curent continuu la tensiuni înalte HVDC (High Voltage Direct Current)**

Sistemele HVDC sunt deja utilizate pe scară largă pentru transportul energiei electrice în mediul marin pentru interconectarea rețelelor de c.a. nesincronizate, oferind o capacitate eficientă și stabilă de transport și control. HVDC este, de asemenea, tehnologia preferată pentru transportul pe distanțe lungi, capabilă să transmită cantități mari de energie electrică pe distanțe foarte lungi, cu pierderi electrice scăzute. Reprezintă deja o tehnologie cheie în depășirea unei mari probleme existente la generarea de energie regenerabilă (energie eoliană, energie solară sau energie hidro) - aceste resurse sunt rareori localizate în apropierea centrelor de aglomerare urbană care au nevoie de ele.

Motivul pentru alegerea HVDC în loc de c.a. pentru a transporta cantități mari de energie electrică pe distanțe mari într-un caz specific sunt adesea numeroase și complexe:

- a) Controlul puterii: HVDC este necesar sau de dorit din punct de vedere tehnic pentru asigurarea unui control inteligent;
- b) HVDC are ca rezultat o investiție totală mai mică, inclusiv pierderi mai mici – valabil pentru distanțe mari;
- c) Protecția mediului ambiant.

HVDC permite interconectarea sigură și stabilă a rețelelor de alimentare c.a. care funcționează pe diferite frecvențe sau sunt altfel incompatibile. În plus, HVDC asigură controlul instant și precis al fluxului de putere.

Odată instalate, sistemele de transmisie HVDC devin o parte integrantă a sistemului electric, îmbunătățind stabilitatea generală, fiabilitatea și capacitatea de transmisie.

Un număr de legături HVDC interconectează două sisteme c.a. care nu sunt sincrone. Când trebuie conectate sistemele de c.a., acestea trebuie sincronizate. Aceasta înseamnă că acestea ar trebui să funcționeze la aceeași tensiune și frecvență, ceea ce poate fi dificil de realizat. Deoarece HVDC nu are frecvență, se poate adapta oricăror tensiuni și frecvențe nominale pe care le primește.

Nu există limite tehnice pentru lungimea potențială a unui cablu HVDC. Pentru un transport de energie c.a., fluxul de putere reactivă din cauza capacității mari a cablului va limita distanța maximă posibilă de transmisie. Cu HVDC nu există o astfel de limitare; de aceea, pentru conexiunile foarte lungi, HVDC este singura alternativă viabilă de transport.

În multe cazuri, o legătură HVDC poate îmbunătăți, de asemenea, performanța sistemelor de alimentare cu curent alternativ prin intermediul unor facilități suplimentare de control. Funcțiile automate de control HVDC includ controlul constant al frecvenței, redistribuirea fluxului de putere în rețeaua de curent alternativ, amortizarea modificărilor de putere în rețelele de curent alternativ etc. În multe cazuri, astfel de funcții suplimentare de comandă pot face posibilă creșterea în siguranță a capacității de transmitere a puterii în transmisia c.a. linii unde stabilitatea este o limitare.

Pentru distanțe mari de transport, sistemele HVDC au un cost mai mic, chiar adaugând costurile suplimentare ale stațiilor terminale. O linie HVDC are pierderi mai mici decât o HVAC de aceeași capacitate în aproape toate cazurile, ceea ce înseamnă că mai multă putere electrică ajunge la destinația finală.

Sistemele HVDC au și un impact redus asupra mediului deoarece necesită mai puține linii aeriene pentru a furniza aceeași cantitate de energie precum sistemele HVAC. Și interconexiunile HVDC permit sistemelor electrice să utilizeze mai eficient centralele de generare, de exemplu, înlocuind generarea termică cu resursele hidroenergetice disponibile.

Tehnologia este o componentă cheie în viitorul sistem energetic bazat pe surse regenerabile de energie, cum ar fi energia eoliană și solară, care sunt deseori localizate la distanță.

Multe sisteme de transport HVDC au fost construite pentru a interconecta diferite sisteme de alimentare electrică. Conexiunile între instalațiile de generare existente conectate într-un sistem de global de electroalimentare funcționează mai eficient, astfel încât acoperă creșterea necesarului de energie electrică.

Beneficiul evident pentru mediu este ca nu trebuie să se construiască o nouă centrală electrică poluantă, dar există și câștiguri mai mari provenite din funcționarea unui sistem energetic interconectat care utilizează mai eficient centralele disponibile. Există avantaje deosebite în ceea ce privește mediul în legătură cu conectarea unui sistem energetic cu resurse regenerabile mari către un sistem care utilizează energia termică.

O linie aeriană bipolară HVDC este comparabilă cu cea a unei linii de curent alternativ dublu, din punct de vedere al fiabilității. Prin urmare, o singură linie HVDC cu două fascicule de conductori are un impact mai redus asupra mediului decât o linie de curent alternativ dublu cu șase fascicule de conductor - necesită mai puțin spațiu și are un impact vizual mai redus.

O nouă tehnologie bazată pe ultimele descoperiri în domeniul elementelor de comutație permite modularizarea convertizoarelor HVDC.

În sistemele ce utilizează HVDC modular este posibil să se folosească cabluri din polimer extrudat pentru transportul energiei de c.c.. Acest lucru a făcut ca utilizarea cablurilor îngropate să fie o alternativă interesantă pentru liniile aeriene tradiționale ceea ce are un impact asupra componentei de mediu. La sistemele HVDC pierderile de putere la transport sunt mai mici decât pierderile la transportul HVAC în aproape toate cazurile. O linie de transport a energiei HVDC optimizată are pierderi mai mici decât liniile c.a. de aceeași capacitate. De asemenea, trebuie adăugate pierderi la stațiile de conversie care sunt de aproximativ 0,6% pentru HVDC Classic și sub 1% pentru HVDC modular.

Prin urmare, pierderile totale de transport HVDC sunt în continuare mai mici decât pierderile de c.a. în aproape toate cazurile. Cablurile HVDC au, de asemenea, pierderi mai mici decât cablurile de curent alternativ. Diagrama din Figura 1 prezintă o comparație a pierderilor în transmisiile de linii aeriene de 1.200 MW utilizând HVAC și HVDC.

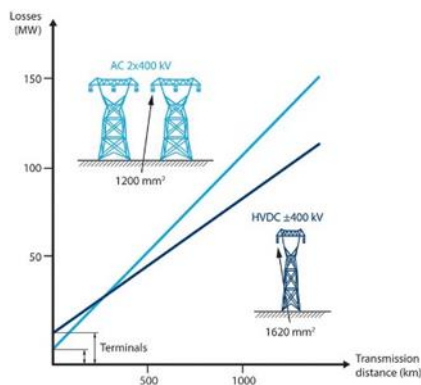


Figura 1. Dependența pierderilor electrice de lungimea liniilor de transport

O linie de transport HVDC costă mai puțin decât o linie c.a. pentru aceeași capacitate de transport. Totuși stațiile terminale HVDC sunt mai scumpe datorită faptului că trebuie să efectueze conversia de la c.a. la c.c. și c.c. la c.a.. Dar, pe o anumită distanță, așa-numita „distanță critică” (aproximativ 600 - 800 km), alternativa HVDC va oferi întotdeauna cel mai mic cost. Distanța critică este mult mai mică pentru cablurile submarine (de obicei aproximativ 50 km). Distanța depinde de câțiva factori (atât pentru linii cât și pentru cabluri) și trebuie realizată o analiză pentru fiecare caz în parte (Figura 2).

Conceptul de distanțe egale este important, dar acesta reprezintă numai unul dintre mai mulți factori, care trebuie luați în considerare în alegerea unui sistem de transmisie HVAC sau HVDC.

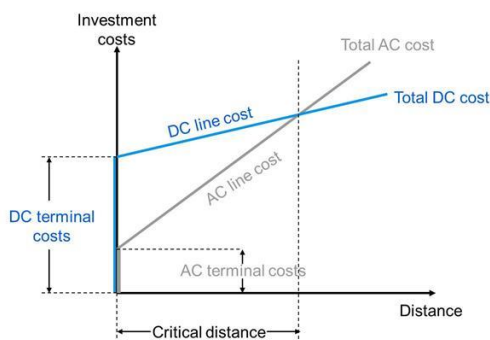


Figura 2. Dependența costurilor de investiție de lungimea liniilor de transport

Utilizarea HVDC pentru a interconecta două puncte într-o rețea electrică este, în multe cazuri, cea mai bună alternativă economică. În plus, are avantaje excelente pentru mediu.

Într-un sistem HVDC, energia electrică este preluată dintr-un punct dintr-o rețea de c.a. trifazată, transformată în c.c. într-o stație de convertizor, transmisă la punctul de recepție printr-o linie aeriană sau printr-un cablu și apoi transformată în c.a. într-o altă stație de convertizor injectat în rețeaua c.a. receptoare. În mod tipic, o transmisie HVDC are o putere nominală mai mare de 100 MW și multe sunt în gama de 1000 - 5 000 MW.

Liniile de transport HDVC actuale sunt bidirectionale astfel încât fluxul de putere poate fi controlat rapid și precis atât în ceea ce privește nivelul de putere, cât și direcția. Această posibilitate este adesea utilizată pentru a îmbunătăți performanța și eficiența rețelelor electrice interconectate.

Interesul crescut în ultimii ani pentru transportul energiei nepoluante de la centralele electrice ce utilizează energia regenerabilă (hidro, vânt, soare) aflate, de obicei la mare distanță a făcut să crească și interesul pentru sistemele HVDC care utilizează tensiuni de transport de c.c. mai mari decât cea utilizată în prezent (adică 600 kV c.c.). Acest lucru a condus la dezvoltarea sistemelor de ultraînaltă tensiune (UHVDC) care utilizează tensiuni de 800 kV și, mai recent, până la 1 100 kV C.C.

Transportul de putere electrică la 800 kV UHVDC este atractiv pentru transportul de mare putere (5.000 - 8.000 MW) la peste 1.000-1.500 km și 1.100 kV pentru capacități de transmisie de până la 10 GW și la distanțe care ajung chiar și la peste 3.000 km. Proiectele de sisteme UHVDC de 800 kV deja există.

#### *Stații de conversie HVDC*

Electricitatea este transformată din curent alternativ (c.a.) în curent continuu (c.c.) și invers într-o stație de conversie. Acest lucru se realizează prin intermediul unor elemente electronice semiconductoare de înaltă tensiune și putere.

Semiconductorul este un dispozitiv care poate transporta curentul într-o singură direcție și care împiedică curentul să treacă în direcția opusă. Această caracteristică este esențială pentru conversiile de acest tip c.a./c.c. Semiconductoarele sunt operate de un sistem computerizat de control care permite controlul precis al puterii transmise, o caracteristică unică pentru sistemele HVDC. În transmisiile c.a., puterea nu poate fi controlată direct, ci depinde de factori externi.

#### *Sisteme HVDC modulare (VSC)*

HVDC modulare bazate pe tehnologia VSC (Voltage-Source Converter), sunt concepute pentru a transmite puterea electrică pe distanțe mari. Oferă numeroase beneficii ecologice, inclusiv linii electrice "invizibile (îngropate)", câmpuri electromagnetice mici, cabluri fără ulei și stații de conversie compacte.

HVDC modulare asigură creșterea fiabilității rețelelor de electroalimentare, iar tehnologia extinde permanent domeniul de putere HVDC. În gama superioară, tehnologia atinge acum puteri de transport de 3.000 MW și tensiuni de  $\pm 640$  kV – asigurând suficientă energie electrică pentru alimentarea a câteva milioane de gospodării și pentru transport la peste 2.000 de kilometri. Sistemul modular permite stațiile de conversie compacte, Figura 3.

Sistemul oferă o instalare rapidă și oferă o alternativă la sistemele convenționale de transmisie de curent alternativ în mai multe cazuri, cum ar fi:

- Conectarea câmpurilor de turbine eoliene la rețelele electrice;

- Conectări submarine și/sau subterane;
- Furnizarea de surse de alimentare pentru insule și platforme petroliere și gaze offshore;
- Conectarea rețelelor HVAC nesincronizate;
- 



Figura 3. Elemente de semiconductoare IGBT dispuse modular într-o stație de conversie actuală

## 1.2. LVDC – Microrețele de curent continuu

Conceptul de micrețele c.c. a atras interesul comunității științifice în ultimii ani. Cele mai interesante aspecte sunt integrarea surselor regenerabile de energie și a sistemelor de stocare a energiei la nivelul consumatorului individual, cu scopul de a spori calitatea, fiabilitatea și eficiența energetică. În plus, creșterea numărului aparatelor electrocasnice care utilizează energie de curent continuu a redeschis discuția despre sistemele de distribuție c.c. și c.a.. În consecință, s-au efectuat multe cercetări privind sistemele de distribuție c.c. și potențialul pentru aplicații rezidențiale. În acest subcapitol este redată o prezentare generală a sistemelor de distribuție LVDC utilizate în aplicațiile rezidențiale. Sunt prezentate mai multe studii care analizează potențialele economii de energie și avantajele generale ale sistemelor de distribuție LVDC precum și diferite arhitecturi de putere și topologii. De asemenea, sunt prezentate facilitățile demonstrative existente în care au fost implementate sistemele de distribuție LVDC.

În prezent, s-a reluat discuția cu privire la utilizarea sistemelor electrice de curent alternativ versus curent continuu. Această problemă revine după aprox 100 de ani de la „războiul” dintre Edison și Tesla/Westinghouse. Tehnologia disponibilă la acel moment a făcut ca opțiunea c.a. să fie mult mai avantajoasă, în consecință sistemele de energie electrică existente preponderent în întreaga lume sunt bazate pe c.a. Astăzi, simplitatea, reducerea costurilor și îmbunătățirea eficienței sistemelor de micrețele bazate pe c.c. repun în discuție utilizarea locală a acestui tip de alimentare cu energie electrică.

Sistemele de distribuție de c.c. au ajuns să concureze sistemele de c.a. Există mai mulți factori de influență care fac ca un sistem de c.a. sau de c.c. să fie avantajos, iar astăzi, acești factori înclină balanța spre utilizarea, în viitor, a unui sistem de distribuție LVDC. Sistemele de c.c. cresc eficiența



sistemelor de distribuție a energiei și facilitează integrarea surselor regenerabile de energie cu scopul de a reduce dependența de combustibilii fosili.

Există mai mulți factori care favorizează utilizarea sistemelor de curent continuu în locul sistemelor de curent alternativ:

- Generatoare utilizând energie regenerabilă, cum ar fi panourile fotovoltaice (PV);
- Sistemele de stocare a energiei;
- Echipamentele alimentate în c.c. reprezintă în prezent 50% din consumul unei clădiri;
- Viitoarea integrare a vehiculului electric în sistemul de transport urban va crește consumul de energie de c.c. pentru încărcarea bateriilor în clădiri;

Sistemele de distribuție de c.c. sunt mai eficiente; interconectarea și distribuirea energiei între majoritatea elementelor dintr-o rețea electrică ce funcționează pe bază de c.c. (surse, sarcini, stocare) printr-un sistem de alimentare cu curent continuu evită utilizarea inutilă a convertoarelor c.a./c.c. care cresc pierderile de energie. Figura 4 prezintă o imagine mai clară a aspectelor menționate mai sus, care arată reducerea pierderilor prin conversie atunci când se trece de la un sistem de distribuție de c.a. la sistemele de distribuție în c.c. în aplicații rezidențiale.

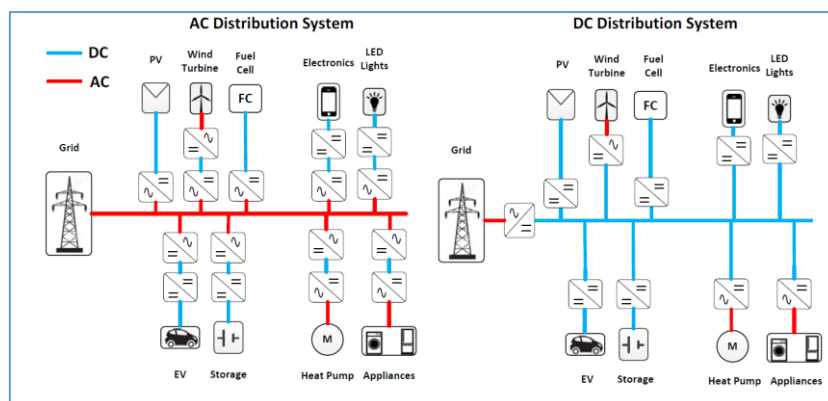


Figura 4 Comparatie între sistemele de distribuție de c.a. și c.c.

Avantajele sistemelor de distribuție LVDC au fost deja evidențiate, însă este necesară o discuție și o analiză mai profundă, pentru a vedea adevăratul potențial al acestei tehnologii. Mai multe studii au vizat îmbunătățirea eficienței și economisirea de energie a trecerii de la sistemele de curent alternativ la sistemele de curent continuu în aplicații rezidențiale.

În [1], [2], s-au studiat economiile de energie obținute prin utilizarea unui sistem de distribuție în c.c. în reședințe în Statele Unite. Studiul a fost efectuat pentru mai multe locații diferite în întreaga țară și pentru topologiile diferite ale sistemului. Au fost luate în considerare topologiile de distribuție cu și fără sisteme de stocare a energiei. Rezultatele au arătat că utilizarea c.c. ar putea conduce la o îmbunătățire a eficienței energetice, mai ales atunci când este instalat un sistem de stocare a energiei. Estimarea economiilor de energie este de 5% în cazul unui sistem fără stocare de energie și de 14% în cazul utilizării sistemului cu stocare de energie. Diferența este o consecință a profilului de consum al sarcinilor rezidențiale, cu maxime după-amiază și seara, în timp ce producția de energie regenerabilă dată de



panourile fotovoltaice crește la amiază. Prin urmare, cu un sistem de stocare a energiei, puterea în exces generată de panourile fotovoltaice în orele de maxim poate fi stocată și utilizată ulterior, evitând pierderile prin conversie c.c.-c.a.-c.c. prin conectarea acestora cu ajutorul unui convertizor la rețeaua electrică de c.a.. Există studii mai optimiste care demonstrează realizarea de economii de energie de 25-30% [3], [4]. Cu toate acestea, trebuie avute în vedere încărcările de climatizare (răcire și încălzire). De asemenea, pentru a obține o comparație corectă între diferitele sisteme de distribuție c.a./c.c., sarcini comparabile trebuie să fie utilizate pentru ambele sisteme. Sistemul de distribuție LVDC trebuie să răspundă provocărilor importante înainte de a fi implementat în sistemele rezidențiale. Principalele provocări și bariere pot fi rezumate după cum urmează:

- Lipsa standardelor și a reglementarilor în domeniu este probabil principala problemă care trebuie rezolvată. Mai multe organizații, cum ar fi Emerge Alliance (EA), the European Telecommunications Standards Institut (ETSI), the International Electrotechnical Commission (IEC), IEEE și alții, dezvoltă deja în mod activ reglementările și standardele necesare;
- Probleme de siguranță în utilizare și protecție derivate din utilizarea DC. Sunt necesare noi dispozitive și sisteme de protecție de c.c. pentru a asigura siguranța oamenilor [5];
- Atunci când se analizează sistemele de curent continuu în aplicații rezidențiale, este ușor de observat că există produse electrocasnice destinate utilizării cu tensiune DC. Multe aparate sunt alimentate defapt cu energie electrică de curent continuu prin intermediul unei surse, compusă dintr-un transformator coborât și un redresor, alimentată de la rețeaua electrică de curent alternativ [6], [7]. Eliminarea acestor surse ar permite aparatului să se alimenteze de la o rețea de curent continuu.

Lipsa standardizării este evidentă atunci când se observă nivelurile de tensiune utilizate pentru sistemele de distribuție LVDC. Așa cum am menționat mai sus, majoritatea configurațiilor folosesc nivelele de tensiune ale centrelor de date (adică 380 - 400 V c.c.). Consumul de energie al unei case rezidențiale este mult mai mic decât consumul unui centru de date, așadar ar putea fi utilizate tensiuni de c.c. mai scăzute, fără a crește semnificativ pierderile de distribuție, sporind în același timp siguranța în sistem. De exemplu, distribuția energiei electrice de până la câteva sute de wați poate fi efectuată eficient folosind 48 V c.c. [8], care ar acoperi toate echipamentele informatice, electronice și de divertisment.

A fost efectuată o analiză a influenței nivelului de tensiune asupra eficienței [9]. Studiul arată că utilizarea unei tensiuni de 380 V c.c. ca nivel de tensiune pentru alimentarea cu energie a echipamentelor de mare putere (plite și cuptoare electrice, mașini de spălat și aparate de aer condiționat) aduce doar o îmbunătățire de 0,3% a eficienței, comparativ cu 120 V c.c., aceasta este considerată încă o tensiune foarte joasă, prin urmare, prejudiciul cauzat de un șoc electric este redus. Diferite studii concluzionează de asemenea că, pentru aplicații rezidențiale, sistemele 48-120 V c.c. distribuie eficient energia [10]. În plus, standardul Emerge Alliance 24 VDC Occuped Space este destinat a fi utilizat pentru a furniza energie echipamentelor IT, prin urmare, energia necesară aparatelor cu putere mică poate fi distribuită în siguranță și eficient la tensiuni mai mici.

Anterior a fost subliniat faptul că există o lipsă de reglementare și standardizare a tehnologiei LVDC. Prin urmare, există mai multe configurații și niveluri de tensiune care pot fi utilizate. Deoarece sistemele de distribuție DC au fost implementate pe scară largă în industria de telecomunicații, nivelurile de tensiune utilizate pentru aplicații rezidențiale pare să se convertească la standardele utilizate în centrele de date (380-400 V c.c.). Cu toate acestea, este încă departe de a fi standardizat, iar câteva topologii ale sistemului de distribuție LVDC sunt luate în calcul.

#### A. Sisteme unipolare de distribuție LVDC

Această configurație a fost concepută pentru sisteme cu putere redusă. S-a realizat o analiză a implementării unui sistem de 48 V c.c. pentru integrarea panourilor fotovoltaice și a sarcinilor de c.c. de înaltă eficiență în clădiri cu mai multe etaje [11]. Studiul a arătat că sistemul de c.c. este mai eficient și aduce economii de costuri pentru utilizatori, prin reducerea facturilor la electricitate și a costului de întreținere a sistemului. În [12], este prezentată implementarea conceptuală a sistemului cu panouri fotovoltaice de mică putere. Sistemul este conceput pentru a acoperi nevoile minime ale unei gospodării cu venituri mici. Chiar dacă acest sistem nu poate acoperi necesarul de energie al unei gospodării în țările bine dezvoltate, studiul arată că, atunci când urmăresc să minimizeze costul sistemului, sistemele de distribuție LVDC nu au concurent.

#### B. Sisteme de distribuție tip bipolar

Conceptul de utilizare a unui sistem de distribuție de tip bipolar aduce unele avantaje față de cel de tip unipolar. Conceptul de sistem de distribuție bipolar este prezentat în Figura 5. Distribuția în sistem este realizată printr-o linie cu 3 fire, cu tensiune pozitivă, tensiune negativă și 0V. Se poate aprecia cu ușurință că acest concept reduce nivelul de tensiune față 0V, ceea ce face ca sistemul de distribuție să fie mai sigur pentru utilizatori. De asemenea, acest concept permite convertizorului din partea de sarcină să aleagă între trei niveluri diferite de tensiune,  $+V$  c.c.,  $\pm V$  c.c. și  $2 \cdot V$  c.c., în plus, sistemul sporește fiabilitatea sursei de alimentare, deoarece, în cazul unei defecțiuni la una dintre linii, energia poate fi furnizată utilizând celelalte două linii [13].

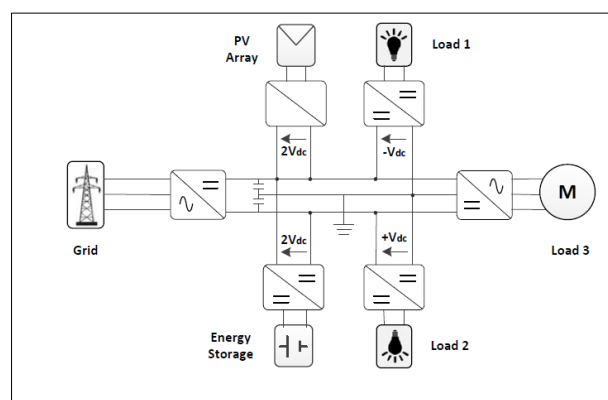


Figura 5 Sstem de distribuție bipolar.

C. Sisteme de distribuție cu tensiune variabilă pe bus-ul de c.c.

Conceptul de sistem de distribuție a magistralei de c.c. utilizând tensiune variabilă vizează maximizarea eficienței energetice prin eliminarea convertorului generatorului de energie regenerabilă. Robert Bosch LLC a implementat acest concept într-o microrețea de c.c. demonstrativă din Charlotte, Carolina de Nord, SUA. Sistemul este prezentat în Fig. 1.8. Acest concept permite alimentarea energiei cu o singură treaptă de conversie între matricea de panouri fotovoltaice și sarcină, ceea ce minimizează pierderile prin conversia c.a.-c.c.-c.a. Convertorul c.a./c.c. realizează reglajul de tensiune al bus-ului de c.c. în conformitate cu un algoritm de urmărire a punctului de putere maximă (MPPT) pentru generatorul fotovoltaic. Analiza a arătat că sistemul poate îmbunătăți utilizarea energiei fotovoltaice cu până la 8%.

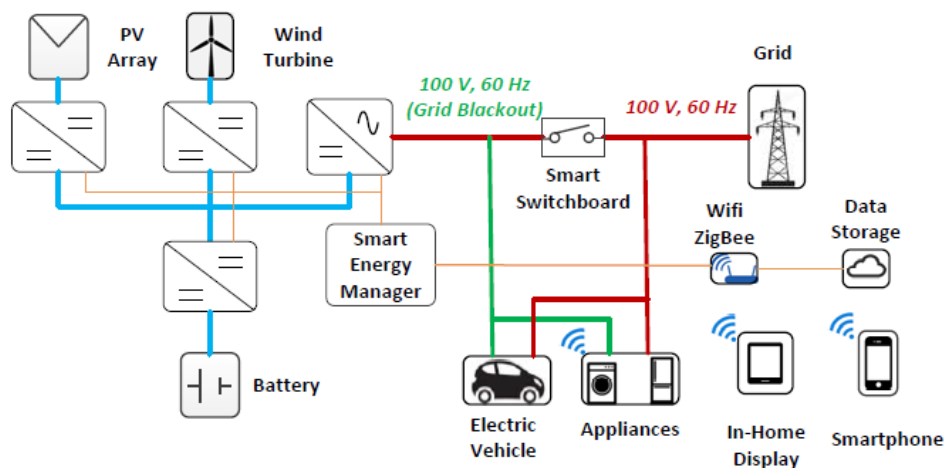


Figura 6 Microrețea de c.c. demonstrativă implementată în Charlotte , Carolina de Nord.

*Microrețea de cartier utilizând surse regenerabile de energie ca back-up la rețeaua electrică locală*

Un sistem de distribuție locală LVDC utilizează convertizoare electronice de putere c.c./c.a. pentru electroalimentarea unei comunități locale și o linie c.c.-c.c. pentru alimentarea convertizoarelor. Topologiile utilizate de către sistemul de distribuție LVDC pot fi diferite. Ideea comună pentru aceste topologii diferite este următoarea: conversia c.a./c.c. este întotdeauna localizată în apropierea nodului de înaltă tensiune de c.a. Conversia c.c./c.a. poate fi localizată în locații diferite. În funcție de locație, sistemul LVDC poate utiliza fie o soluție conexiune de tip HVDC, fie o zonă largă de utilizatori LVDC și conversia de c.c./c.a. se face la clientul final. Distribuția în cazul utilizării LVDC poate fi comparată cu topologia rețelei LVAC existente, cu mai multe ramuri alimentate de la rețeaua principală. În acest caz, nu este nevoie de o rețea de c.a. trifazată paralelă, deoarece liniile de c.a. au

fost înlocuite cu linii de c.c.. Un exemplu de implementare de bază a unui sistem de distribuție LVDC este prezentat în Figura 7.

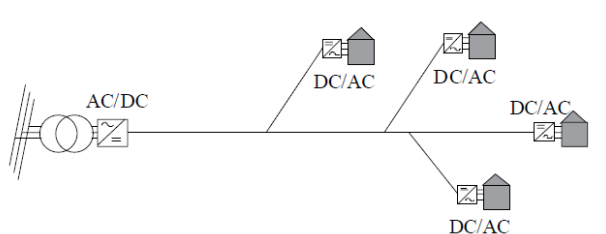


Figura 7 Exemplu de sistem de distribuție LVDC.

O soluție de tip linie HVDC care interconectează două rețele separate de c.a.. În acest tip de soluție clienții sunt conectați la o rețea comună trifazată LVAC. Rețeaua de curent continuu trebuie conectată la rețeaua de c.a. client prin intermediul unui transformator pentru a asigura compatibilitatea cu sistemul de c.a. existent. Un exemplu de sistem de distribuție LVAC este prezentat

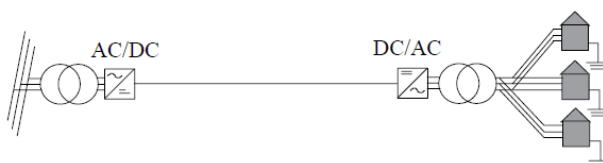


Figura 8 Exemplu de sistem de distribuție LVAC.

### Protecția electrică

Sistemul de distribuție LVDC diferă de un sistem tradițional de distribuție trifazat în multe moduri. Comparativ cu sistemul tradițional, sistemul de distribuție LVDC este un sistem complex și are o probabilitate mai mare la apariția unor defecte. Ca provocare a noului concept, sistemul de distribuție de c.c. trebuie să respecte reglementările de siguranță electrică definite în standardizarea LV.

#### A. Împământarea rețelei LVDC

La rețelele de distribuție locale, standardizarea LV existentă definește limita maximă a tensiunii de contact ca fiind de 120 V c.c. în sistemele de curent continuu. Tensiunea de contact care apare la punctul de defect este întotdeauna doar o parte a tensiunii de împământare. De aceea, limita de tensiune a împământării este definită ca fiind de două ori tensiunea de contact. Limita de tensiune a împământării este astfel de 240 V c.c.

Rezultatele cercetărilor arată că sistemul de împământare poate introduce tensiuni mari de împământare și de contact peste limitele admise deja la valori mici de rezistență la pământ într-un

sistem de 750 V c.c. [3]. Un exemplu de rețea utilizată în analiza defecțiunilor la împământare este prezentat în Figura 9.

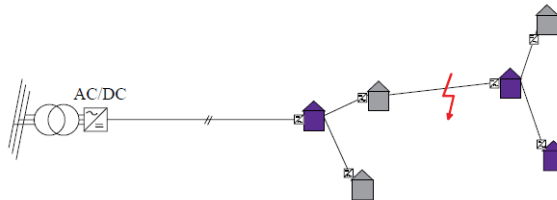


Figura 9 Exemplu de rețea utilizată în analiza defecțiunilor la împământare.

Tensiunea de împământare în funcție de rezistența la împământare în timpul defectării împământării în sistemul TN este prezentată în cadrul Figura 10 Tensiunea de împământare permisă (240 V c.c.) este de asemenea redată în figură.

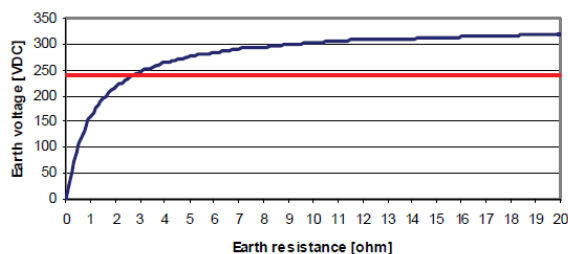


Figura 10 Graficul tensiunii de împământare.

Standardizarea LV necesită monitorizarea izolației rețelei utilizată în sistemele neîmpământate pentru a indica defecțiunea primară. În sistemul primar de protecție la defect nu este necesar să declanșeze, dar trebuie să indice alarma. Cu toate acestea, declanșarea în sistemul primar de alarmare este de dorit deoarece, ocazional, pot apărea situații de dublu defect.

#### B. Împământarea rețelei LVDC pentru clienții finali

Tensiunea de rețea LVDC a clientului este produsă direct cu ajutorul inverterului. Din motive de eficiență energetică, nu este de dorit să existe transformator de separare LV montat la client. Din acest motiv, rețeaua de clienți nu este izolată galvanic de rețeaua de c.c. Din cauza existenței conexiunii galvanice cu rețeaua clientului, rețeaua de împământare trebuie să fie de tip IT. De asemenea, rețeaua clientilor trebuie să fie echipată cu dispozitive de monitorizare a defecțiunilor de împământare.

#### C. Dispozitive electronice de putere

Principala diferență a rețelelor LVDC este că dispozitivele electronice de putere sunt utilizate în rețea, ceea ce introduce noi provocări în comparație cu sistemul tradițional de distribuție de c.a. Dispozitivele introduc defecțiuni ale comutatoarelor (semiconductoarelor) care pot produce, de exemplu, goluri de tensiune sau pot introduce tensiune alternativă în rețeaua de c.c. și tensiuni de c.c. în rețeaua de c.a. a clienților. Protecția principală împotriva defecțiunilor comutatoarelor constă în introducerea auto-diaagnosticării și a elementelor de protecție/decuplare automată în cazul apariției

defectului. O protecție suplimentară poate fi utilizarea de siguranțe automate și protectori de supratensiune.

Ca metodă de protecție suplimentară utilizată în paralel cu monitorizarea izolației în sistemele informatice poate fi utilizarea de dispozitive cu protecție la apariția unui curent rezidual de 30 mA. Pentru o protecție suplimentară împotriva incendiilor pot fi utilizate dispozitive cu protecție la apariția unui curent rezidual de 300 mA în fața rețelei client. Tipul de dispozitiv cu protecție la apariția unui curent rezidual trebuie să fie selectat pentru a se potrivi cu convertizoarele electronice de putere. Prin urmare, tipul obișnuit de dispozitiv cu protecție la apariția unui curent rezidual poate cauza declanșarea protecției fără a exista o defecțiune.

## 2. Standarde europene aplicabile surselor de alimentare pentru operarea în curent continuu

Aceste standarde sunt utilizate de către European telecommunication Standards Institute ETSI ([www.etsi.org](http://www.etsi.org)) pentru coordonarea echipamentelor care echipează stațiile TELEKOM.

### 2.1. Normative de referință

Următoarele documente normative sunt necesare pentru aplicarea prezentului document:

**IEC/EN 60947-2:** "*Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers*".

SR EN 60947-2:2007 Versiunea în limba română: Aparataj de joasă tensiune. Partea 2: Întreruptoare automate

Acest standard se aplică întreruptoarelor automate ale căror contacte principale sunt destinate a fi racordate în circuite a căror tensiune nominală nu depășește 1000 V în curent alternativ sau 1500 V în curent continuu; acesta conține, de asemenea, prescripții suplimentare pentru întreruptoarele automate cu fuzibile încorporate [14].

SR EN 60947-3:2009

Aparataj de joasă tensiune. Partea 3: Întreruptoare, separatoare, întreruptoare-separatoare și unități combinate cu siguranțe fuzibile [14].

Acest standard se aplică următorului aparataj: întreruptoare, separatoare, întreruptoare-separatoare și unități combinate cu siguranțe fuzibile destinate a fi introduse în circuite de distribuție și circuite ale motoarelor a căror tensiune nominală este mai mică sau egală cu 1000 V în curent alternativ sau 1500 V în curent continuu.

IEC 60947-2, standardizează MCB folosite în industrie. Ele protejează distribuția electrică de putere care are tensiuni de până la 1000 volți c.a. și 1500 volți c.c. pentru tot spectrul de curenți nominali de la 0,5 la 6300A. Sunt trei tipuri de întreruptoare în această clasă:

- Întreruptoare cu stingere în aer (air circuit breakers -ACBs),
- Întreruptoare cu carcasă moale (molded case circuit breakers -MCCBs)
- Întreruptoare miniatură (miniature circuit breakers -MCBs).

Standard alternativ pentru întreruptoare automate este și IEC 60898-1, care se referă la întreruptoarele din rețelele de curent alternativ de joasă tensiune MCBs – pe care le găsim în tablourile electrice din case, școli, magazine sau birouri.

În Tabel 1 sunt sintetizate diferențele dintre prevederile celor două standarde aplicabile pentru întreruptoarele miniatură de joasă tensiune:

Tabel 1 Comparație între caracteristicile întreruptoarelor miniatură (MCB) reglementate IEC.

MCB caracteristici	IEC 60898-1	IEC60947-2
Reglementare pentru:	Domeniul rezidențial	Domeniul industrial
Curent nominal $I_n$	6-125 A	0.5-160A
Curent maxim $I_{cn}$	25 kA	30kA
Tensiune nominală, $U_e$	400V	440V, 500V, 690V
Tensiune de test, $U_{imp}$	4kV	6kV sau 8kV
Grad de protecție	2	3
Curbe de declanșare	B, C, D	B, C, D, K, Z, MA
Funcționare în regim de	Curent alternativ	Curent alternativ sau curent continuu
Temperatura ambiantă maxim	30°C	50°C
Auxiliare electrice	Nu	Monitorizare și control

O altă diferență apare la curbele de declanșare. Dacă standardul IEC 60898-1 descrie clar curbele B, C și D ca fiind dependente de curentul nominal, în standardul IEC 60947-2, declanșarea instantanee poate fi ajustabilă după nevoia utilizatorului, sau pre-definită de producător, cu o precizie de 20%. De aceea mulți producători au adăugat curbele K, Z și MA.

**IEC/EN 60269-1:** "Low-voltage fuses - Part 1: General requirements".

SR EN 60269-1:2008

Siguranțe fuzibile de joasă tensiune. Partea 1: Prescripții generale.



Această parte a SR EN 60269 se aplică siguranțelor fuzibile cu elemente de înlocuire limitatoare de curent cu fuziune închisă și cu o capacitate de rupere egală sau mai mare de 6 kA, destinate să asigure protecția circuitelor de curent alternativ de frecvență industrială a căror tensiune nominală nu depășește 1000 V, sau a circuitelor de curent continuu a căror tensiune nominală nu depășește 1500 V.

SR EN 60269-1:2008/A1:2010

Siguranțe fuzibile de joasă tensiune. Partea 1: Prescripții generale Acest amendament modifică și suplimentează articole din standardul SR EN 60269-1:2008. S-au modificat articolele 6, 7, 8 și s-a adăugat anexa E.

SR EN 60269-1:2008/A2:2015

Siguranțe fuzibile de joasă tensiune. Partea 1: Prescripții generale Acest amendament completează și modifică paragrafele 1.2, 5.2, 5.3, 5.6, 5.7, 8.3, 8.4, B.1 și E.2 din SR EN 60269-1:2008.

**IEC/EN 61000-4-5:** "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test".

SR EN 61000-4-5:2015 ver.eng.

Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 4-5: Tehnici de încercare și măsurare. Încercări de imunitate la unde de șoc.

SR EN 61000-4-5:2015/A1:2018 ver.eng.

Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 4-5: Tehnici de încercare și măsurare. Încercări de imunitate la unde de șoc.

**IEC/EN 61000-4-29:** "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-29: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations on d.c. input power port immunity tests".

SR EN 61000-4-29:2002

Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 4-29: Tehnici de încercare și măsurare. Încercări de imunitate la scăderi de tensiune, întreruperi de scurtă durată și fluctuații de tensiune la porturi de alimentare în curent continuu.

Acest standard definește metode de încercare pentru imunitatea la scăderi de tensiune, întreruperi de scurtă durată și variații de tensiune la porturile de intrare a alimentării în c.c. a echipamentelor electrice sau electronice.

## 2.2. Valori standardizate

Valorile tensiunilor asociate cu tensiunea de alimentare de 400Vcc, având în vedere standardele de mai sus, sunt:

### 2.2.1. Tensiunea nominală

Tensiunea nominală la bornele de alimentare ale interfeței de putere trebuie să aibă valorile de:

- tensiune minimum: 260 Vdc;
- tensiune maximum: 400 Vdc.

NOTA 1: Tensiunea la ieșirea sursei de alimentare trebuie să țină cont de căderea de tensiune pe cablurile de alimentare, la curentul maxim admisibil și la tensiunea maximă de încărcare a bateriei, pentru a se menține între limitele definite mai sus.

### 2.2.2. Tensiunea de test de referință

$$U_T = 365V_{cc} \pm 15V_{cc}$$

### 2.2.3. Tensiunea anormală

Definim supratensiunea la  $400V_{cc} < U < 410V_{cc}$

Definim “subtensiunea” la  $0 < U < 260V_{cc}$ .

La revenirea alimentării din zona anormală în zona normală, aparatele trebuie să:

nu sufere nici o deteriorare;

să-și reia funcționarea conform specificațiilor (nici un dispozitiv de protecție ne-resetabil sa nu fi fost acționat).

### 2.2.4. Condiții anormale

Definim condițiile și modul de testare, utilizând standardul SR EN 61000-4-29 [15]; Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 4-29: Tehnici de încercare și măsurare. Încercări de imunitate la scăderi de tensiune, întreruperi de scurtă durată și fluctuații de tensiune la porturi de alimentare în curent continuu:

- Variații de tensiune;
- Căderi de tensiune;
- Întreruperi de tensiune;
- Vârfuri de tensiune.

Testele se vor efectua pe modele individuale.

Tabel 2 Variații de tensiune.

Tensiune	Durată	Criteriu pentru acceptare	Comentarii
$U_t > 260 > U_t$	1 min	Funcționare normală	Testarea tensiunii minime de funcționare
$U_t > 400 > U_t$	1 min	Funcționare normală	Testarea tensiunii maxime de funcționare
$U_t > 410 > U_t$	1 s	Degradare temporală a funcționării sau degradarea performanțelor, revenire automată la performanță normală după test	Test de creștere a tensiunii intrând în gama de tensiuni anormale
$U_t > 420 > U_t$	10 ms	Degradare temporală a funcționării sau degradarea performanțelor, revenire automată la performanță normală după test	Test de creștere a tensiunii ieșind din gama de tensiuni anormale

Tabel 3 Căderi de tensiune

Tensiune	Durată	Criteriu pentru acceptare	Comentarii
$U_t > 260 > U_t$	10 ms	Funcționare normală	Testarea tensiunii minime de funcționare

Tabel 4 Scurte întreruperi de tensiune

Tensiune	Rețea alimentare	Durată	Criteriu pentru acceptare	Comentarii
$U_t > 0V > U_t$	Impedanță scăzută (scurtcircuit)	10 ms	Funcționare normală	Testarea timpului de menținere în timpul ștergerii defectului de scurtcircuit în sistem
$U_t > 0V > U_t$	Impedanță mare (circuit deschis)	1 s	Degradare temporală a funcționării sau degradarea performanțelor, revenire automată la performanță normală după test	Testarea revenirii automate după o întrerupere mare

### 2.3. Exemplu de dimensionare

Pentru dimensionarea unei protecții la scurtcircuit și/sau suprasarcină în rețeaua LVDC a unei locuințe inteligente, prevăzută cu un nivel de tensiune de 372Vcc, care variază între un maxim de 410Vcc și un minim de 260Vcc, trebuie să alegem o protecție pentru un circuit de maxim 4 kW.

Pentru tensiunea minimă, din gama de curenți 6A-10A-**16A**-25A-32A-40A-50A alegem o monopolară cu  $I_r = 16A$ , cu doi poli (separă și polul pozitiv și polul negativ, pentru a crește capacitatea de operare în tensiune continuă de la 250Vcc la 500Vcc, vezi figura următoare).



Figura 11. Întreruptor monopolar pentru rețea de curent continuu © Schrack.

Datele tehnice ale monopolarăi C16/2 –DC [16] sunt:

- Standard: IEC/EN **60947-2**, EN 60 898 (caracteristica timp-curent)
- Număr de poli: 2
- Tensiune nominală  $U_n$ : **500V-DC (2 poli)** și doar 250V-DC (1 pol),
- Curent nominal  $I_n$ : 2A, 3A, 4A, 6A, 10A, 13A, **16A**, 20 A, 25A, 32 A, 40A, 50A
- Tensiune de izolare nominal  $U_i$ : 500 Vdc
- Tensiune de impuls de menținere  $U_{imp}$ : 4000 V (1,2 / 50)  $\mu$ sec
- Curent de ne-declanșare conventional:  $I_{nt} = 1,13 I_n$
- Curent de declanșare:  $I_t = 1,45 I_n$
- Temperatura de referință: 30°C
- Factor de temperatură: 0,5% / K
- Curent de declanșare instantanee  $I_{mt}$ : tip C,  $7 I_n < I_{mt} \leq 15 I_n$ :  $t(I_{mt}) < 0,1$  sec
- Capacitate de rupere la suprasarcină  $I_{cs}$ : 7,5 kA (tip C)
- Capacitate de rupere la scurtcircuit  $I_{cn}$ : 10 kA (tip C)

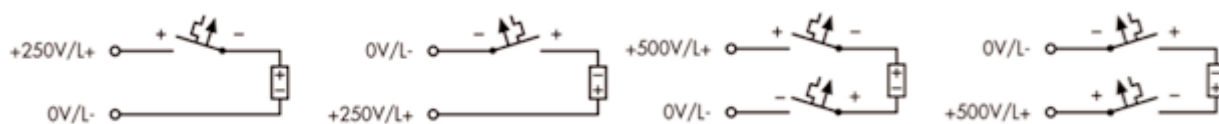


Figura 12. Conectarea unui monopolar de 400V pentru protecția unui circuit alimentat de la LVDC © Schrack.

Caracteristica de declanșare ale întreruptoarelor monopolare este prezentată în Figura 13.

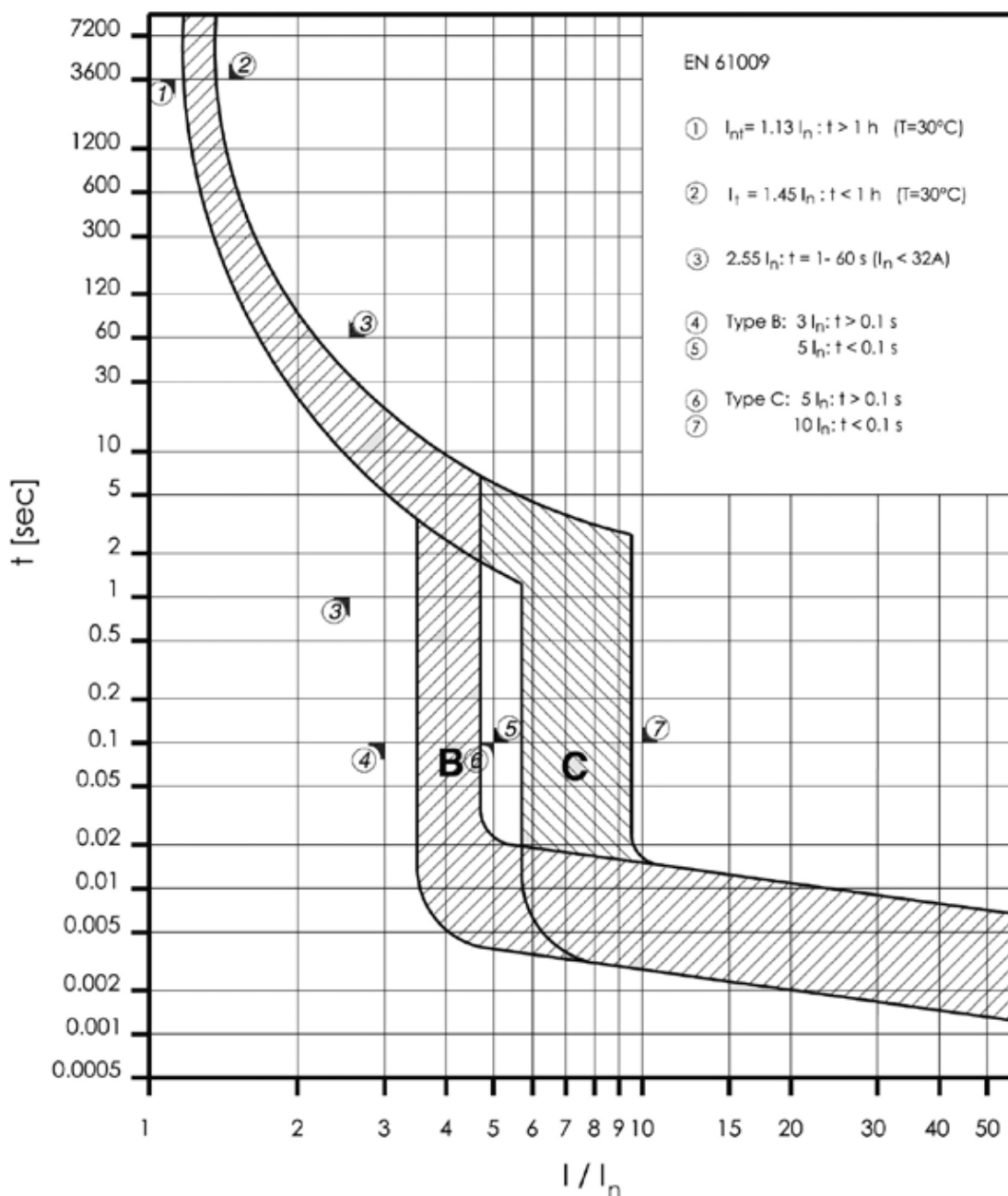


Figura 13. Caracteristicile de declanșare ale monopolelor de uz general.

Se recomandă folosirea monopolelor care au caracteristica de declanșare după curba B pentru protejarea circuitelor cu comportament rezistiv (alimentare boilere), iar pentru restul circuitelor trebuie folosite monopole “de tip C” [16].

Pentru protecția rețelelor de curent alternativ cu declanșare la curenți reziduali se recomandă folosirea unor întreruptoare bipolare de curent alternativ cu declanșare la curenți reziduali [16] (prescurtat RCD), sensibile la curent alternativ sau curent pulsatoriu. Aceste întreruptoare protejează în cazul în care apar puneri la masă în circuitul alimentat care presupun depășirea unui prag de 30mA,

de 100mA sau de 300mA, iar curbele de declanșare le clasifică în tip A, tip AC și tip B, în funcție de sensibilitatea la declanșare. Declanșarea la 300 mA este cerută doar pentru protecția împotriva incendiilor, când electrocutarea persoanelor este exclusă, de pildă la protecția circuitelor de iluminare amplasate pe tavan.

Standard IEC/EN 61008-1 și IEC / EN 62423

Număr de poli: 2 sau 4

Curent nominal  $I_n$  25A, 40A, 63A

Senzitivitate  $I_{\Delta n}$  0,03A, 0,1A, 0,3A

Tensiune nominală  $U_e$  500Vac

Producătorii de circuite de protecție propun dispozitive care au integrate ambele tipuri de protecții, numite RCBO (de la Residual Circuit Breaker with Overload), care vor declanșa fie de la supracurent fie de la curent rezidual.

Este important de verificat cum funcționează circuitele de protecție la curenți diferențiali în cazul rețelelor de curent continuu. În cazul în care circuitul de declanșare nu este sensibil decât la curenți alternativi sau pulsatorii, poate fi folosit ca circuit de detecție și protecție o combinație de aparate care să conțină un aparat de tip monitor de izolație [23] (RCMS – Residual Current Monitor System) care să condiționeze contactorul principal de alimentare al circuitului de curent continuu.

### **3. Stabilirea cerințelor consumatorilor și a caracteristicilor preliminare ce urmează a fi impuse realizării și implementării microrețelei de tip cartier**

#### **3.1. Mijloace de adaptare a consumatorilor electrici la parametrii unei rețele de curent continuu**

Pentru a putea determina mijloacele de adaptare la o rețea de curent continuu, trebuie identificați consumatorii electrici ce urmează să fie utilizați și analizate posibilitățile de modificare a sursei de alimentare înglobate în aceștia. Este necesară așadar o clasificare a echipamentelor electrice care se regăsesc uzual într-o locuință. Principalele categorii de consumatori electrici pot fi definite astfel:

- *Echipamente de încălzire*, care utilizează exclusiv sarcină rezistivă (plite, cuptoare, calorifere, centrale termice) – pot fi alimentate cu ușurință în curent continuu dacă se asigură același nivel de tensiune și necesarul de curent ca în cazul alimentării la rețeaua standard monofazată de curent alternativ. Dacă tensiunea în rețeaua de c.c. este diferită față de parametrii necesari ai consumatorilor,

atunci se pot utiliza convertoare DC/DC pentru coborârea tensiunii (buck sau step-down converter) ori pentru ridicarea acesteia (boost sau step-up converter).

- *Echipamente ce utilizează motoare de curent alternativ* (în principal asincrone) care utilizează sarcină inductivă (frigider, pompe, aspirator, ventilatoare, etc) au nevoie de invertoare DC/AC care să refacă unda sinusoidală pură sau modificată pentru a putea acționa motoarele.

- *Echipamente cu sarcină multiplă (rezistivă, inductivă)* cum sunt mașinile de spălat, echipamente HVAC (aparate de aer condiționat, echipamente pentru climatizare/încălzire) pot funcționa tot prin intermediul unui inverter DC/AC care să le adapteze la parametrii necesari de funcționare. Acestea au și elemente ce pot fi alimentate direct în curent continuu însă intervenția pentru separarea căilor de c.c și c.a este dificilă și nu se justifică.

- *Echipamente de putere redusă* ce utilizează curent continuu în gama de tensiune 5V-48V. Acestea pot funcționa prin intermediul convertoarelor DC/DC step-down și se poate avea în vedere chiar o linie de alimentare separată cu tensiunea de 48-50V pentru o putere instalată redusă care ar putea alimenta: corpuri de iluminat cu leduri, laptop/desktop PC, echipamente de telecomunicații (router, telefon mobil), LED TV, monitoare, imprimante, etc.

Un convertor step-down cu intrare la 48V și ieșire la 5-9-12-20-24 funcționează cu un randament de conversie foarte bun și pentru că nu prelucrează puteri semnificative are un preț accesibil.

Deocamdată industria echipamentelor electrocasnice este axată în principal pe produse destinate alimentării în rețele de curent alternativ. Există din ce în ce mai multe echipamente care se alimentează strict în curent continuu și care utilizează surse de alimentare în comutație (switching-mode power supply, SMPS) pentru conversia curent alternativ și pentru adaptarea nivelului de tensiune. În cazul acestor aparate se poate interveni prin eliminarea părții de redresare și corecție a factorului de putere.

Deja majoritatea surselor în comutație au randamente foarte bune chiar și cu conversia c.a./c.c. astfel că impunerea schimbării tipului de alimentare al rețelei care să alimenteze locuințele trebuie justificată prin eficiența pe partea de producere și distribuție a energiei și mai puțin pe partea de alimentare a consumatorului final.

O sursă de alimentare în comutație este o sursă electronică de alimentare ce include un regulator de comutație pentru a converti energia electrică în mod eficient.

Aceasta utilizează un tranzistor sau un grup de tranzistori de trecere care comută în mod continuu între stările disipare-redușă, saturat (full-on) și blocat (full-off) cu scopul de a rămâne cât mai puțin timp în tranzițiile de disipare crescută, minimizând astfel energia irosită. În mod ideal, o sursă de alimentare în comutație nu disipă nicio putere. Reglarea tensiunii se realizează prin varierea raportului de timp între saturație și blocare. Această eficiență mai mare de conversie a curentului este un avantaj important al unei surse de alimentare în comutație. Sursele de alimentare în comutație pot fi, de asemenea, semnificativ mai mici și mai ușoare decât o sursă de alimentare liniară, datorită dimensiunii și greutateii mai mici a transformatorului. Reglatoarele de comutare sunt utilizate ca înlocuitori pentru reglatoarele liniare, atunci când este necesară o mai mare eficiență, dimensiune sau greutate mai mică. Ele sunt, totuși, mult mai complicate; curentul poate cauza probleme de



zgomot electric în timpul comutării, dacă acesta nu este suprimat, iar modelele simple pot avea un factor de putere redus. Elementele ideale de comutare (de exemplu, tranzistorii care operează în afara modului lor activ) nu au nicio rezistență atunci când sunt "închise" și nu transporta niciun curent, atunci când sunt "deschise" și astfel convertoarele pot funcționa, teoretic, cu o eficiență de 100% (de exemplu, tot curentul de intrare este livrat sarcinii; niciun curent nu este irosit sub formă de căldură disipată). Pentru exemplificare, se prezintă Figura 14 cu principiul de funcționare al unei surse în comutație.

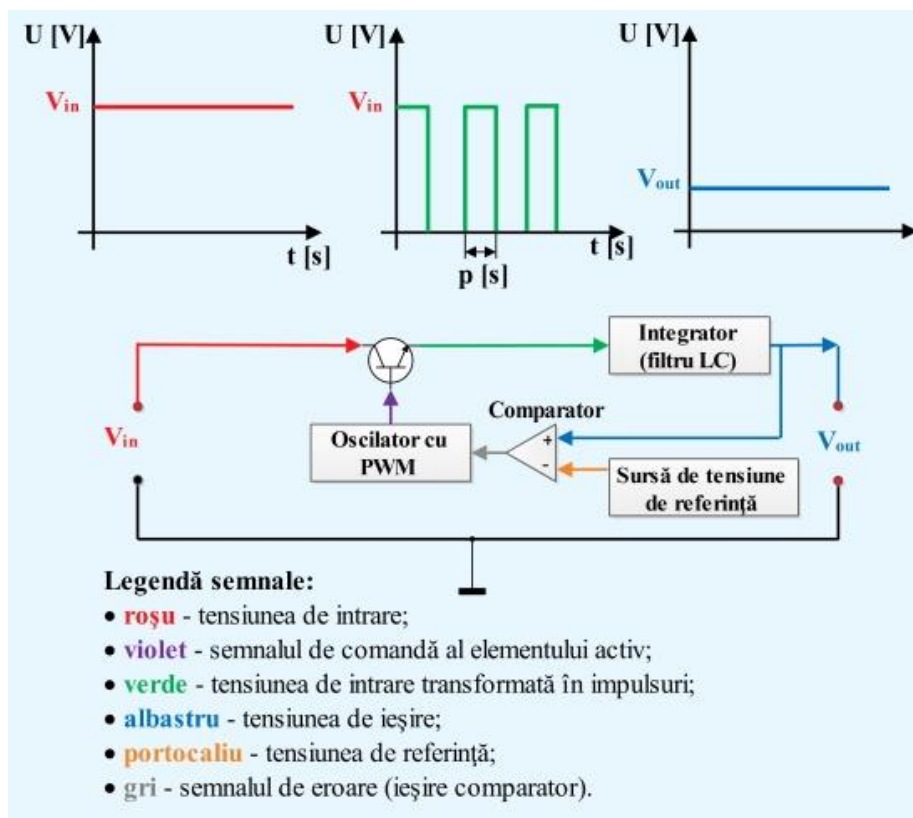


Figura 14. Principiul de funcționare al unei surse în comutație [17].

Se observă că un stabilizator în comutație este compus în general din următoarele blocuri funcționale:

- *Oscilator PWM* (pulse width modulation –factor de umplere variabil). Funcția acestuia este aceea de a crea semnalul de comandă pentru elementul activ (tranzistorul). Mențiunea “cu PWM”, indică faptul că este vorba de un oscilator capabil să creeze impulsuri de frecvență constantă dar cu durată variabilă. De regulă, frecvența de lucru a acestuia este între 20 și 150 kHz însă în unele aplicații mai speciale poate ajunge chiar și la 2MHz (2000kHz);

- *Tranzistor (de comutație)* - este un tranzistor de putere de tip bipolar sau MOS-FET, caracterizat în principal de o viteză foarte mare de comutație (trecere foarte rapidă între stările închis-deschis și invers) și de o rezistență foarte mică între borne (colector-emitor sau drenă-sursă). Rolul

lui este de acela de a transmite trecerea intermitentă a tensiunii de alimentare creând astfel la ieșirea lui un semnal format din impulsuri de tensiune. Utilizarea lui este necesară deoarece, oscilatorul nu poate manipula singur decât curenți de cel mult câțiva mA, în timp ce prin intermediul unui tranzistor de comutație, curentul vehiculat poate fi amplificat;

- *Sursa de tensiune de referință*. La fel ca și în cazul stabilizatoarelor liniare, sursa de tensiune de referință este folosită ca etalon în procesul de stabilizare. Cu alte cuvinte, valoarea tensiunii dată de sursa de tensiune de referință dictează în mod direct valoarea tensiunii de ieșire;

- *Comparatorul*. Este un circuit care compară tensiunea de ieșire cu tensiunea de referință oferind la ieșire un semnal de eroare.

- *Integrator* (filtru LC). Este un bloc care are rolul de a transforma impulsurile de tensiune în semnal de ieșire continuu. Este constituit din bobine (L) și condensatori (C) [17].

Ieșirea sursei în comutație este reglată folosind controlul factorului de umplere; tranzistoarele sunt comutate în stările complet închis sau deschis, astfel încât se limitează pierderile de rezistență între intrare și sarcină. Singura căldură generată rezultă din caracteristicile non-ideale ale componentelor utilizate și ale curenților reziduali în circuitele de comandă. Pierderile cauzate de comutarea în tranzistori (mai ales în partea scurtă a fiecărui ciclu atunci când dispozitivul este parțial activat), rezistența tranzistorilor de comutare, rezistența serie a inductorului și condensatoarelor și pierderile în fier în inductor și căderea de tensiune pe diodele redresoare determină o eficiență specifică de 60-70%.

Cu toate acestea, prin optimizarea designului SMPS (cum ar fi alegerea frecvenței optime de comutare, evitarea saturației inductoarelor și redresarea activă), pierderile de energie pot fi reduse la minimum, iar o configurație optimă de sursă în comutație poate avea o eficiență de 95%.

Eficiența convertoarelor DC/DC este comparabilă cu cea a surselor în comutație pentru că principiul de funcționare este asemănător după partea de redresare și corecție a factorului de putere. Majoritatea surselor în comutație fabricate în prezent conțin și circuite de compensare a factorului de putere pentru diminuarea pierderilor și perturbațiilor în rețea pentru conformitatea cu reglementările internaționale.

Un factor de putere egal cu 1 este obiectivul oricărei companii producătoare de energie electrică, deoarece în cazul în care factorul de putere este mai mic ca 1, trebuie să furnizeze mai mult curent utilizatorului pentru o anumită putere solicitată. În acest sens, producătorul suportă mai multe pierderi de linie. Pentru o instalație industrială, se percepe o penalizare în cazul în care factorul de putere este mult diferit de 1 (sub factorul de putere neutral). În principal, înfășurările din motoare acționează ca inductoare sesizate de rețeaua publică de distribuție. Se pot utiliza condensatoare care au efectul opus și sunt elemente compensatoare pentru înfășurările inductive din motoare.

Sursele în comutație (SMPS) nu sunt sarcini reactive ca motoarele electrice, dar reprezintă în schimb sarcini neliniare pentru rețeaua de alimentare. Sursele de alimentare fără corecția factorului de putere (PFC), absorb din rețeaua AC (cu tensiunea sinusoidală) pulsuri sau vârfuri mari de curent datorită unghiului mic de conducție în etajul de intrare ce realizează redresarea.

Dacă este lăsat necorectat, factorul de putere (PF) al unei surse cu comutare va fi, în general, în jurul valorii de 0,65 sau mai mic.

Factorul de putere poate fi corectat prin utilizarea de circuite PFC – Power Factor Correction. Aceste circuite netezesc pulsurile de curent, îmbunătățesc PF și reduc posibilitatea ca o siguranță de protecție a circuitului AC să acționeze prematur.

Există două tipuri de bază de PFC: pasive și active. Circuitele pasive PFC sunt mai ieftine și, de obicei pot corecta FP la aproximativ 0,85. Circuitele active PFC sunt cele mai utilizate, sunt prevăzute chiar în sursa de alimentare și pot crește PF peste 0,98. Un PF apropiat de 1 indică o bună performanță a sursei de alimentare.

Datorită creșterii uriașe a numărului de aparate ce includ surse de alimentare, ce se adaugă consumatorilor existenți, din anul 2001, Uniunea Europeană (UE) a stabilit limite pentru curenții armonici care pot apărea în rețeaua de alimentare (AC line) datorită surselor de alimentare cu comutare.

Reglementarea cea mai importantă este EN61000-3-2 referitoare la surse de alimentare cu putere de intrare peste 75W și care absorb din rețea curenți până la 16A. Sunt stabilite limite severe asupra curenților până la armonica a 39-a, măsurată la intrarea sursei de alimentare. De exemplu, prima armonică are frecvența de 50Hz în UE. Armonica a treia este de 150Hz, iar armonica 39 este de 1950Hz. Acești curenți armonici nedorți au o relație directă cu factorul de putere al sursei de alimentare. PFC reduce semnificativ armonicile de curent alternativ, lăsând în principal, “fundamentală”, frecvența curentă, care este în fază cu forma de undă de tensiune. Sursele de alimentare care îndeplinesc EN61000-3-2 au în mod normal un  $PF > 0.97$ .

Prin PFC crește capacitatea de alimentare cu putere, adică determină cantitatea de energie utilă pe care o sursă de alimentare SMPS o poate trage din linia de curent alternativ și apoi de a o livra la o sarcină. Formula care arată legătura este:  $P_{out} = V_{rms} \times I_{rms} \times PF \times \text{Eficiența}$ . Multe tehnici și topologii pot fi și au fost imaginate pentru PFC. La nivel redus de energie (chiar până la 200 W), au fost folosite diverse tehnici PFC pasiv pentru a mări unghiul de conducție a formei de undă pentru curent [18].

Putem afirma prin urmare, că dacă sursele în comutație dispun de corecția factorului de putere atunci randamentele de conversie pot fi comparate cu cele ale convertoarelor DC/DC. În lipsa circuitelor de corecție a factorului de putere, alimentarea direct în curent continuu contribuie la diminuarea pierderilor în lanțul de transformare a puterii.

Mai mult, dacă rețeaua de curent continuu considerată pentru alimentarea unei locuințe/gospodării are o tensiune nominală care coincide cu cea redresată în sursa în comutație a unui echipament, atunci acesta poate fi conectat direct la rețeaua de curent continuu fără nici o modificare suplimentară. Pentru exemplificare este prezentată schema din Figura 15. Se poate observa că puntea redresoare permite trecerea curentului continuu prin două diode, celelalte două

fiind blocate. Trebuie acordată atenție deosebită polarității pentru că inversarea acestora poate duce la distrugerea sursei de alimentare.

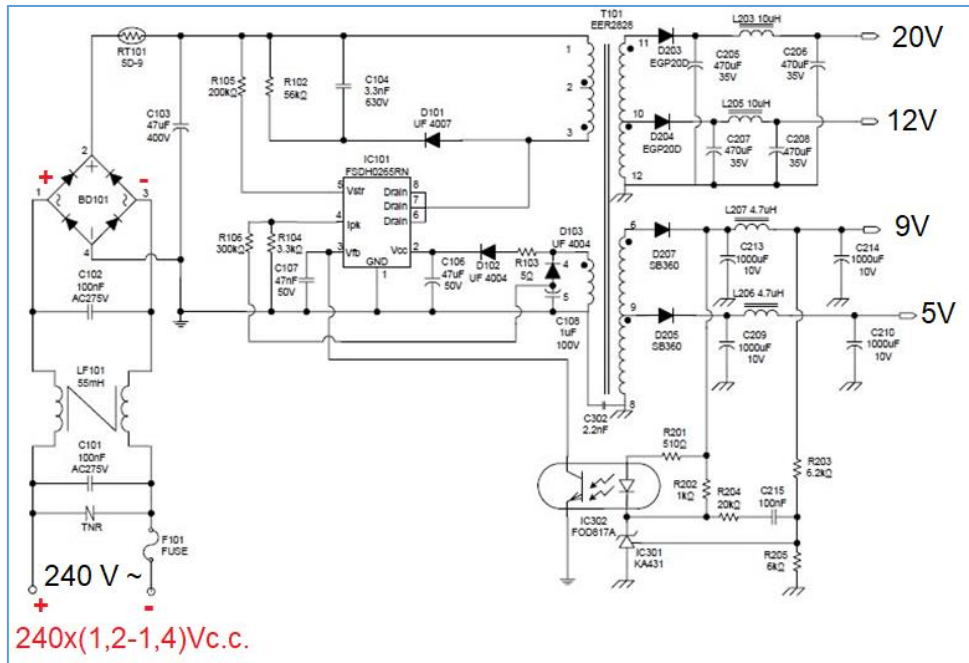


Figura 15. Schemă pentru sursă în comutație standard cu alimentare în c.a sau c.c.

Dezvoltarea recentă în domeniul acționărilor a permis utilizarea pe scară largă a tehnologiei *Inverter* pentru majoritatea electrocasnicelor mari care utilizează motoare cu puteri semnificative. Principalul scop al utilizării acestei tehnologii este creșterea eficienței energetice obținute prin variația turației motorului care poate funcționa și la sarcini parțiale. Tehnologia *Inverter* este cea mai recentă evoluție a tehnologiei privind motoarele electrice ale compresoarelor. Un inverter este utilizat pentru a controla viteza motorului compresorului, astfel încât să regleze continuu temperatura. Unitățile de inverter DC au o unitate de frecvență variabilă, care cuprinde un inverter electric reglabil pentru a controla viteza motorului electric respectiv a compresorului. Unitatea convertește curentul de intrare în curent alternativ la DC și apoi printr-o modulare într-un inverter electric produce curentul de frecvență dorită. Un microcontroller poate preleva fiecare temperatură a aerului ambiental și poate regla în mod corespunzător viteza compresorului. Instalațiile de climatizare cu invertoare au eficiența sporită în comparație cu aparatele de climatizare tradiționale, durată de viață extinsă a pieselor lor și nu introduc perturbații în rețea. Un exemplu de tehnologie *Inverter* implementată de Mitsubishi pentru frigidere este prezentat în Figura 16.

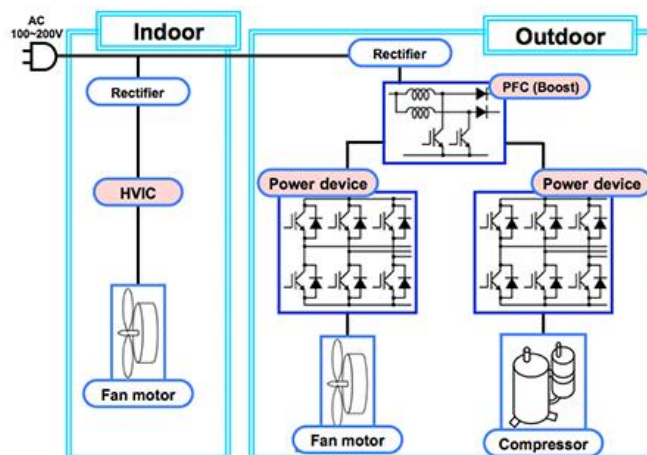


Figura 16. Frigider cu sistem *Inverter* realizat de Mitsubishi

Se poate observa din figura de mai sus că sistemul conține un modul de redresare a curentului alternativ în curent continuu folosit ulterior pentru reformarea unei sinusoidale cu frecvență variabilă necesară motoarelor compresorului și ventilatorului. Se poate astfel alimenta direct în curent continuu cu tensiune adecvată fără probleme suplimentare. Pentru echipamentele care pot fi alimentate în curent continuu dar cu nivele reduse ale tensiunii s-a arătat anterior că pot fi utilizate cu succes convertoarele DC/DC. Convertoarele DC/DC sunt surse de alimentare care convertesc puterea electrică având o tensiune DC nestabilizată la intrare, într-o tensiune DC stabilizată la ieșire, cu nivel mai mic (step-down), mai mare (step-up), egal (stable level) sau cu polaritate inversată (invert) față de tensiunea de intrare.

Convertoarele mai complexe se bazează pe microcontrolere pentru a asigura o eficiență înaltă, dimensiuni reduse, perturbații și pierderi prin disipare termică cât mai mici. Convertoarele DC/DC sunt folosite în general pentru: izolarea zgomotului electric, izolare galvanică, conversie de nivele de tensiune, asigurarea unui nivel de tensiune stabil pentru echipamente sensibile la fluctuații de tensiune, tensiuni la nivele diferite de ale bateriilor care alimentează echipamente portabile. Densitatea de putere, eficiența și fiabilitatea sunt caracteristicile de bază utilizate pentru a evalua raportul performanță/preț al unui convertor DC/DC. Convertoarele DC/DC sunt folosite pe scară largă în sursele de alimentare ale echipamentelor electronice fixe (alimentate primar de la rețeaua AC) sau portabile (alimentate din baterii) și în echipamente IT (unde sunt necesare tensiuni diferite pentru CPU, memorii RAM, unități de memorii și interfețe) [19].

Convertoarele DC/DC sunt practic surse în comutație cu următoarele avantaje:

- Eficiență mult mai mare decât sursele liniare (tipic 75-90%);
- Pierdere mică de energie prin transfer, componentele fiind astfel mai mici și necesitând un management termic simplu;
- Energia înmagazinată de o bobină într-un regulator de comutare poate fi transferată la ieșire cu o tensiune mai mare decât cea de intrare (boost), chiar negativă (invert) sau poate, prin intermediul unui transformator, să ofere izolare galvanică față de intrare (min.1000Vdc), ceea ce nu poate realiza o sursă liniară.



Principiul de bază al unui convertor DC/DC este comandarea unui element de comutație la înaltă frecvență (min.100kHz), controlând raportul on-time/ off-time ('duty ratio') într-o manieră variabilă pentru a menține tensiunea de ieșire la un anumit nivel. De obicei, tensiunea este controlată la un nivel constant prin intermediul feedback-ului negativ al tensiunii de ieșire. Unele sursele în comutație rezolvă și problema zgomotului electric generat prin comutație, având controale specializate înglobate în circuite integrate.

De menționat că aproximativ 80% din problemele legate de EMC – Electromagnetic compatibility = funcționare fără a interfera cu alte dispozitive – sunt datorate cablurilor de alimentare și cablurilor I/O care crează o "structură de antene" neintenționate ce pot radia energia electromagnetică generată de componente electronice din interiorul unui produs și pot primi energia electromagnetică din exteriorul produsului. EMC este legat de EMI – Electromagnetic interference = cantitatea de energie emanată, intenționat sau nu, de echipamente electronice care provoacă degradare de performanțe la echipamente din apropiere și EMS – Electromagnetic susceptibility = lipsa de imunitate la interferențe interne sau externe. Emisiile de perturbații radiate sau conduse (în rețeaua AC) neintenționate de către echipamente IT sunt reglementate de standardul EN 55022. Standardele EN 55024 și EN 61000-4-2, 3, 4, 5, 6, 8 reglementează imunitatea la: ESD – descărcări electrostatice, RF – emisii radio intenționate, la zgomote de comutare sau tranziții electrice, la fulgere, la câmpuri magnetice variabile cu 50-60Hz și la fluctuații de putere în rețeaua AC [19].

De asemenea, eficiența maximă în funcționarea surselor în comutație se obține când sarcina este bine dimensionată iar puterea absorbită a echipamentului alimentat este foarte apropiată de parametri nominali ai sursei ținând seama totuși de o anumită rezervă de putere. Spre exemplu, o sursă funcționează fără probleme cu o încărcare de doar 10% însă pierderile prin conversia energiei sunt mai mari față de o încărcare la 80-90%. Prin urmare, producătorii au dezvoltat surse în comutație pe o gamă foarte variată de produse cu diferite tensiuni de intrare/ieșire, cu eficiență între 70 și 96% și puteri de la câțiva wați până la câteva mii de wati. Pentru exemplificare, în Figura 17 se prezintă două surse în comutație cu specificații diferite produse de Mean Well.



	
<p>Sursă NID60S24-12, 60W, intrare 20...53Vdc, ieșire 12Vdc, 4A, non-izolat, eficiență 96%</p>	<p>Sursă PSD-45B-24, 45W, intrare 18...36Vdc, ieșire 24Vdc, 1.875A, izolație I/O 1500Vac, eficiență 85%</p>

Figura 17 Surse în comutație produse de Mean Well [20].

De asemenea, sunt disponibile și variante de surse cu o gamă largă de tensiuni de intrare și cu reglajul tensiunii de ieșire în funcție de consumator. Prin urmare, cu aceeași sursă se pot alimenta echipamente care funcționează la 5V, 9V, 12V, 20V, 24V, 48V. Tensiunea poate fi reglată înaintea cuplării, în cazul ieșirii unice pentru un singur consumator sau o singură sursă poate furniza aceste tensiuni diferite simultan prin terminale dedicate.



Figura 18. Surse în comutație cu reglajul tensiunii la ieșire

O soluție pentru integrarea acestor convertoare DC/DC în vederea alimentării unor echipamente de birou este prezentată în Figura 19.

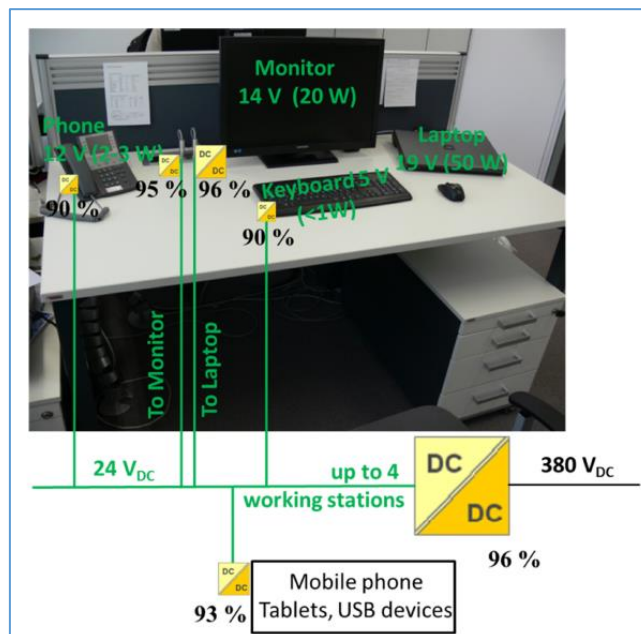


Figura 19. Infrastructură de alimentare pentru echipamente de birou [21].



De la 24 Vcc tensiunea poate fi redusă pentru alimentarea fiecărui dispozitiv. Un convertor DC/DC de putere poate fi montat într-un panou de distribuție și are rolul de a adapta tensiunea de la 380 Vcc la 24 Vcc. Apoi cu un alt convertor se poate distribui energia consumatorilor de putere redusă printr-un dispozitiv care integrează mai multe prize. Un astfel de dispozitiv este prezentat în Figura 20.



Figura 20. Dispozitiv de alimentare pentru echipamente de putere scăzută [22].

Pentru a putea alimenta consumatori cu tensiuni diferite de alimentare cum ar fi laptopuri, monitoare, telefoane mobile care necesită tensiuni sub 24Vcc se poate integra o sursă de tipul *buck converter* într-o unitate compactă care să încorporeze mai multe prize. Elementele de cuplare pentru fiecare tensiune sunt integrate în construcția prizei care poate furniza maximum 100W.

Pentru echipamentele care necesită obligatoriu alimentare în curent alternativ se pot utiliza invertoare DC/AC. Această soluție este cea mai complicată din punct de vedere tehnic și al costurilor pe care le implică.

*Invertoarele* sunt convertoare c.c.-c.a. ce au la intrare o sursă de tensiune (sau curent) continuă pe care o transformă într-o sursă de tensiune (sau curent) alternativă, ce poate avea frecvență și/sau tensiune reglabilă. De regulă, invertoarele sunt utilizate pentru acționarea motoarelor de curent alternativ cu viteză de rotație reglabilă, dar își găsesc aplicabilitate și în alte domenii, de exemplu construcția surselor de alimentare de c.a. neîntreruptibile (UPS).

Criteriile după care se clasifică invertoarele sunt:

– după numărul de faze ale tensiunii la ieseală avem:

- invertoare monofazate;
- invertoare trifazate;

– după forma semnalului la ieseală avem:

- inverter cu semnal dreptunghiular (figura 5.1.a), sau cvasidreptunghiular
- inverter cu semnal modulată în durată (Pulse Width Modulation-PWM), sau în amplitudine;

- inverter cu undă sintetică, ce aproximează o sinusoidă în trepte prin sinteză;
- după natura circuitului de alimentare avem:
  - inverter de tensiune, la care sursa de alimentare este o sursă de tensiune;
  - inverter de curent, la care sursa de alimentare este o sursă de curent;
- după modul de stingere a tiristoarelor în cazul invertoarelor cu tiristoare avem:
  - inverter cu stingere independentă, la care fiecare tiristor are circuit de stingere propriu;
  - inverter cu stingere de grup, la care un grup de tiristoare au un singur circuit de stingere;
  - inverter cu stingere autonomă, cu stingere în ordinea fazelor, la care intrarea în conducție a unui tiristor determină blocarea tiristorului aflat în conducție.

Este nevoie așadar de conversia unei tensiuni în jur de 300 Vcc la 220-240Vc.a. Soluțiile disponibile pe piață realizează conversia de la tensiuni cu valori mici 12/24/48Vcc pentru ca sunt solicitate în sistemele de back-up sau în sistemele ce utilizează stocarea energiei produse de panouri fotovoltaice sau turbine eoliene/hidro. Faptul că nu există piață pentru invertoare 300Vc.c/240Vc.a. determină un preț ridicat pentru aceste echipamente care trebuie realizate pe comandă. Pot fi utilizate invertoare standard care acceptă la intrare tensiuni mici însă rețeaua trebuie să suporte curenți mai mari pentru aceeași putere transferată. Pot fi utilizate și în combinație cu convertoare step-down însă soluția este costisitoare și are pierderi mai mari în lanțul de transformare al puterii. Toate aspectele amintite mai sus demonstrează faptul că trecerea echipamentelor electrocasnice pe alimentarea în curent continuu se poate face fără probleme deosebite și costuri semnificative. Tranziția este mai ușor de făcut pentru echipamentele noi care utilizează cu preponderență surse în comutație sau tehnologie *Inverter* pentru acționarea motoarelor mașinilor de spălat sau a compresoarelor pentru frigider și instalații de aer condiționat. Echipamentele de generație mai veche care utilizează încă transformatoare sau motoare de curent alternativ necesită modificări mai importante în sursele de alimentare sau utilizarea convertoarelor DC/AC. Acest aspect nu este un obstacol în calea dezvoltării rețelelor de curent continuu pentru că uzura aparatelor vechi va determina treptat eliminarea acestora și înlocuirea lor cu tehnologie mai nouă ușor adaptabilă rețelei de c.c.

### **3.2. Considerații privind stabilirea puterii necesare pentru o locuință sau gospodărie**

Conform datelor furnizate de Siemens, clădirile sunt „responsabile” pentru 40% din consumul de energie la nivel mondial, respectiv pentru 21% din emisiile cu efect de seră. În consecință, clădirile sunt elementul cheie pentru reducerea consumului de energie și pentru dezvoltarea sustenabilă a orașelor. Utilizarea tehnologiei moderne în cazul clădirilor inteligente poate conduce la reducerea emisiilor până la 40%, fără a afecta confortul locuitorilor.

Astfel apare conceptul de casă inteligentă ca răspuns la progresul tehnologic al surselor mici de energie și la progresul din domeniul tehnologiei informației și telecomunicațiilor, astfel încât, printr-un management eficient, consumatorii pot contribui la eficientizarea utilizării energiei

electrice. Utilizarea unor sisteme de management al energiei în casa inteligentă va permite consumatorului să folosească eficient energia electrică sau termică la cost redus [23]. În Figura 21 se prezintă imaginea de ansamblu a unei case inteligente prin posibilitățile de comunicare și control.

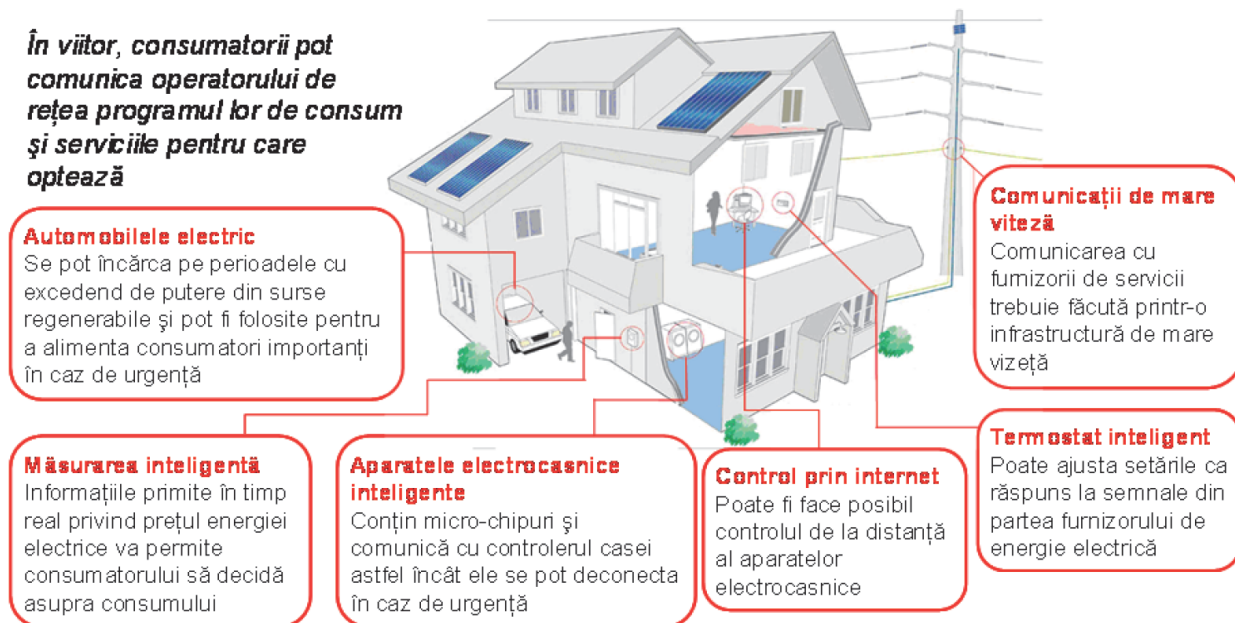


Figura 21. Conceptul de casă inteligentă [23].

Potrivit Strategiei Energetice a României 2016-2030 [24] cu perspective pentru 2050, consumul de energie electrică final după destinația consumului pentru anul 2016 arată ca în diagrama din Figura 22. Energia electrică exprimată în MW pe sectoare de activitate este reprezentată în Figura 32.

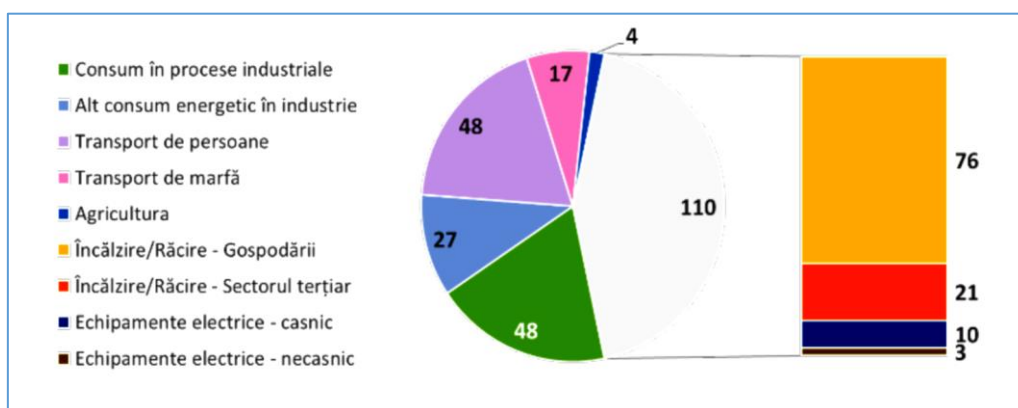


Figura 22. Consumul de energie electrică final după destinația consumului [24].

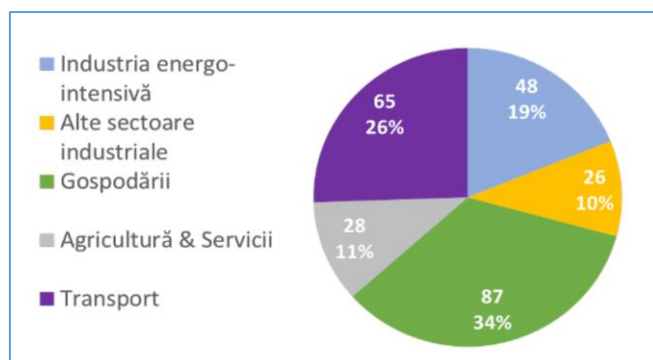


Figura 23. Energia electrică exprimată în MW pe sectoare de activitate [24].

Conform Strategiei Energetice a României 2016-2030 cu perspective pentru 2050, cota consumului de uz casnic nu va suferi modificări semnificative [24]. Datorită progresului tehnologic este posibil ca ponderea energiei consumate în cadrul unei gospodării pe categorii de consumatori să varieze între anumite praguri în funcție de aparatura electrocasnică utilizată. Pentru anul 2016, ponderile consumurilor aparatelor electrocasnice în totalul consumului casnic sunt prezentate în Figura 24.

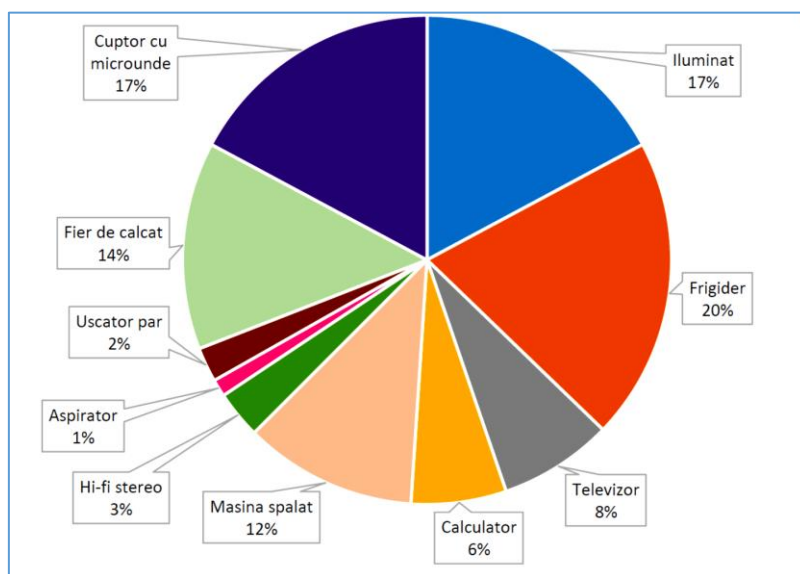


Figura 24. Ponderile consumurilor aparatelor electrocasnice in totalul consumului casnic [25].

Piața din România a atins nivelul de saturație, iar în prezent activitățile de achiziție sunt dominate de înlocuirea aparaturii electrocasnice existente. Costurile de achiziție ale unui aparat electrocasnic nou sunt recuperate prin reducerea costurilor de exploatare (costul electricității, al apei). Dacă avem în vedere, pe de o parte, ponderea consumului pentru aparatura electrocasnică în consumul total de electricitate din sectorul rezidențial și, pe de altă parte, vechimea aparaturii electrocasnice din țara noastră, devine evident că există un potențial important de reducere a necesarului de electricitate și de apă, și implicit a costurilor, prin înlocuirea echipamentelor vechi cu unele noi, mai eficiente energetic. Deocamdată, comparativ cu alte țări din Europa de Est, România se numără printre țările

cu cea mai scăzută rata de înlocuire a produselor electrocasnice. În majoritatea cazurilor, rata medie de înlocuire depășește durata de viață a echipamentelor, însă de aici reiese și un aspect pozitiv, și anume potențialul de creștere al pieței electrocasnicelor noi eficiente energetic [25].

Pentru aplicația de tip laborator modular mobil – EXPERIMENTARIUM s-a estimat un necesar al puterii electrice prin considerarea anumitor consumatori electrice utilizați în mod curent într-o gospodărie. În tabelul de mai jos sunt reprezentați consumatorii luați în calcul pentru estimarea puterii și caracteristicile energetice ale acestora.

Tabel 5. Consumatori electrice considerați pentru estimarea puterii necesare și caracteristici energetice

Nr. Crt	Consumator electric	Putere instalată	Putere absorbită	Tensiune nominală	Curent absorbit	Durață utilizare /oră	Durață totală utilizare zi	Energie necesară
UM		[W]	[W]	[Vcc]	[Acc]	[minute]	[ore]	[kWh/zi]
1	Pompa de caldura	3000	750	375	8,00	15	12	9
2	Ventilație	250	83	375	0,67	20	18	1,5
3	Masina de spalat rufe	2000	1000	375	5,33	30	1	1
4	Frigider A+	200	50	375	0,53	15	24	1,2
4	Masina de spalat vase	1600	400	375	4,27	15	1	0,4
5	Iluminat general + iluminat de siguranță	300	300	48	6,25	60	4	1,2
7	TV+LAPTOP+router	100	100	48	2,08	60	6	0,6
8	Incarcator auto	1500	1500	375	4,00	60	8	12
9	Pompa hidrofor	1600	267	375	4,27	10	24	6,4
<b>10</b>	<b>Total</b>	<b>10550</b>	<b>4450</b>	<b>-</b>	<b>35,4</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>33,3</b>

Conform normativelor în vigoare, puterea electrică este definită astfel:

**Putere instalată:** puterea activă (aparentă) nominală indicată în documentația tehnică a fabricii constructoare pentru un generator sau receptor, care este înscrisă pe plăcuța indicatoare sau care este indicată de fabricant. (Ordin ANRE 59/2013)

**Putere instalată totală:** suma puterilor instalate ale tuturor generatoarelor/receptoarelor pentru un loc de producere sau de consum. (Ordin ANRE 59/2013)

În urma calculelor efectuate rezultă că o putere de 5 kW este suficientă pentru alimentarea punctului de consum considerat. În funcție de anotimp, temperatura exterioară sau momentul zilei consumul efectiv poate fi mult mai scăzut decât cel anticipat.

Pe partea de climatizare și încărcare vehicul electric consumul este cel mai mare (aproximativ 50% din energia necesară). Dacă acești consumatori nu sunt conectați pentru că nu este nevoie de căldură sau automobilul electric are suficientă autonomie rămasă, atunci restul energiei electrice produse în amplasament poate fi stocată în baterii sau transmisă în rețeaua publică de curent continuu considerată.

Pentru a asigura necesarul energetic se au în vedere două surse de alimentare: panouri fotovoltaice și generatoare eoliene/hidro. Pentru asigurarea puterii de 5 kW poate fi proiectată o microrețea bazată pe surse regenerabile dimensionată din punct de vedere tehnic și economic. Un sistem cu panouri fotovoltaice cu funcția de *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* dimensionat la 3 kW și o turbină eoliană cu puterea de 2 kW pot fi utilizate pentru asigurarea alimentării din surse proprii. Surplusul de energie va fi stocat în baterii de acumulatori utilizate pentru sistemele de alimentare cu energie regenerabilă. În cazul în care sistemul nu va putea funcționa autonom va fi disponibil accesul la rețeaua publică de curent alternativ prin intermediul convertoarelor AC/DC bidirecționale.

#### **4. Stabilirea schemei aferentă microrețelei de curent continuu ce urmează să fie realizată (configurațiile schemelor electrice, nivelurile de tensiune și putere propuse)**

Aspectele menționate în capitolele anterioare demonstrează eficiența utilizării rețelelor de curent continuu. Deși acestea prezintă numeroase avantaje iar majoritatea dispozitivelor și echipamentelor electrocasnice pot funcționa direct folosind curent continuu, dezvoltarea acestor rețele trebuie să facă față mai multor provocări, dintre care amintim:

- Necesitatea echipamentelor de conversie a energiei bidirecționale, convertoare DC/DC, AC/DC
- Siguranța în exploatare și protecția cu siguranțe fuzibile/automate
- Lipsa adoptării unei tensiuni standard de lucru unanim acceptată cu excepția echipamentelor pentru telecomunicații, transporturi cu vehicule electrice și industria aerospațială

Stațiile de convertor pentru puteri mari sunt scumpe și au o capacitate limitată de suprasarcină. La distanțe mai mici de transmisie, pierderile în stațiile de conversie pot fi mai mari decât în cazul unei linii de transmisie de curent alternativ pentru aceeași distanță.

Lipsa produselor disponibile comercial, a standardelor și a reglementărilor pentru sistemele de curent continuu reprezintă o provocare majoră care împiedică dezvoltarea rapidă a acestui domeniu. În prezent, pentru proiectarea și realizarea unei rețele de curent continuu este dificilă identificarea convertoarelor, siguranțelor sau încărcătoarelor necesare operării sistemului mai ales că acestea funcționează la niveluri diferite de tensiune.

De asemenea, utilizatorii nu au acces deocamdată la aparate electrocasnice cu opțiune de alimentare în curent continuu. Din punct de vedere al standardelor, mai multe organizații internaționale cum sunt Emerge Alliance, ETSI – European Telecommunications Standard Institute IEC- International Electrotechnical Commission și IEEE fac demersuri pentru dezvoltarea reglementărilor necesare implementării rețelelor de curent continuu pentru aplicații rezidențiale.

Conform standardului IEC 60038, sistemele de distribuție ce folosesc curentul continuu de joasă tensiune nu trebuie să depășească 1500 V. Pentru exemplificare, se prezintă diagrama din Figura 25. cu nivele de tensiune utilizate în mod curent pentru alimentarea în curent continuu.



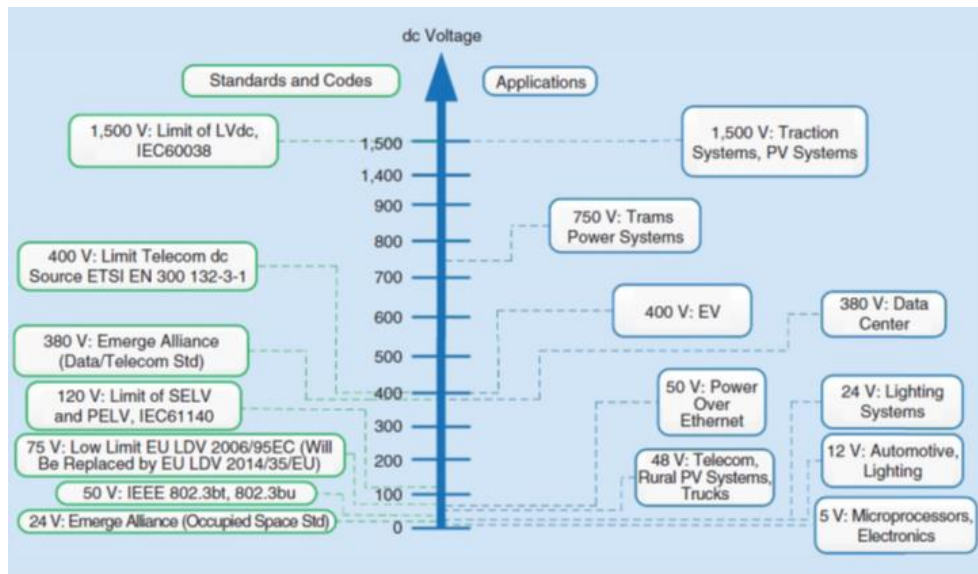


Figura 25. Nivele de tensiune utilizate în mod curent pentru alimentarea în curent continuu [26].

Trecerea de la sistemul actual de distribuție în c.a la rețele de curent continuu trebuie făcută în etape, având în vedere funcționarea în paralel a ambelor sisteme pentru asigurarea continuității în alimentare. Distribuția în curent continuu reprezintă o soluție doar acolo unde poate fi adaptată cu ușurință consumatorilor casnici sau unde poate fi furnizată cu eficiență maximă prin conectarea directă la surse regenerabile de energie cum ar fi panourile fotovoltaice. În Figura 26 este prezentată o structură a unei rețele de curent continuu cu mai multe nivele de tensiune în funcție de specificul consumatorilor.

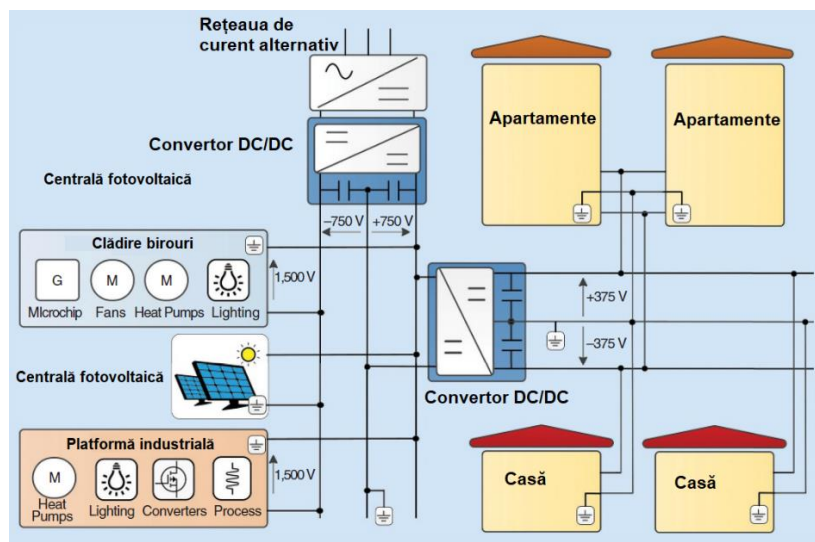


Figura 26. Rețea de curent continuu cu mai multe nivele de tensiune [26].

Ca și în cazul sistemelor de curent alternativ, fluxul de energie poate fi transmis prin două conductoare (cu o singură fază) sau patru conductoare (trifazate). Puterea în rețelele de curent continuu poate fi de asemenea transmisă prin configurație similară: sisteme cu două fire (unipolare)



și trei fire (bipolare). Diferența între aceste două configurații de rețea este dată de numărul de nivelurile de tensiune disponibile.

În prezent, necesitatea integrării rapide a surselor regenerabile de energie (cum ar fi panourile fotovoltaice) și a unităților de stocare în sistemele de distribuție a evidențiat beneficiile utilizării microrețelelor de curent continuu. Pe de altă parte, capacitatea de alimentare a oricărei surse distribuite de energie este foarte variabilă și incertă datorată dependenței de condițiile meteorologice. Prin urmare, interfața cu rețeaua AC este foarte importantă pentru a îmbunătăți fiabilitatea și disponibilitatea microrețelei de c.c. [26].

Există mai multe modalități de conectare a rețelei de curent continuu în cadrul unei rețele de curent alternativ, dintre care:

- Configurație radială – în care calea de curent continuu pornește de la rețeaua de curent alternativ printr-un convertor AC/DC și alimentează circuitele în linie printr-o singură bară de curent continuu. Are anumite avantaje precum simplitatea în amenajare și exploatare și posibilitatea utilizării nivelurilor de tensiune multiplă.

Cu toate acestea, această configurație nu este flexibilă în condiții de defect. Spre exemplu, o singură avarie în capătul de alimentare poate afecta toți consumatorii conectați după aceasta. Un model de rețea radială în curent continuu este prezentat în Figura 27.

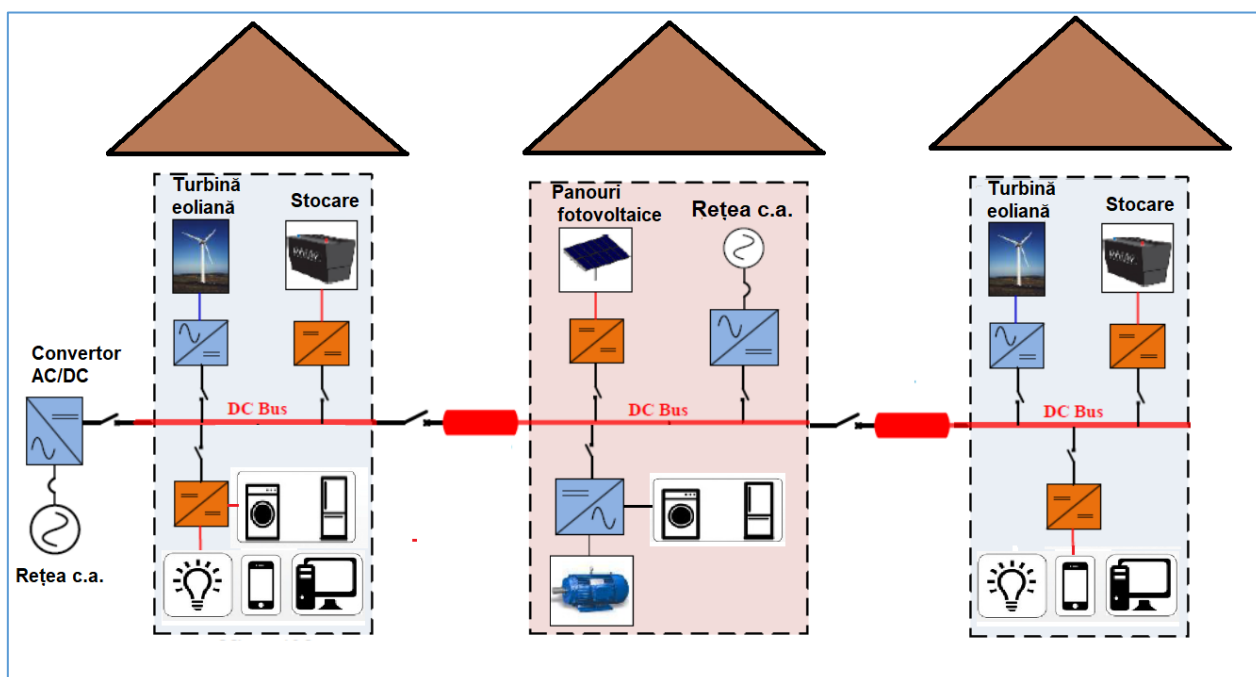


Figura 27. Rețea radială de curent continuu.

- Configurație inel sau buclă – compusă din două sau mai multe căi de curent continuu alimentate prin convertoare într-un singur punct sau în mai multe zone ale rețelei. Această configurație utilizează întrerupătoare rapide pentru a izola părțile cu defect în așa fel încât ceilalți consumatori să poată funcționa fără probleme.

- Configurație interconectată. Fiabilitatea microrețelei de curent continuu poate fi în continuare îmbunătățită prin asigurarea unor căi alternative de alimentare din rețeaua publică de curent alternativ în cazul defectării unuia din convertoarele AC/DC. Un exemplu de rețea inelară interconectată în mai multe puncte cu rețeaua de curent alternativ este prezentată în Figura 28.

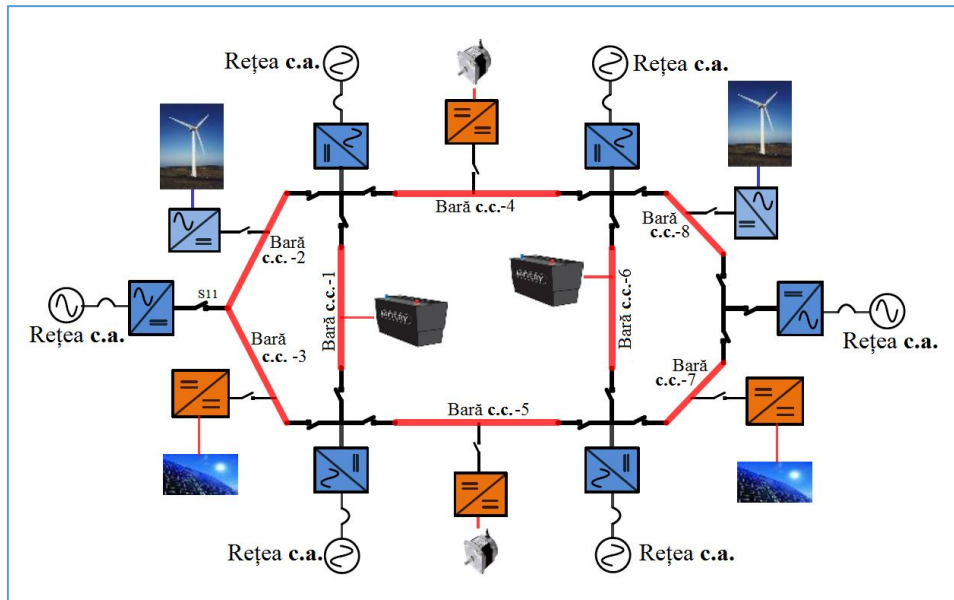


Figura 28. Rețea de curent continuu inelară interconectată.

Pe baza considerentelor menționate anterior se propune ca pentru aplicația de tip laborator modular mobil – EXPERIMENTARIUM să fie utilizat un sistem de alimentare (la nivel de cartier) cu structura prezentată în Figura 29.

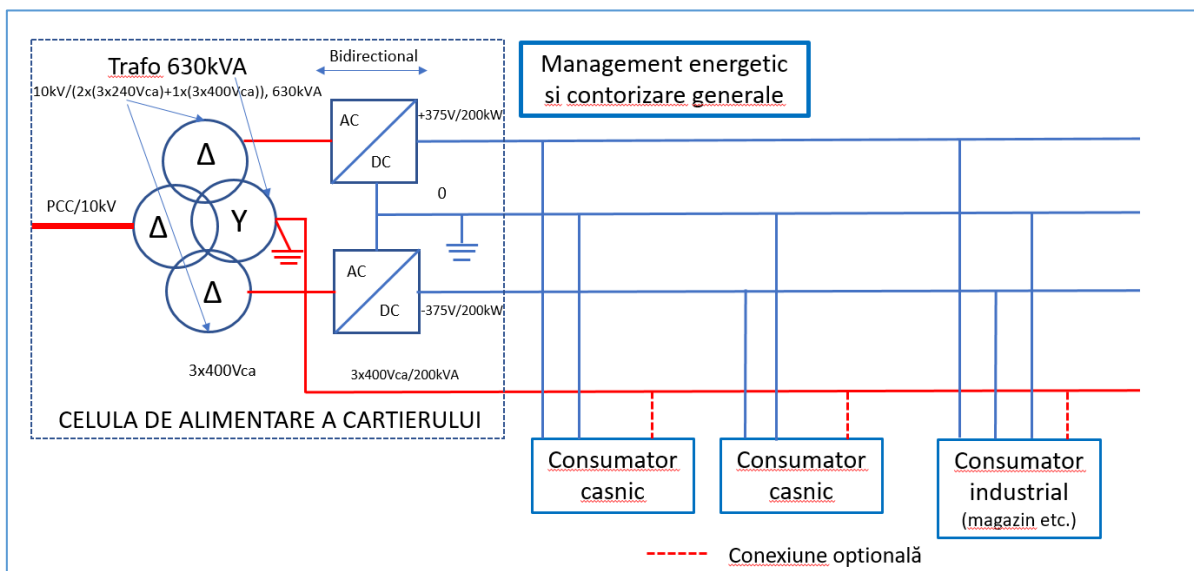


Figura 29. Schema de alimentare cu energie electrică la nivel de cartier.

Sistemul de alimentare utilizează două convertoare AC/DC bidirecționale având în vedere că utilizatorii rețelei au atât calitatea de consumator cât și cea de producător de energie electrică din surse regenerabile. Acestea produc o tensiune continuă în sistem diferențial de +/-375V și sunt cuplate la un transformator standard coborât de tensiune de 630 kVA.

Rețeaua de curent continuu este de tip bipolar și este alimentată prin 3 conductoare. Pe lângă conexiunea cu rețeaua de curent continuu, consumatorii au și posibilitatea racordării la rețeaua de curent alternativ printr-o conexiune opțională pentru asigurarea continuității în alimentarea cu energie electrică.

La nivel de locuință (apartament sau gospodărie), schema de alimentare în curent continuu considerată este prezentată în Figura 30.

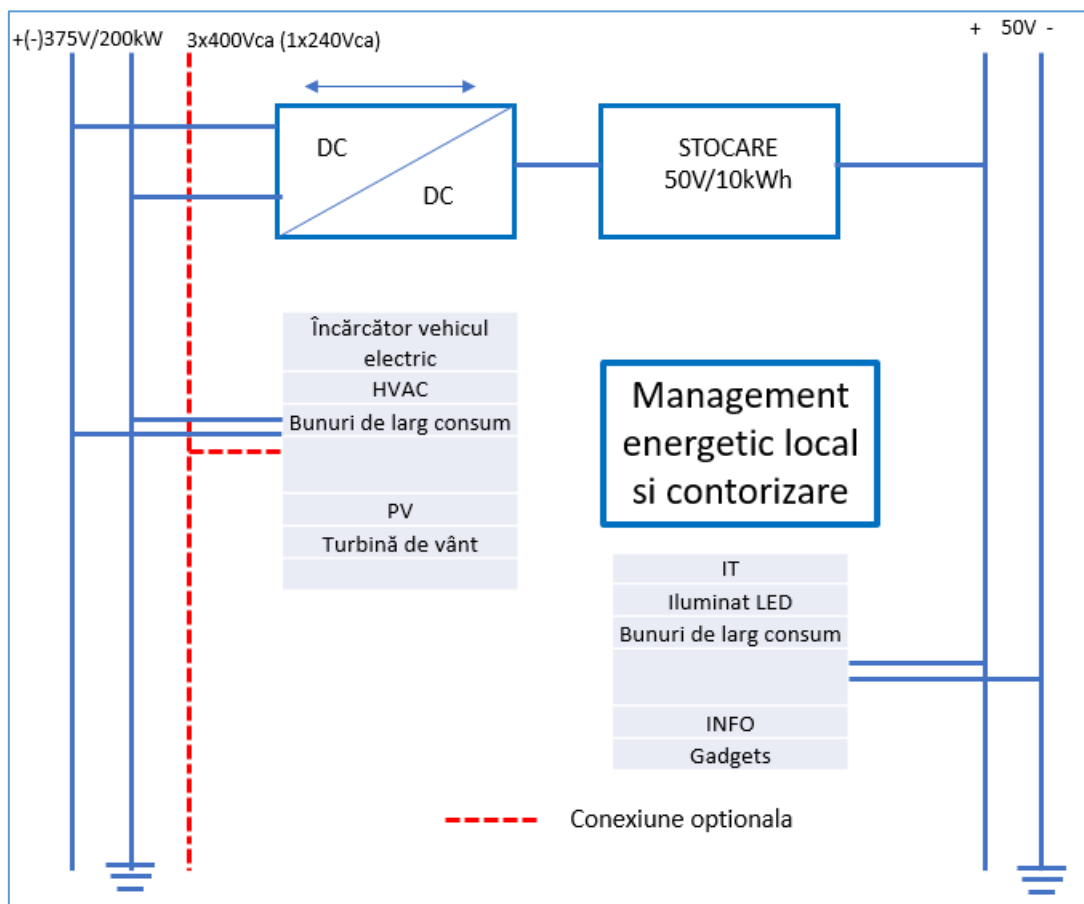


Figura 30. Schema de alimentare în curent continuu la nivel de locuință.

În cadrul acestei scheme de alimentare se mai cuplează încă un convertor DC/DC bidirecțional pentru reducerea tensiunii de la 375Vcc la 50Vcc necesară pentru partea de stocare în acumulatori dar și pentru alimentarea consumatorilor de putere redusă (iluminat, electrocasnice mici, TV, laptop, telefon, PC, imprimantă, etc).

Ținând cont de prescripțiile standardelor aplicabile s-a considerat un sistem de alimentare multipolar. Consumatorii cu puteri instalate mai mari cum sunt încărcătorul pentru vehicul electric,

instalații de climatizare, frigider, mașină de spălat vor fi conectați direct pe bara de curent continuu de +/- 375V. Pe același circuit de forță se vor cupla și sursele de energie regenerabilă (sistemul cu panouri fotovoltaice și generatorul eolian/hidro).

O structură completă de rețea la nivel de locuință care conține și consumatorii uzuali este reprezentată în Figura 31.

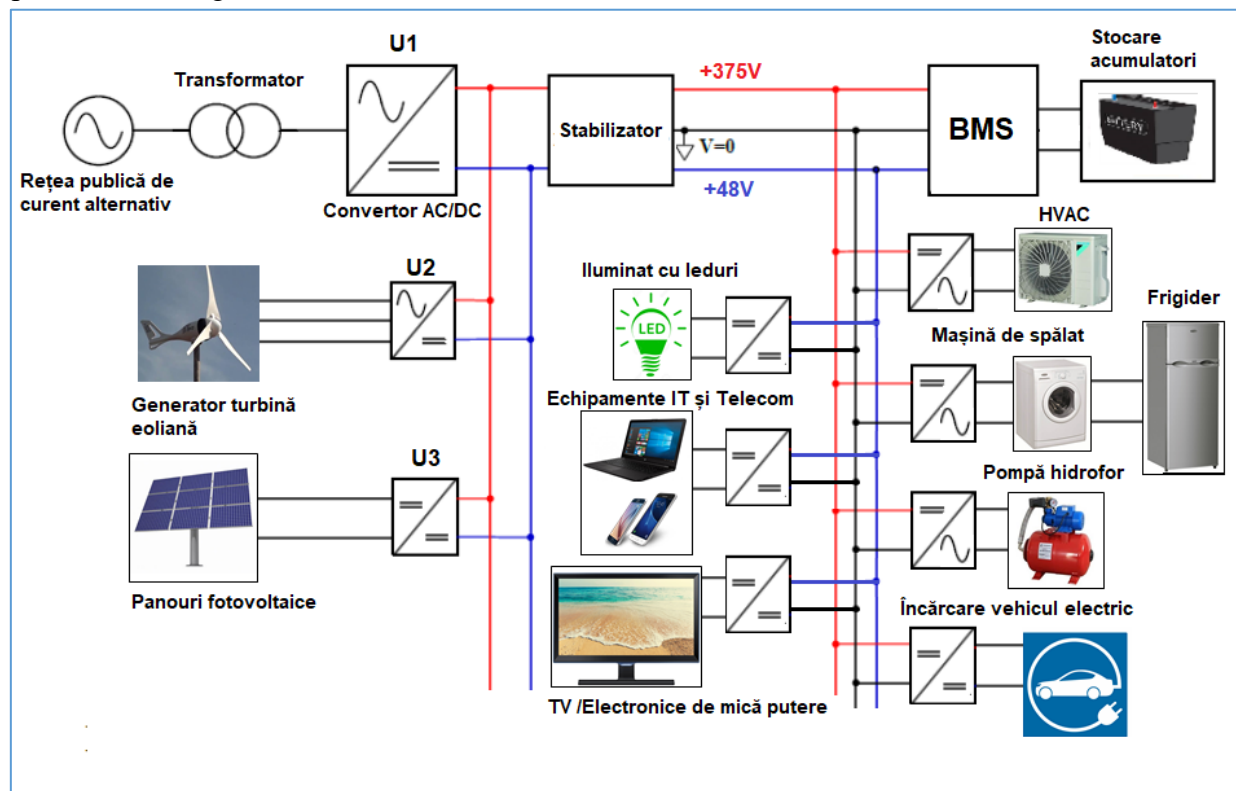


Figura 31. Schemă de alimentare în curent continuu la nivel de locuință care include consumatori uzuali și sisteme de generare a energiei din surse regenerabile.

În funcție de costurile implicate și specificul consumatorilor schemele prezentate mai sus pot suferi modificări. De asemenea, din perspectiva producerii energiei din surse regenerabile trebuie ținut cont de faptul că acestea depind de condițiile meteorologice din amplasament și puterea previzionată are variații mari în timp, de-a lungul zilei sau în funcție de anotimp. Tocmai de aceea, este obligatorie menținerea conexiunii cu rețeaua publică de distribuție dacă aceasta este disponibilă. De asemenea, stocarea permite acumularea surplusului de energie când consumul este redus în raport cu capacitatea de producție.

#### 4.1. Concluzii

În cadrul studiului realizat, s-au analizat avantajele și topologiile curente ale sistemelor de distribuție LVDC pentru aplicațiile rezidențiale.

Au fost prezentate diverse analize privind economia de energie și nivelurile de tensiune la rețelele în care au fost implementate sistemele de distribuție LVDC. Studiile au arătat că un sistem de c.c. va crește cu siguranță eficiența și calitatea energiei. Lipsesc în continuare rezolvări la provocările pe

care trebuie să le depășească sistemele bazate pe c.c. în comparație cu sistemele existente pe bază de c.a., cum ar fi aspectele de coordonare a siguranței și protecției.

Sistemele de distribuție LVDC prezintă avantaje deosebite atunci când este necesară integrarea surselor regenerabile de energie, împreună cu sistemele de stocare. Dezvoltarea soluțiilor pentru alimentarea în c.c. a aparatelor disponibile pe piață reprezintă următorul pas pentru a stimula instalarea sistemelor LVDC, în special atunci când sunt necesare modificări minore în sistemele de alimentare a acestora. În zonele izolate, fără acces la rețeaua electrică de interes public, energia este, în general, produsă de surse de energie regenerabile. În aceste aplicații, sistemul de microrețele LVDC reprezintă prima opțiune pentru distribuirea energiei pentru costurile mici de implementare.

Deocamdată industria echipamentelor electrocasnice este axată în principal pe produse destinate alimentării în rețele de curent alternativ. Există din ce în ce mai multe echipamente care se alimentează strict în curent continuu și care utilizează surse de alimentare în comutație (switching-mode power supply, SMPS) pentru conversia curent alternativ și pentru adaptarea nivelului de tensiune. În cazul acestor aparate, se poate interveni prin eliminarea părții de redresare și corecție a factorului de putere.

Deja majoritatea surselor în comutație au randamente foarte bune chiar și cu conversia c.a./c.c. astfel că impunerea schimbării tipului de alimentare al rețelei care să alimenteze locuințele trebuie justificată prin eficiența pe partea de producere și distribuție a energiei și mai puțin pe partea de alimentare a consumatorului final.

Alimentarea echipamentelor electrocasnice în curent continuu se poate realiza fără probleme deosebite și costuri semnificative. Tranziția este mai ușor de făcut pentru echipamentele noi care utilizează cu preponderență surse în comutație sau tehnologie *Inverter* pentru acționarea motoarelor mașinilor de spălat sau a compresoarelor pentru frigidere și instalații de aer condiționat.

Echipamentele de generație mai veche care utilizează încă transformatoare sau motoare de curent alternativ necesită modificări mai importante în sursele de alimentare sau utilizarea convertoarelor DC/AC.

Acest aspect nu este un obstacol în calea dezvoltării rețelelor de curent continuu pentru că uzura aparatelor vechi va determina treptat eliminarea acestora și înlocuirea lor cu tehnologie mai nouă ușor adaptabilă rețelei de curent continuu.

Lipsa dispozitivelor și sistemelor electronice de putere disponibile comercial, a standardelor și a reglementărilor pentru sistemele de curent continuu reprezintă o provocare majoră care împiedică dezvoltarea rapidă a acestui domeniu. În prezent, pentru proiectarea și realizarea unei rețele de curent continuu este dificilă identificarea convertoarelor, siguranțelor sau încărcătoarelor necesare operării sistemului mai ales că acestea funcționează la niveluri diferite de tensiune.

De asemenea, utilizatorii nu au acces deocamdată la aparate electrocasnice cu opțiuni de alimentare în curent continuu. Din punct de vedere al standardelor, mai multe organizații internaționale cum sunt Emerge Alliance, ETSI – European Telecommunications Standard Institute IEC - International Electrotechnical Commission și IEEE fac demersuri pentru dezvoltarea reglementărilor necesare implementării rețelelor de curent continuu pentru aplicații rezidențiale.

## **5. Structuri de convertoare Bidirecționale de Curent Continuu cu Raport Mare de Conversie**

Convertoarele bidirecționale sunt utile în aplicații de stocare a energiei electrice, de exemplu stocarea în supercondensatoare sau în baterii, sau în aplicații în care sunt prezente mai multe rețele de tensiune separate și se dorește să se realizeze transferul de energie între cele două.

Raportul mare de conversie este necesar în aplicații în care raportul tensiunii de la intrare și a celei de la ieșire este unul foarte mare, sau în aplicații în care una dintre tensiuni are o variație mare față de valoarea nominală. În cazul stocării energiei electrice în supercondensator este necesar să se utilizeze o topologie de convertor bidirecțional cu raport mare de conversie datorită variației de tensiune a acestuia la încărcare. [27]

În literatură există multiple topologii propuse pentru astfel de aplicații, după cum se poate observa în Figura 32. Pentru aceste aplicații este important raportul de conversie al convertorului, dimensiunile componentelor pasive, solicitarea componentelor active, existența unei conexiuni de masă comună între intrare și ieșire, utilizarea bobinelor cuplate magnetic, etc.

### **5.1. Convertoare de Curent Continuu cu Raport Mare de Conversie propuse în literatură**

O clasă mare de convertoare cu raport mare de conversie au fost dezvoltate în urma unor topologii „hibride” care se bazează pe celule de bobine și condensatoare comutate [28]. Utilizarea acestor celule în scheme de convertoare ajută la obținerea unui raport mare de conversie pentru același factor de umplere, și o solicitare redusă pe componentele active. Aceste celule L sau C (Figura 33), comută bobinele sau condensatoarele în serie sau în paralel obținând o dublare/înjumătățire de curent respectiv tensiune pe bornele acestora.

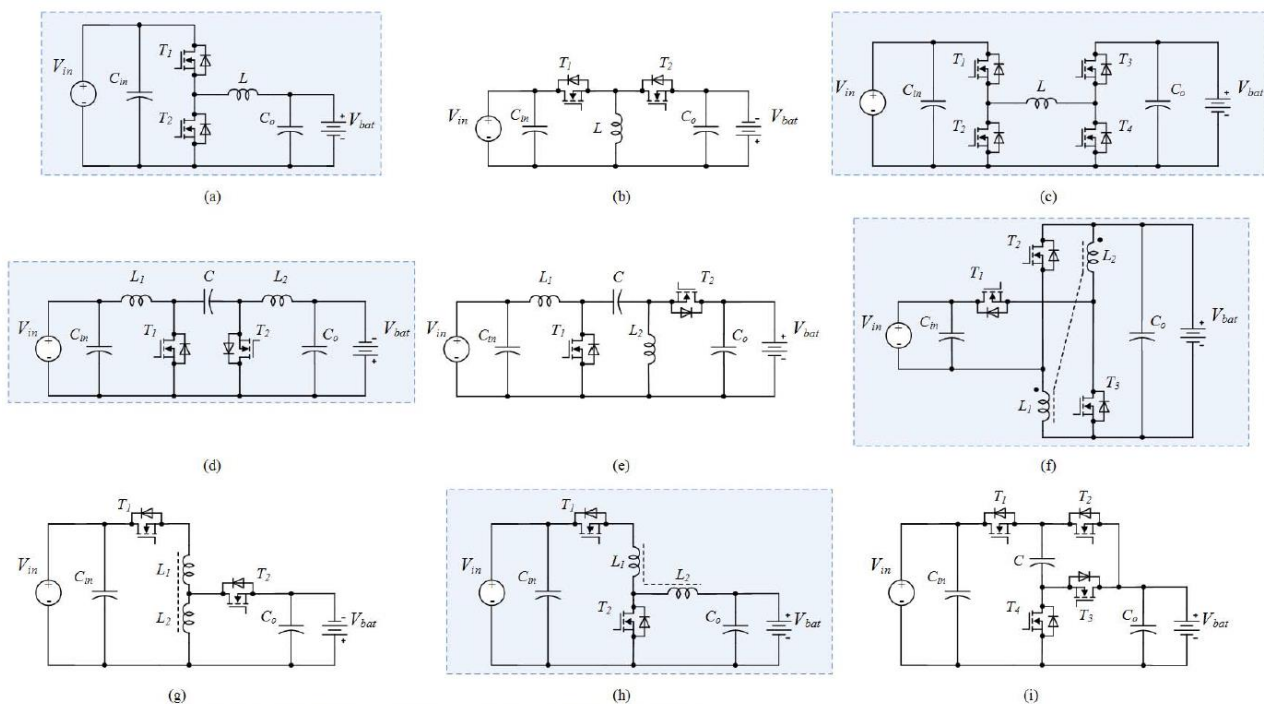


Figura 32. Topologii de convertoare bidirecționale fără izolare galvanică [29].

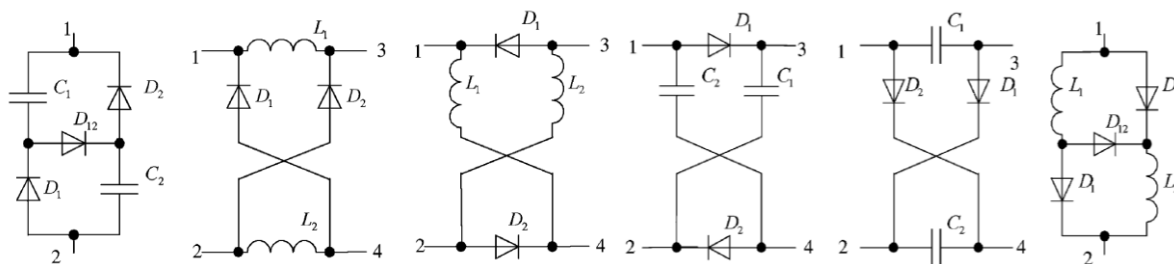


Figura 33. Structuri de celule L și C de comutație [28].

Doă exemple de astfel de convertoare bidirecționale, care utilizează o celulă de comutație capacitivă sunt prezentate în Figura 34 și Figura 35, convertoare bazate pe topologiile convenționale boost și SEPIC.

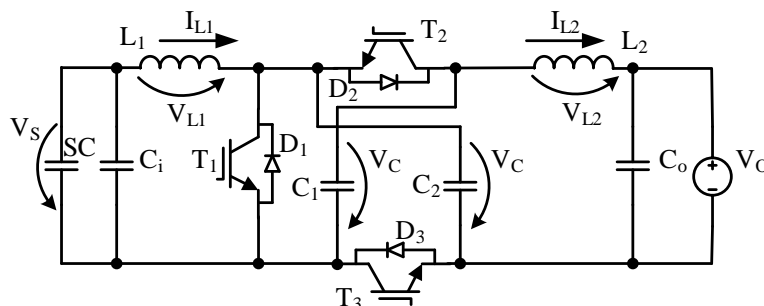


Figura 34. Conversor bidirecțional hibrid bazat pe convertorul boost [30].



Există topologii de convertoare care nu utilizează structuri hibride și obțin raport mare de conversie, cum ar fi cele din Figura 36 - Figura 39.

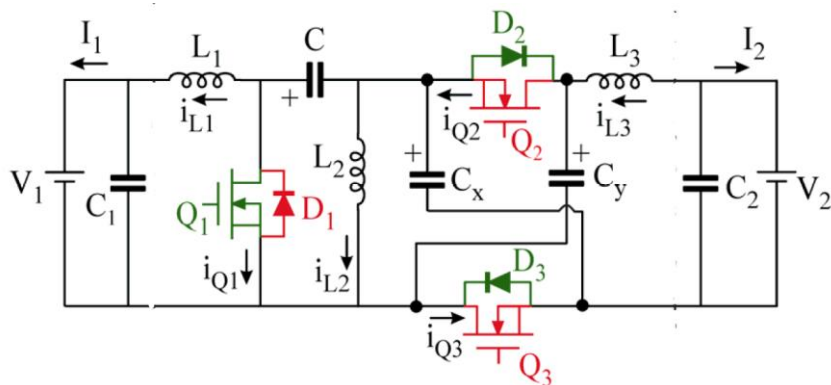


Figura 35. Convertor bidirecțional hibrid bazat pe convertorul SEPIC [31].

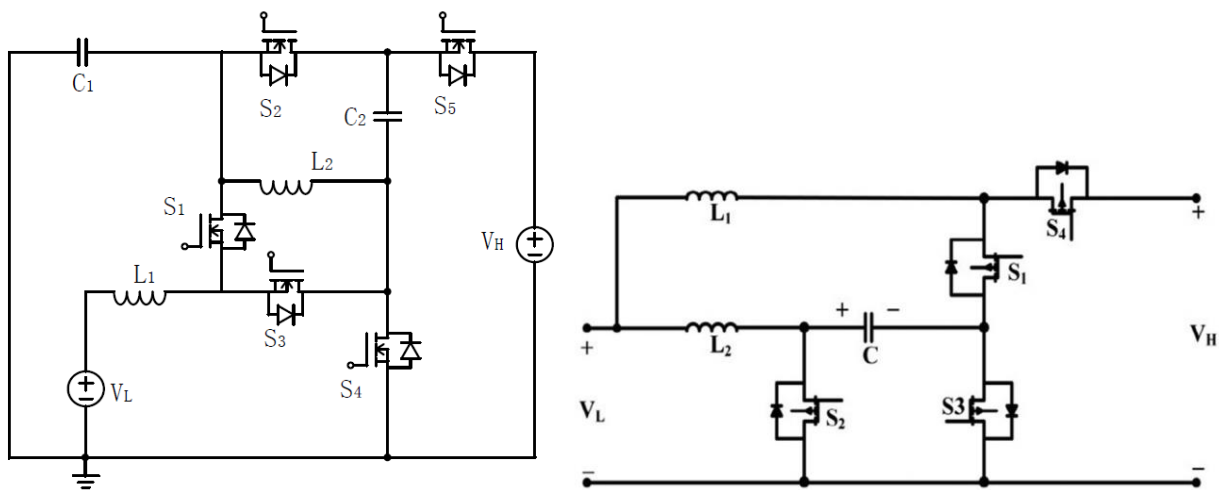


Figura 36. Convertor cu raport mare de conversie: [32] - stanga; [33] - dreapta

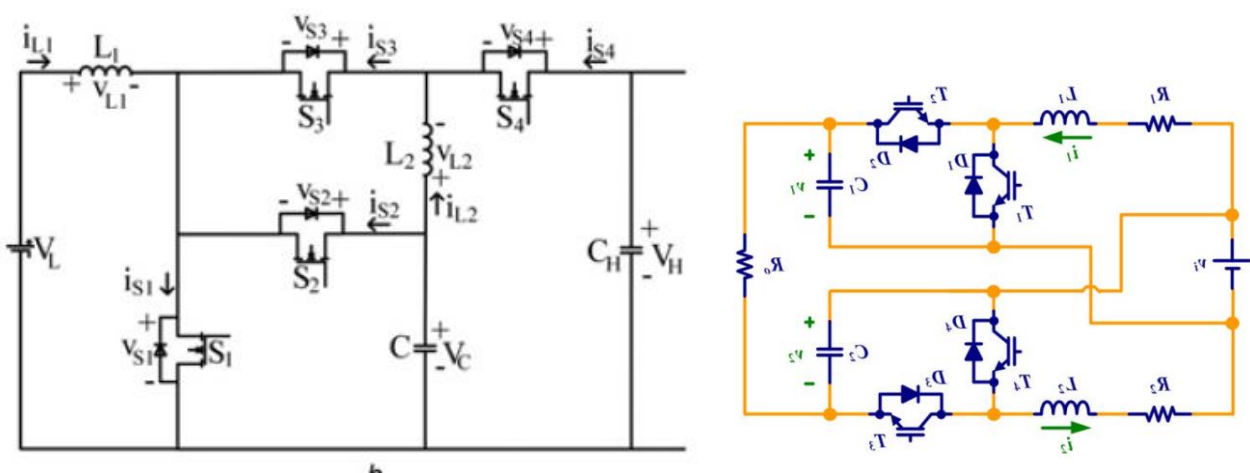


Figura 37. Convertor cu raport mare de conversie: [34] - stanga; [35] - dreapta.

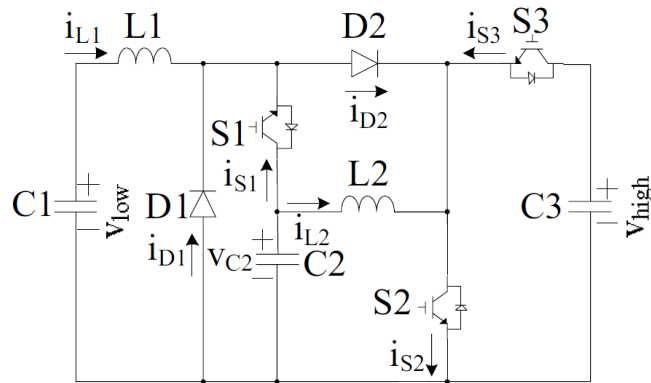


Figura 38. Convertor cu raport mare de conversie [36]

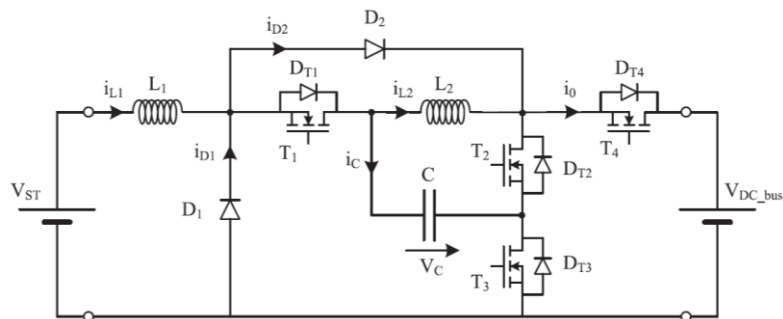


Figura 39. Convertor cu raport mare de conversie [27]

Alte topologii de convertoare cu raport mare de conversie sunt convertoarele multinivel (Figura 40, Figura 41), convertoare care se folosesc de două sau mai multe condensatoare la ieșire sau la intrare pentru a multiplica respectiv diviza tensiunea, de un număr de ori egal cu numărul de condensatoare. Este important de specificat că pentru acest convertoare comanda tranzistoarelor se face de obicei defazat, deci este oarecum mai complexă decât pentru convertoarele menționate anterior.

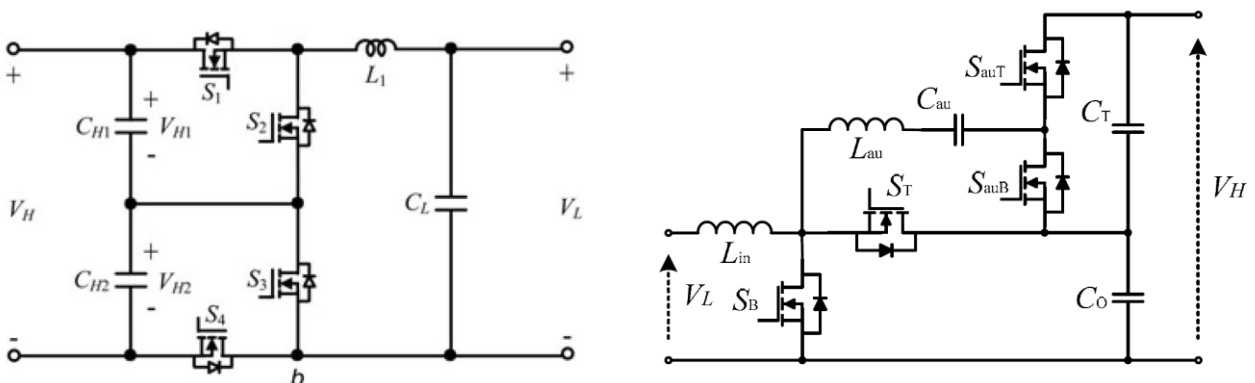


Figura 40. Convertor multinivel: [37] – stanga; [38] - dreapta

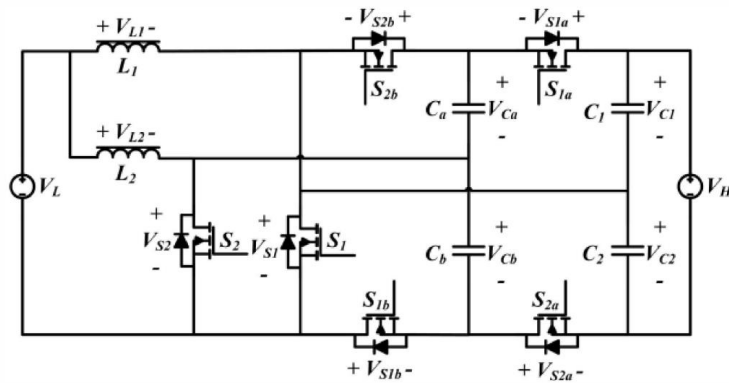


Figura 41. Convertor multinivel [39]

## 5.2. Convertor Coborător/Ridicător Hibrid cu Bobine Comutate cu raport mare de conversie

Prima topologie propusă în cadrul acestui proiect este bazată pe cea din Figura 42. Aceasta are un număr redus de componente și o structură hibridă. Structura hibridă este datorată celulei de bobine care comută în serie și în paralel obținând astfel un raport de conversie mărit, după cum se observă în relația (5.1). În plus și tranzistoarele au o solicitare redusă datorită acestor structuri.

Structura propusă (Figura 43) are un singur tranzistor adițional, care conferă simetrie schemei. Acesta nu necesită să comute decât atunci când se schimbă modul de funcționare, adică din convertor coborător ( $V_1 > V_2$ ) în convertor ridicător ( $V_1 < V_2$ ). Datorită simetriei schemei, aceasta are posibilitatea de a schimba modul de funcționare, obținând un raport de conversie inițial, precum în (5.1), iar la schimbarea modului de funcționare obținând un raport de conversie adițional, după cum se observă în relația (5.2). Figura 44 arată forma factorului de conversie în funcție de factorul de umplere al semnalului de comandă ( $D$ ), comparând convertorul propus cu un convertor convențional coborător/ridicător (buck/boost).

Sensul curentului definește sensul de transfer al puterii, iar schimbarea acestuia nu reprezintă o problemă după cum se poate observa în rezultatele de simulare (Figura 45). La schimbarea de funcționare din modul coborător în cel ridicător și invers (Figura 46), frecvența de funcționare se va modifica, însă funcționarea convertorului nu va fi perturbată.

Această schemă are următoarele avantaje:

- Funcționarea atât în regim de convertor coborător cât și în regim ridicător
- Număr relativ redus de componente
- Obținerea unei mari variații de tensiune
- Raport de conversie mărit
- Solicitări reduse pe componentele active
- Componente pasive reduse datorită structurii hibride

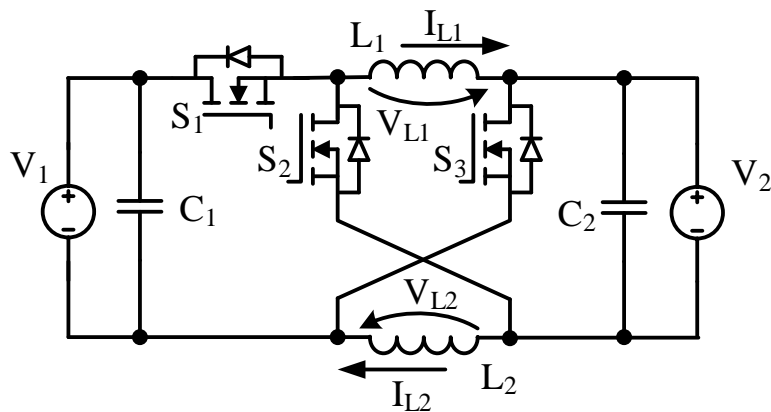


Figura 42. Structura convertorului bidirecțional [28], [40].

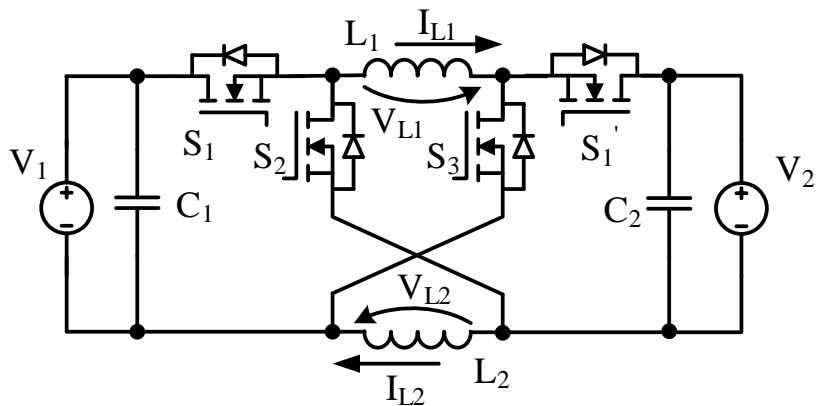


Figura 43. Structura convertorului propus.

$$V_2 = \frac{D}{2-D} \cdot V_1 \quad (5.1)$$

$$V_2 = \frac{2-D}{D} \cdot V_1 \quad (5.2)$$

Compararea factorului de amplificarea: Convertorul propus VS Convertorul convențional Coborător/Ridicator (Buck/Boost)

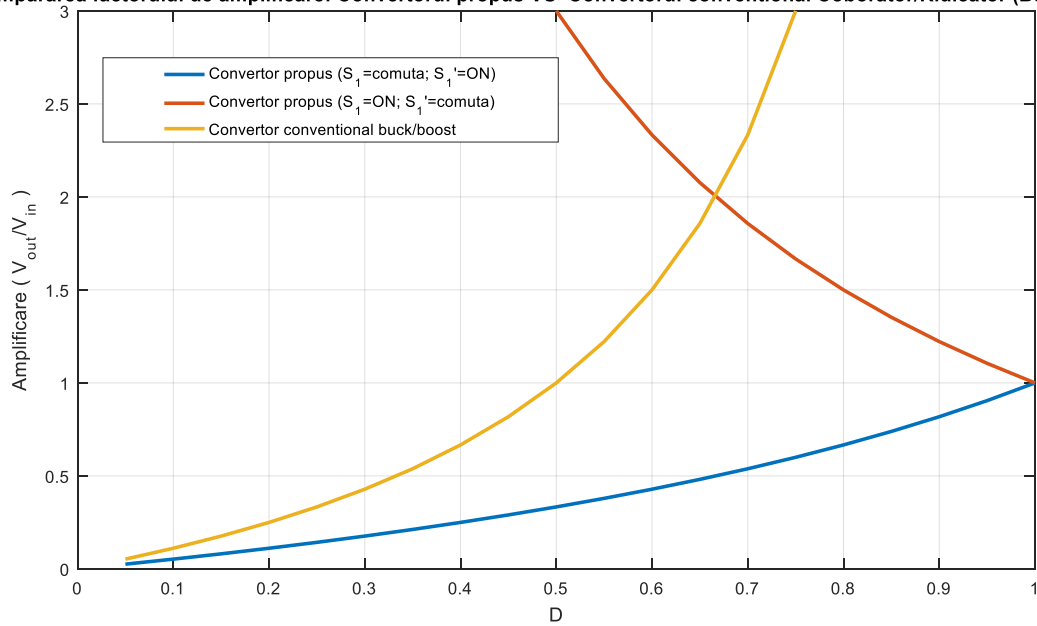


Figura 44. Compararea factorului de conversie a convertorului propus cu convertorul convențional Coborător/Ridicator (Buck/Boost)

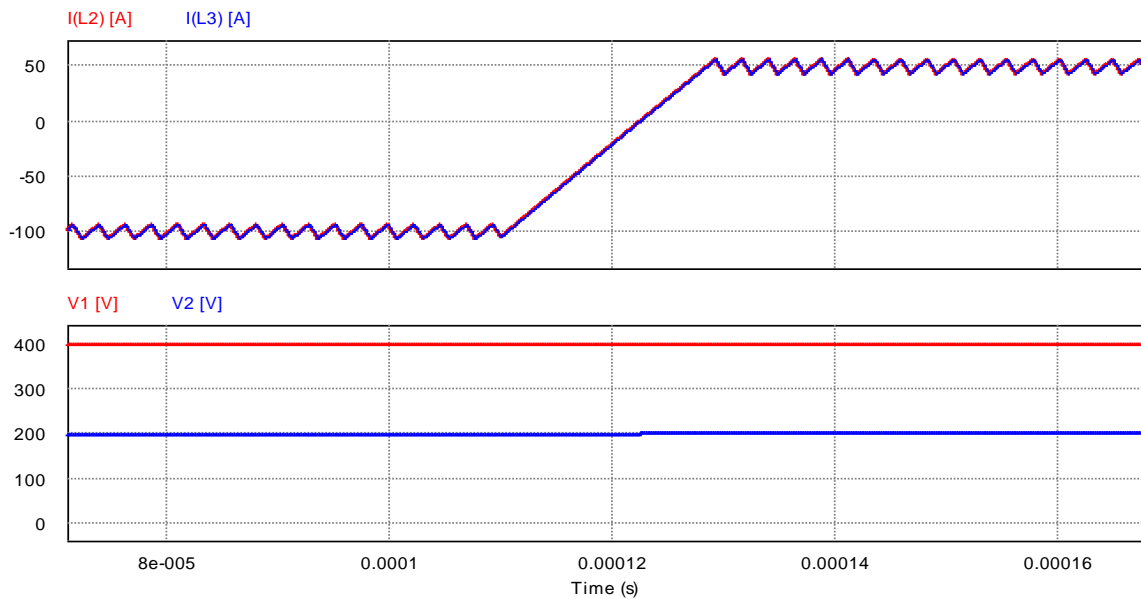


Figura 45. Rezultat de simulare. Regim tranzitoriu pentru curentul din bobine (de la -100 A la 50 A ;  $V_1=200$  V ;  $V_2=400$  V).

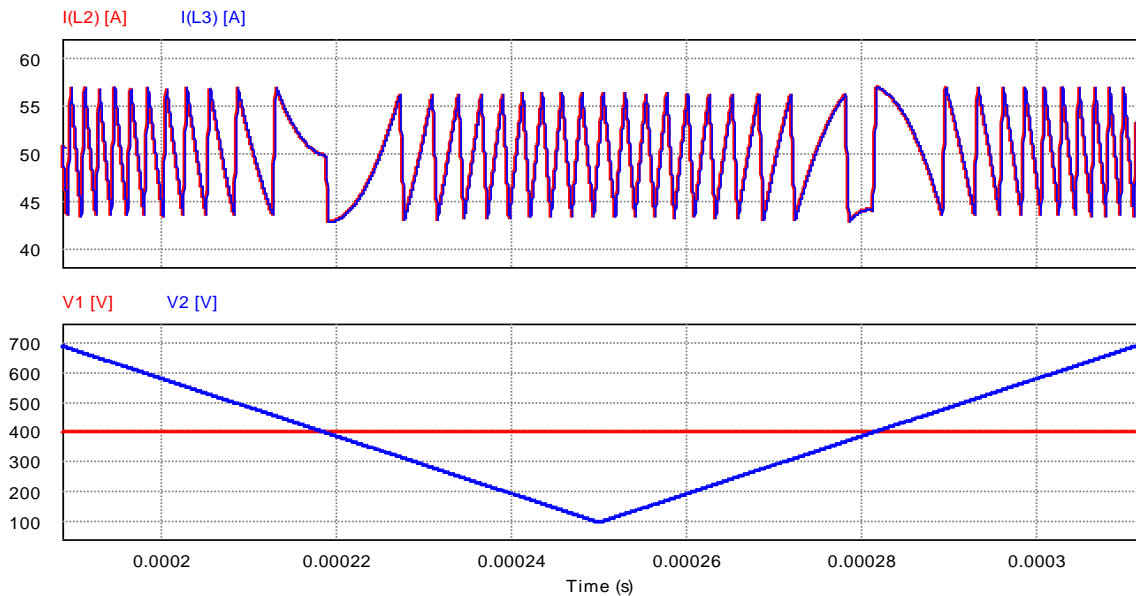


Figura 46. Rezultate de simulare. Alternanță între cele două moduri de funcționare.

### 5.3. Convertor Hibrid cu Raport Mare de Conversie cu Celule de Condensatoare Comutate și Riplu redus la intrări

În aplicațiile de interfațare a unor rețele de curent continuu de obicei este necesar un convertor cu masă comună pentru cele două intrări sau cu izolare galvanică. Deoarece izolarea galvanică aduce un cost suplimentar care nu este necesar, se dorește evitarea acesteia. De obicei structurile hibride pot să aibă masă comună sau nu [28], astfel că pentru a realiza interfațarea între cele două rețele de tensiune s-a propus o schemă de convertor bazată pe Figura 47.

Schema propusă (Figura 48), este realizată înlocuind diodele din schema inițială cu tranzistoare, pentru a obține un convertor bidirecțional. Chiar dacă numărul de tranzistoare este ridicat, costul acestora nu va fi cu mult mai mare decât în cazul convertoarelor convenționale, deoarece se obține o înjumătățire a tensiunii pe celula de condensatoare comutate.

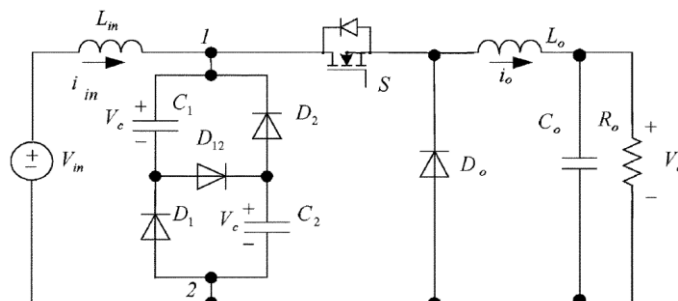


Figura 47. Structura convertorului unidirecțional cu raport mare de conversie din [28], [41].

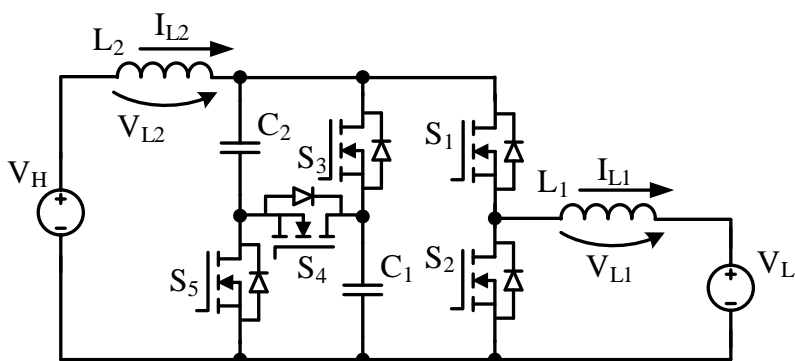


Figura 48. Structura convertorului propus pentru interfațarea a două rețele de curent continuu.

Raportul mare de conversie al acestui convertor se poate observa în relația (5.3).

$$V_2 = \frac{D}{2-D} \cdot V_1 \quad (5.3)$$

Costul redus al componentelor active și al inductoarelor reiese din Figura 49. Deși factorul de conversie nu este cel mai mare, comparând cu un alt convertor performant [33], pentru tensiunile din cazul de față inductoarele au o dimensiune mai mică (cel puțin 30%) și tranzistoarele au o solicitare mai mică peste tensiunile de  $V_L=35V$ , (până la 30%).

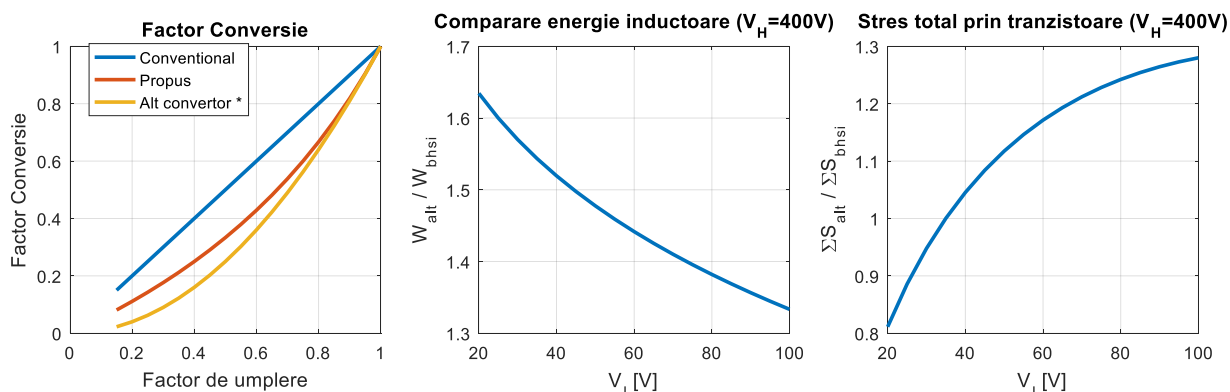


Figura 49. Compararea convertorului propus cu alta topologie (\*convertor: [33]).

Funcționarea acestui convertor se poate observa în Figura 50. Pentru testarea covnertorului s-a folosit un regulator de curent cu histerază, pentru curentul din bobină de valoare mai mare,  $I_{L1}$ . În forma de undă a curentului secundar,  $I_{L2}$ , se pot observa mici oscilații amortizate, pentru o scurtă perioadă de timp (Figura 51).

Această schemă are următoarele avantaje:

- Raport de conversie mărit
- Topologia are masă comună pentru cele două intrări
- Solicitări reduse pe componentele active
- Componente pasive reduse datorită structurii hibride



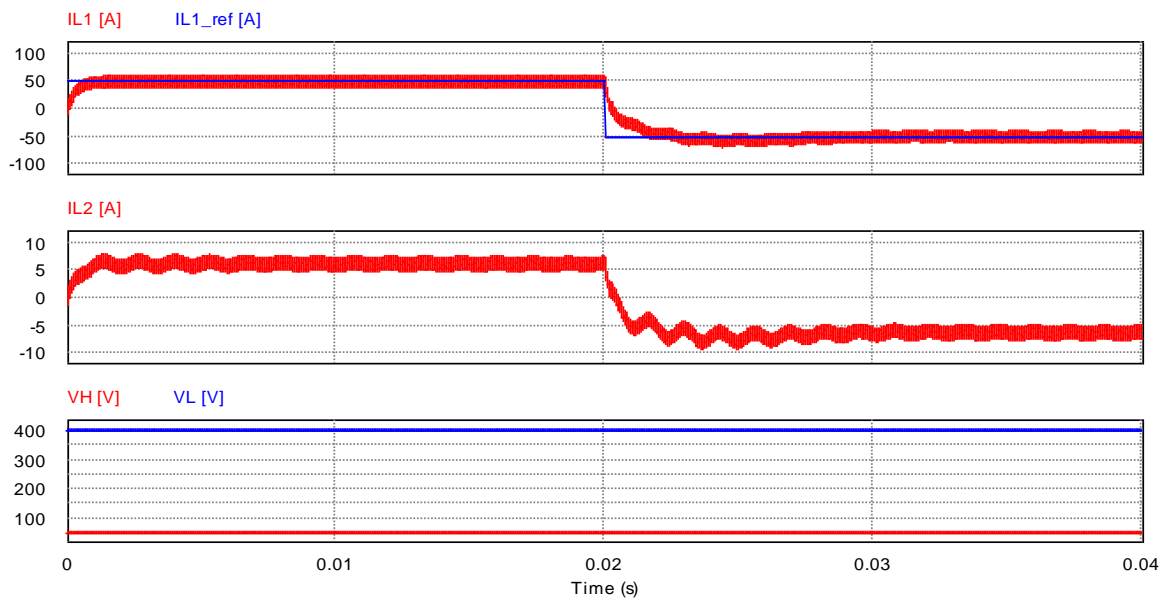


Figura 50. Rezultat de simulare. Regim tranzitoriu.

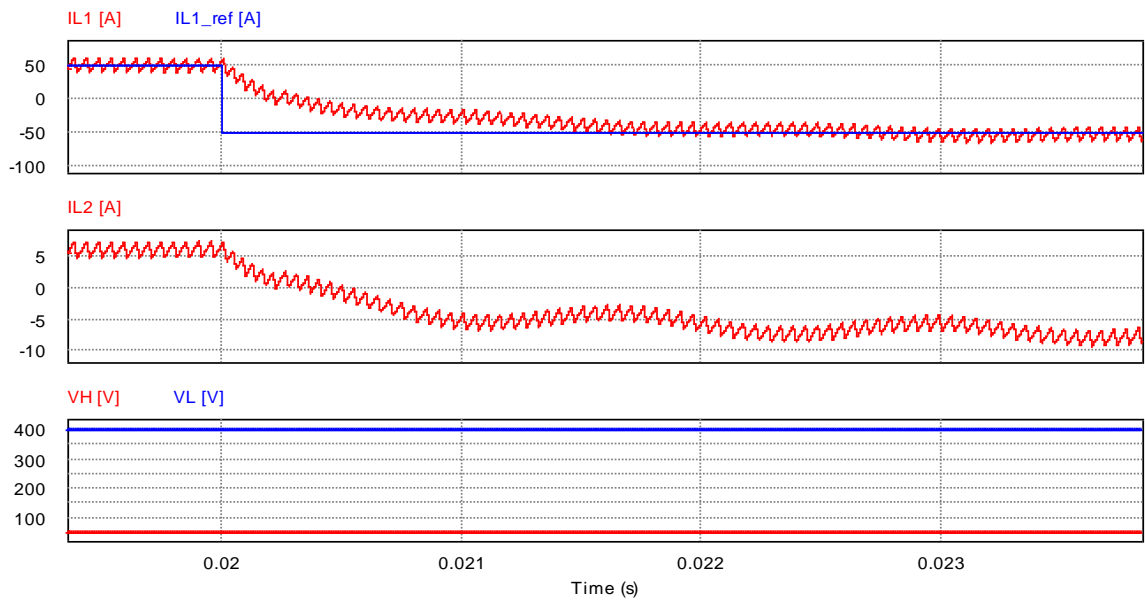


Figura 51. Rezultat de simulare. Regim tranzitoriu cu oscilații amortizate.

## 6. Strategii de management energetic folosite pentru stocare în rețele de tip Microgrid

### 6.1. Introducere

În rețelele electrice de tip Microgrid (Figura 52) este important să existe posibilitatea de stocare a energiei electrice în diferite medii de stocare (acumulatori, supercondensatoare (SC), pile de combustie, etc), fiecare având densități de putere și de energie specifice. Pentru a dirija și a separa stocarea în aceste elemente este necesară o strategie de management energetic (EMS).

Strategiile de management energetic se pot împărți în două categorii: centralizate și descentralizate (Figura 53). Strategiile centralizate au o unitate centrală de procesare care prescrie referințele tuturor convertoarelor din rețea, având avantajul unui control mai precis [42]–[44].

Strategiile descentralizate au avantajul unei independenței crescute în rețea, fiecare convertor având strategia energetică programată în procesorul acestuia, nefiind necesar un protocol de comunicație între acestea [45]. Rețelele descentralizate pot fi ușor adaptabile, oricând se poate adăuga un nou element în rețea fără mari modificări pentru strategia de control. În multe cazuri strategiile descentralizate se pot centraliza într-un sistem comun, astfel obținând avantajele ambelor structuri [44].

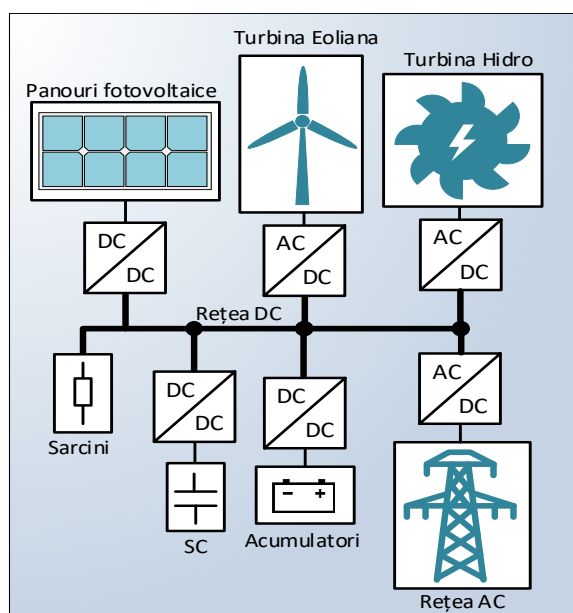


Figura 52. Structura de bază a unei rețele Microgrid.

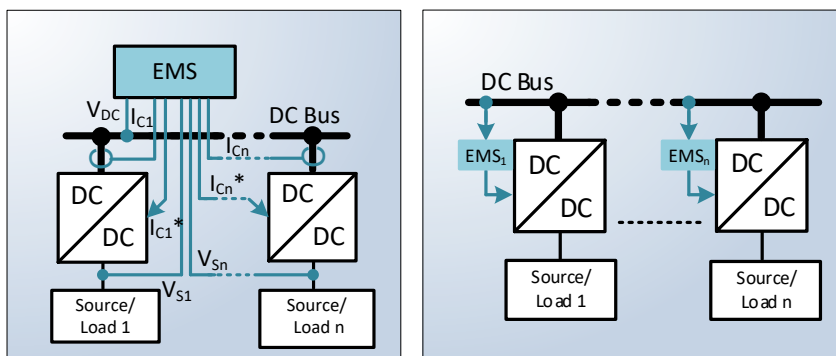


Figura 53. Strategii de management energetic centralizate (stânga) și descentralizate (dreapta)

Majoritatea strategiilor descentralizate se bazează pe controlul droop, care constituie proiectarea controlului unui convertor, astfel ca acesta să se comporte ca o sursă de tensiune cu o rezistență în serie la ieșire (Figura 54.a). Prin utilizarea controlului droop curenții din circuit se distribuie uniform între convertoare fără să fie nevoie ca acestea să comunice.

Metoda droop poate să fie centralizată (Figura 54.b) utilizând un singur EMS care atribuie referințe de tensiune diferite pentru fiecare convertor în parte, depinzând de starea de încărcare a elementelor de stocare (SOC).

Pentru o distribuție a curenților mai precisă, sau pentru a stabili limite de tensiune fixe pentru rețeaua de curent continuu, se poate folosi și o metodă droop neliniară ([46]–[49]), în care dependența curent-tensiune pentru impedanța virtuală este una neliniară (Figura 54.c).

## 6.2. Strategie propusă pentru Managementul Energetic pentru încărcarea unui Supercondensator în rețele de tip Microgrid

Strategia propusă este bazată pe metoda droop, cu rezistență și capacitate virtuală, deci o impedanță virtuală [50], [51]. Datorită impedanței virtuale se realizează o filtrare a puterii, astfel încât supercondensatorul se încarcă cu pulsurile de putere de frecvență mare, frecvențele mici fiind preluate de restul rețelei.

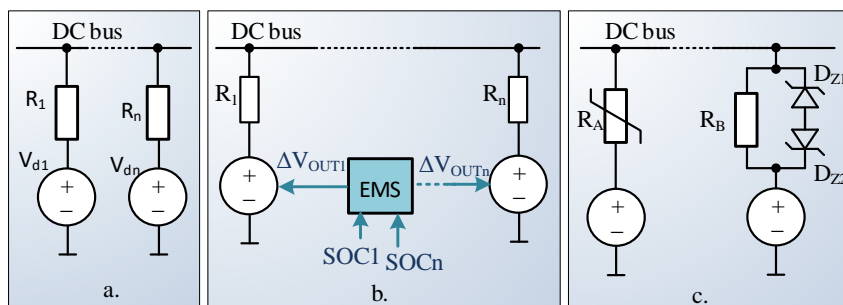


Figura 54. Control droop: a. Convențional; b. Centralizat; c. Neliniar.

Metoda propusă (Figura 55-dreapta) îmbunătățește metoda convențională, utilizând o rezistență neliniară, și astfel obține o frecvență de tăiere variabilă, în funcție de amplitudinea variației de tensiune de pe rețeaua de DC.

Caracteristica neliniară a rezistenței poate să aibă diferite forme, după cum se poate observa în Figura 56. Dependența poate să fie o funcție putere cu exponent număr real, sau funcție arctangentă fiind mai ușor de implementat într-un procesor.

Din rezultatele de simulare se poate observa că influența supercondensatorului în rețea este cu atât mai mare cu cât variația de tensiune de pe bus este mai mare. În Figura 57 se poate observa comparația unei strategii convenționale cu impedanță virtuală și metoda propusă. În partea stângă, variația tensiunii de pe bus este mult mai mică astfel că strategia propusă are o influență redusă asupra rețelei. În partea dreaptă variația de tensiune aplicată este mai mare, astfel că influența SC-ului este și ea mai crescută. În funcție de cum se ajustează parametrii impedanței virtuale, strategia va avea o influență mai mare sau mai mică asupra rețelei, având astfel avantajul configurabilității.

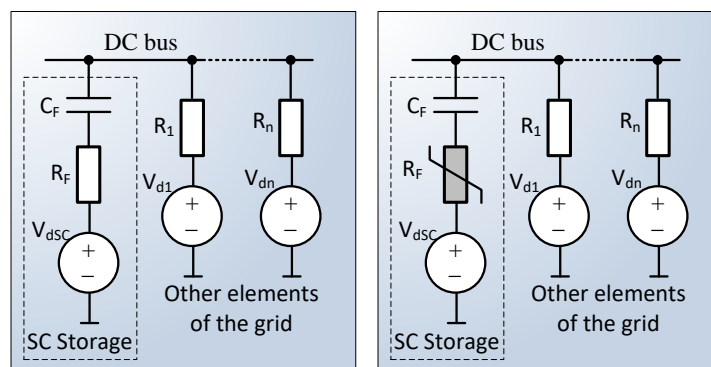


Figura 55. Schema structurii de management energetic convențională [50], [51] (stânga) și propusă [52] (dreapta).

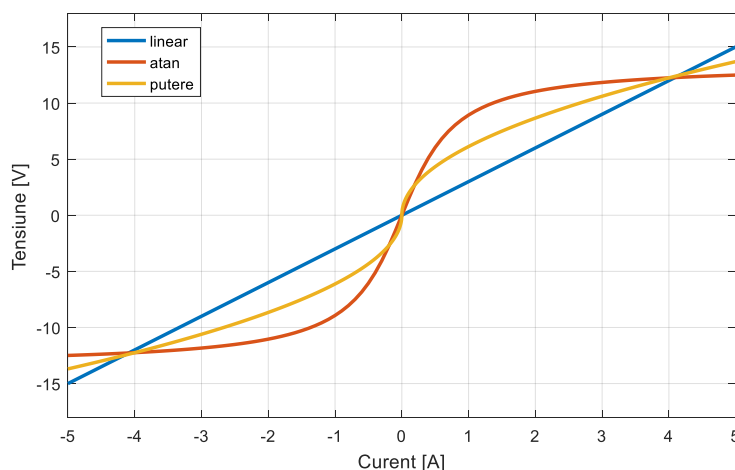


Figura 56. Dependențe neliniare curent-tensiune propuse pentru strategia de încărcare/descărcare a Supercondensatorului.

Dependența matematică a strategiei convenționale și a celei propuse se pot observa în relațiile (6.1) respectiv (6.2).

$$V_{DCbus} = \frac{1}{s \cdot C_F} \cdot I + R_F \cdot I + V_{dsc} \quad (6.1)$$

$$V_{DCbus} = \frac{1}{s \cdot C_F} \cdot I + k_1 \cdot \text{atan}(k_2 \cdot I) + V_{dsc} \quad (6.2)$$

Rezultatele experimentale (Figura 58 - Figura 59) confirmă considerentele teoretice. În experiment se compară strategia standard cu cea propusă. În plus, la momentul de timp 0 se aplică un vârf de tensiune pentru a observa influența acestuia.

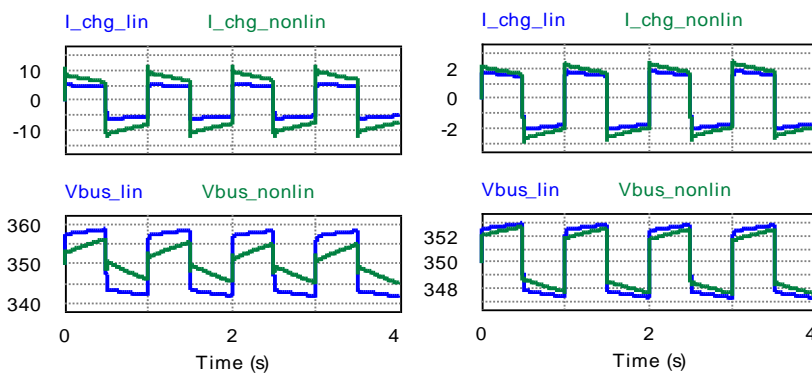


Figura 57. Rezultate de simulare ale strategiei propuse.

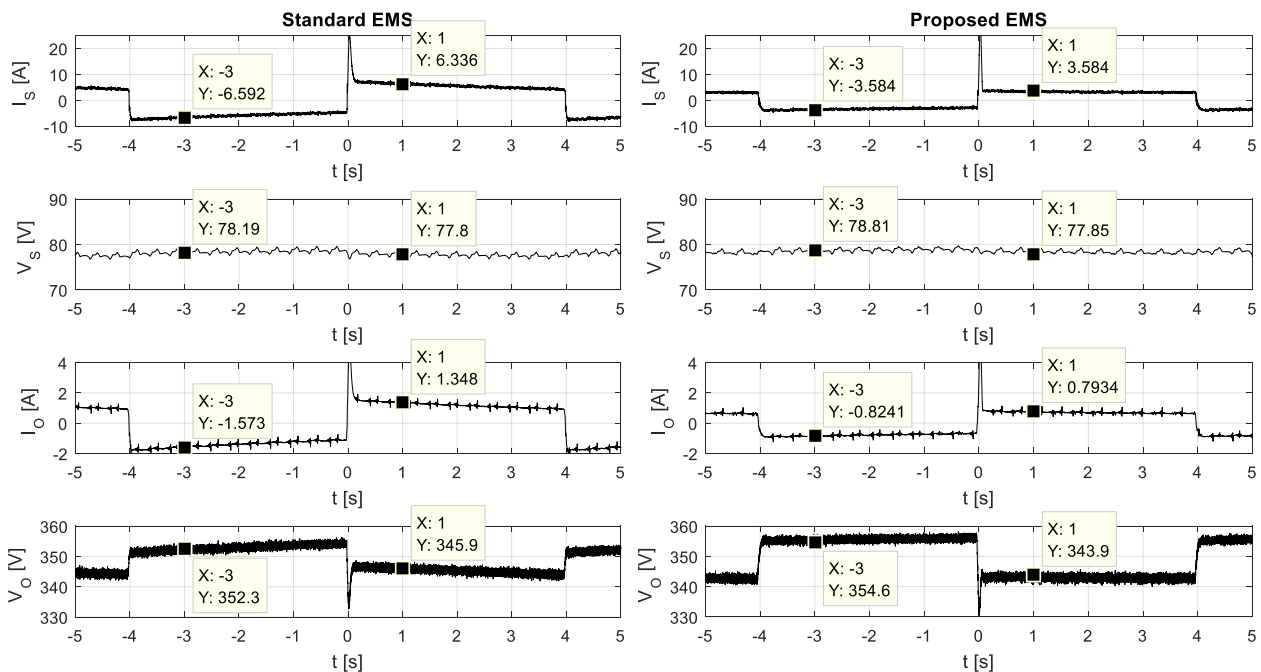


Figura 58. EMS convențională (stânga) VS EMS propusă (dreapta)  $\Delta V = \pm 10$  V.

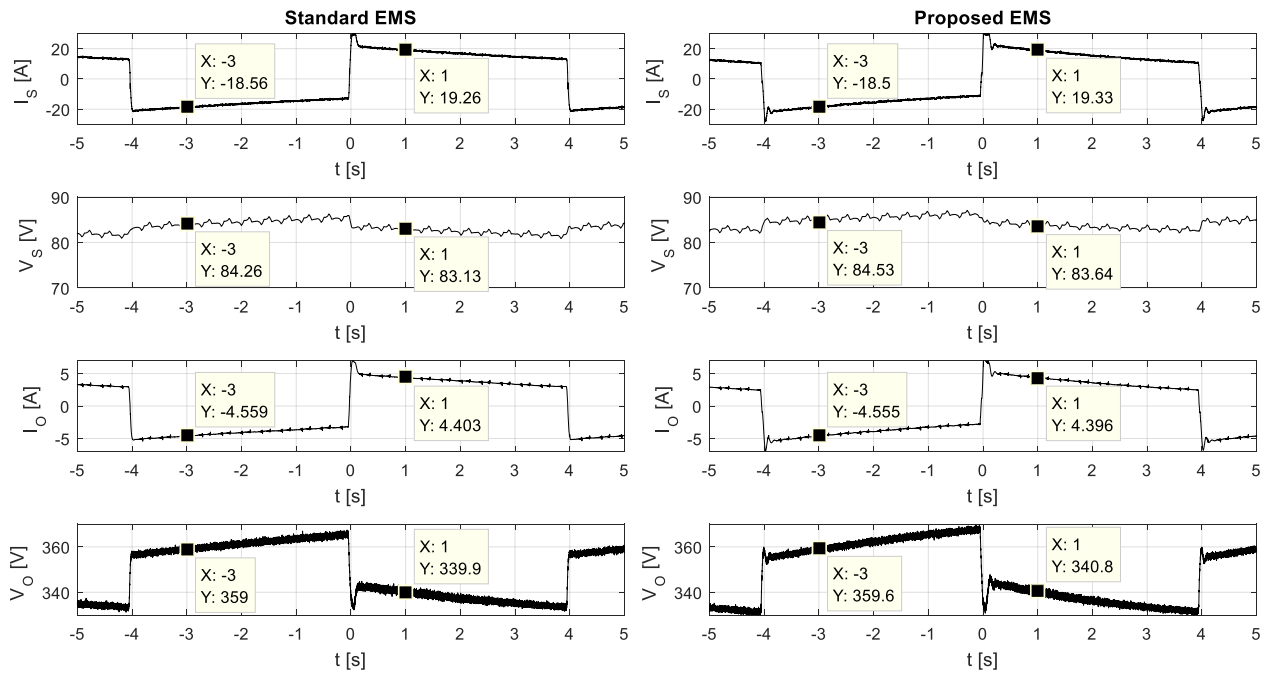


Figura 59. EMS convențională (stânga) VS EMS propusă (dreapta)  $\Delta V = \pm 30$  V

## 7. Generatoare electrice speciale pentru conversia energiilor regenerabile

### 7.1. Introducere

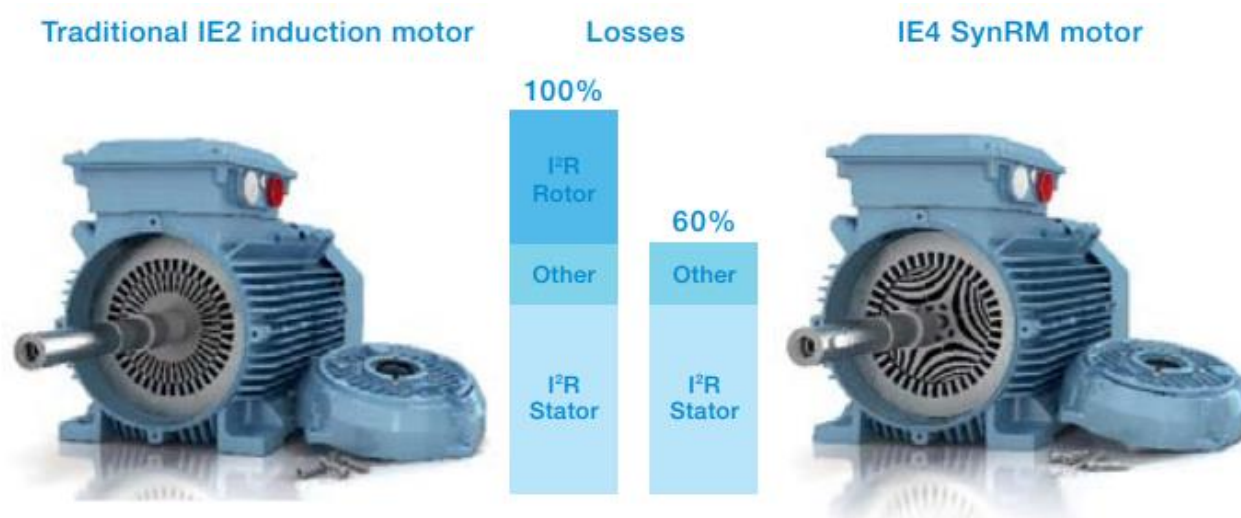
În prezent energia electrică reprezintă un element cheie în ceea ce privește prosperitatea într-un mediu mai curat. Cererea de energie electrică pe cap de locuitor (kWh/locuitor) va continua să crească în următorii ani, mai ales în țările cu un număr mare de locuitori a căror economie se află în curs de dezvoltare. Producerea energiei electrice, la nivel global, se face în mare parte prin arderea combustibililor fosili contribuind la creșterea concentrației în atmosferă, a gazelor precum dioxidul de sulf, oxizii de azot, hidrocarburi, dioxid de carbon, etc. Efectul de seră produs în urma acestui proces este direct responsabil pentru încălzirea globală [53].

În acest sens, în noiembrie 2016, a intrat în vigoare Acordul Global de la Paris privind schimbările climatice, având ca rezultat creșteri considerabile ale implementării sistemelor de producere a energiei electrice utilizând surse regenerabile bazate pe energia solară, eoliană, geotermală, marină, hidro și bioenergie. [54] Dintre cele menționate, la sfârșitul anului 2015, sistemele hidro ocupă primul locul furnizând 71% (1209 [GW] –putere instalată) din totalul de energie electrică obținută din surse regenerabile, iar sistemele eoliene furnizând 7% (432 [GW] – putere instalată). O prognoză bazată pe planurile actuale de politică, indică ca până în 2030 puterea instalată în sisteme eoliene ar ajunge până la 977 [GW] dintre care 905 [GW] onshore și 72 [GW] offshore [55].

La nivel global, în sectorul industrial, mașinile electrice consumă aproximativ 40% din energia electrică totală produsă, iar în UE aproximativ 70%. În sectorul terțiar, sistemele bazate pe acționări electrice utilizează aproximativ 1/3 din totalul de energie consumată. Chiar dacă în prezent sunt disponibile o gamă largă de motoare cele mai utilizate sunt motoarele asincrone cu rotor în colivie [56].

Fie că ne referim la producerea sau la consumul energiei electrice, este clar faptul că se impune utilizarea unor mașini electrice a căror eficiență trebuie să fie ridicată pentru reducerea consumului de energie electrică și astfel a impactului asupra mediului înconjurător. Astfel că reducerea pierderilor de putere a acestora este esențială mai ales a celor din rotor în vederea creșterii eficienței. Prin urmare cercetătorii și-au îndreptat atenția către motoarele brushless iar dintre acestea motorul sincron cu reluctanță variabilă prezintă un interes ridicat. Acesta are aceeași construcție a statorului ca a motorului de inducție asincron, diferența fiind dată de rotor (Figura 60) [57].





IE4 SynRM motor reduces losses up to 40 %

Figura 60. Gabarit și eficiență IM vs SRM [58]

În general există trei tipuri de rotoare pentru mașinile sincrone cu reluctanță variabilă [57], [59]:

- Rotor segmentat (Figura 61);
- Rotor cu bariere de flux (Figura 62);
- Rotor cu tole laminate axial (ALA) (Figura 63).

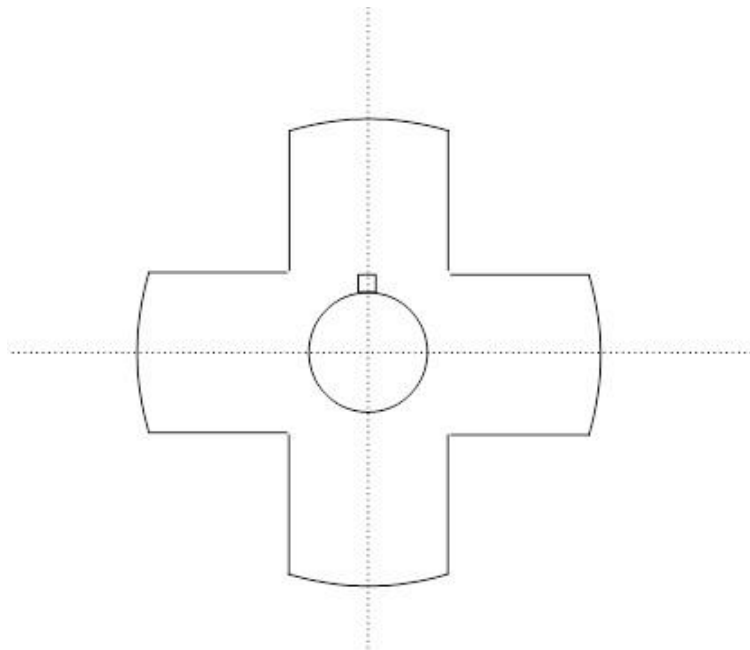
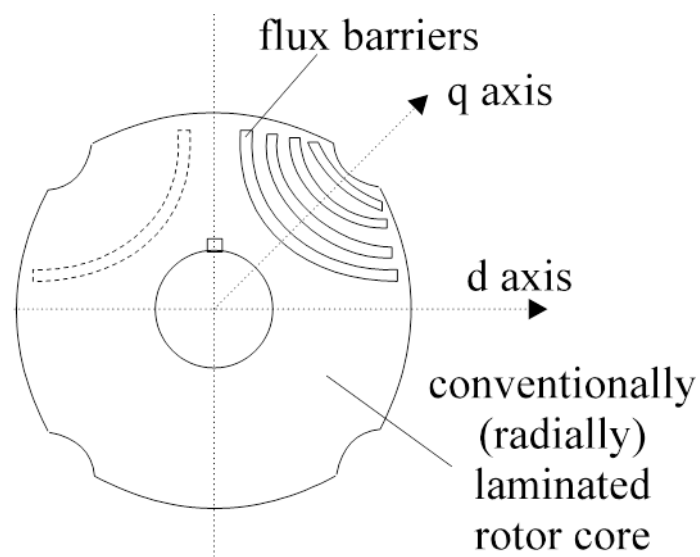


Figura 61. Rotor segmentat [60]



$2p=4$  poles

Figura 62. Rotor cu bariere de flux [60]

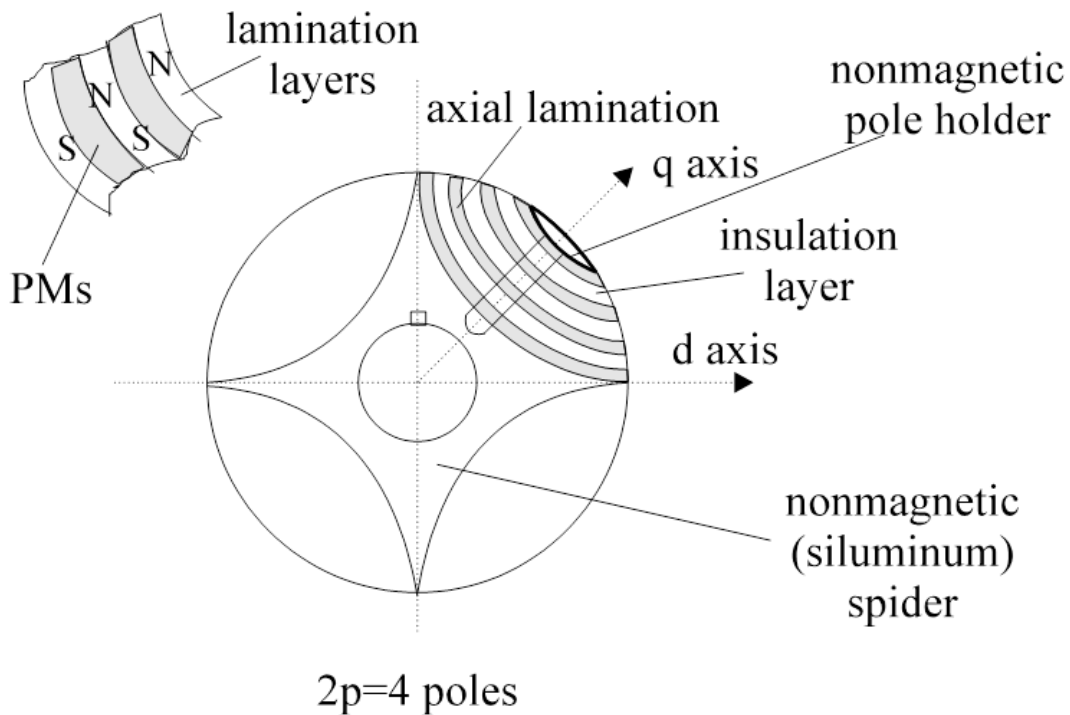


Figura 63. Rotor cu tole laminate axial (ALA) [60]

Numărul de perechi de poli poate fi 2,4..., dar după cum experiența arată, pentru a obține o bună densitate de cuplu și un factor de putere acceptabil, se cere ca pasul polar raportat la grosimea întrefierului să fie mai mare de 150 și raportul inductanțelor de magnetizare [61]:

$$\frac{L_{dm}}{L_{qm}} > 5 \div 10 \quad (7.1)$$

$L_{dm}$  – inductanța de magnetizare după axa d;

$L_{qm}$  – inductanța de magnetizare după axa q.

Obținerea raportului ridicat dintre inductanțe se poate obține cu ajutorul rotoarelor de tip ALA. Pentru realizarea unei RSM cu rotor de tip ALA se folosesc tole de transformator montate în alternanță cu elemente izolatoare electric și magnetic, pachetul astfel realizat fiind rigidizat mecanic, în funcție de numărul de perechi de poli ai mașinii. Pentru pornirea directă la rețea și autosincronizare, pachetele de tole pot fi alternate cu fâșii conductoare (aluminu sau cupru), scurtcircuitate la capăt. [60], [62]

## 7.2. Descrierea mașinii electrice

Având la bază studiul bibliografic, în acest proiect s-a ales o mașină electrică sincronă cu reluctanță variabilă cu rotor de tip ALA fără magneți permanenți, ce va fi utilizată pentru conversia energiei eoliene/hidro, având parametrii din Tabel 6.

Tabel 6. Parametrii nominali ai RSM

Puterea nominală	$P_N = 4$ [kW];
Tensiunea nominală	$U_N = 400$ [V], conexiune stea;
Curentul nominal	$I_N = 9.56$ [A];
Randamentul	$\eta = 86.6$ [%];
Factorul de putere	$\cos \varphi = 0,7$ ;
Turația nominală	$n_N = 1500$ [rpm];
Frecvența nominală	$f_N = 50$ [Hz];
Rezistența statorică	$R_s = 1,2$ [ $\Omega$ ];
Inductanța de magnetizare după axa d	$L_d = 0,2166$ [H];
Inductanța de magnetizare după axa q	$L_q = 0,027$ [H].

Funcționarea mașinii sincrone cu reluctanță variabilă, prezentată în Figura 64, este descrisă de următoarele ecuații [59], [60]:

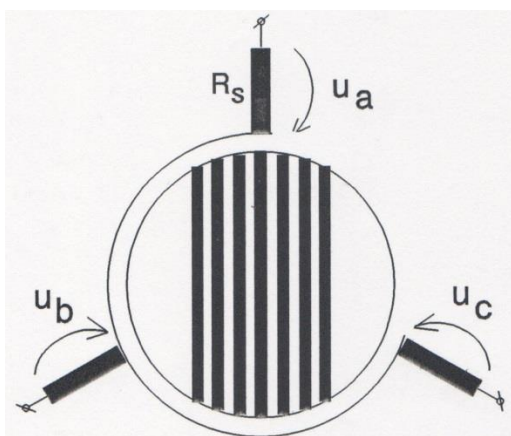


Figura 64. Mașină sincronă reactivă în coordonatele fazelor [60]

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = v_a - R_s i_a \quad (7.2)$$

$$\frac{d\Psi_b}{dt} = v_b - R_s i_b \quad (7.3)$$

$$\frac{d\Psi_c}{dt} = v_c - R_s i_c \quad (7.4)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = |L_{abc}(\theta)| \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

$$|L_{abc}(\theta)| = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

$$T_{em} = \frac{p_1}{2} |i_a \quad i_b \quad i_c| \left| \frac{\partial L_{abc}(\theta)}{\partial \theta} \right| \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

$\Psi_{abc}$  – fluxul total corespunzător fazelor a, b, c;

$v_{abc}$  – tensiunile corespunzătoare fazelor a, b, c;

$i_{abc}$  – curenții corespunzători fazelor a, b, c;

$R_s$  – rezistența statorică;

$L_{abc}$  – inductanțele fazelor a, b, c în funcție de poziția rotorului;

$T_{em}$  – cuplul electromagnetic;

$p_1$  – numărul de perechi de poli;

$\theta$  – poziția rotorului.

### 7.3. Schema de control

Schema de control este prezentată principial în Figura 65., care descrie controlul unei mașini electrice cu reluctanță variabilă, având ca mărimi de reacție poziția și viteza unghiulară măsurată (conexiunea 1) sau determinată din tensiuni și curenți cu ajutorul unui observator de poziție și viteză (conexiunea 2).

Controlul curenților s-a realizat în coordonate sincrone (dq), utilizând modelul matematic prezentat în continuare [60], [63]:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = V_d - R_s I_d + \Psi_q \omega_1 \quad (7.8)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = V_q - R_s I_q - \Psi_d \omega_1 \quad (7.9)$$

$$T_{em} = p_1(I_q \Psi_d - I_d \Psi_q) \quad (7.10)$$

$$J \frac{d\omega_1}{dt} = T_{em} - T_{Load} - T_{Frezare} \quad (7.11)$$

$$I_d = \frac{\Psi_d}{L_d} \quad (7.12)$$

$$I_q = \frac{\Psi_q}{L_q} \quad (7.13)$$

$$V_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ V_a \cos(p_1 \theta) + V_b \cos\left(p_1 \theta - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \cos\left(p_1 \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (7.14)$$

$$V_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ V_a \sin(p_1 \theta) + V_b \sin\left(p_1 \theta - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \sin\left(p_1 \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (7.15)$$

Pe baza schemei de control din Figura 65, s-a elaborat modelul de simulare în Matlab/Simulink a sistemului mașină electrică (RSM), mașină de antrenare (IM), convertor static, subsistemul de control (Figura 66). Acesta a fost creat astfel încât să faciliteze implementarea ulterioară pe standul experimental.

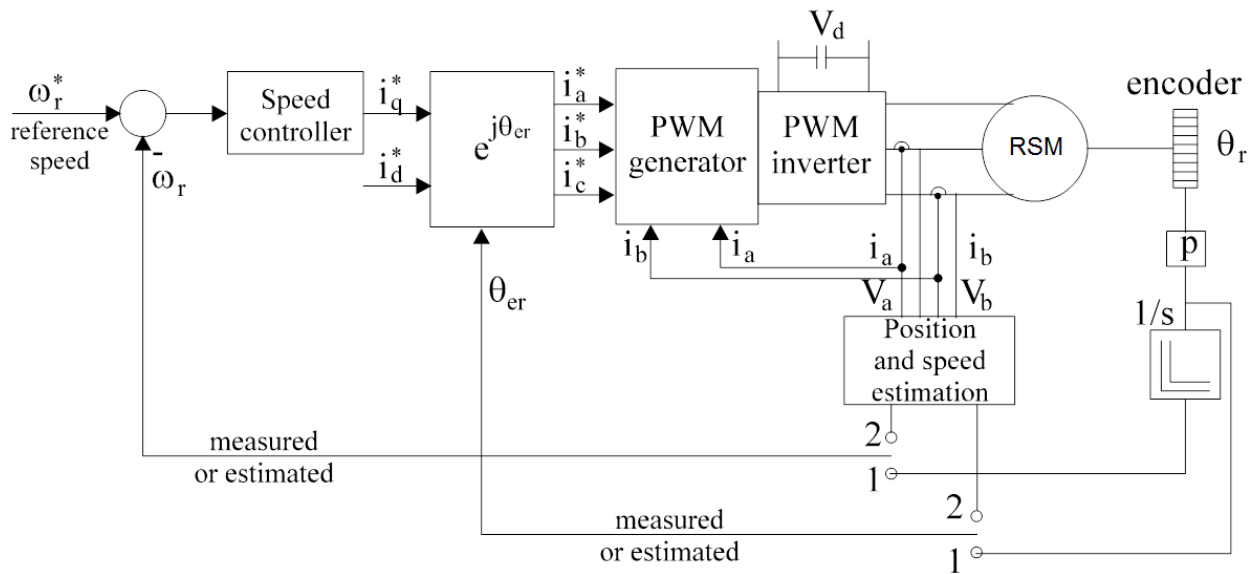


Figura 65. Schema de control

Correspondența dintre modelul ortogonal și mașina reală se face aplicând matricea Park:

$$|P(\theta)| = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

$$|a \ b \ c|^T = |P(\theta)|^T |d \ q \ 0|^T \quad (7.17)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} [I_d \cos(p_1\theta) - I_q \sin(p_1\theta)] \quad (7.18)$$

$$I_b = \sqrt{\frac{2}{3}} [I_d \cos(p_1\theta - \frac{2\pi}{3}) - I_q \sin(p_1\theta - \frac{2\pi}{3})] \quad (7.19)$$

$$I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} [I_d \cos(p_1\theta + \frac{2\pi}{3}) - I_q \sin(p_1\theta + \frac{2\pi}{3})] \quad (7.20)$$

### 7.4. Modelul sistemului de control

Pe baza schemei de control din Figura 65, s-a elaborat modelul de simulare în Matlab/Simulink a sistemului mașină electrică (RSM), mașină de antrenare (IM), convertor static, subsistemul de control (Figura 66). Acesta a fost creat astfel încât să faciliteze implementarea ulterioară pe standul experimental.

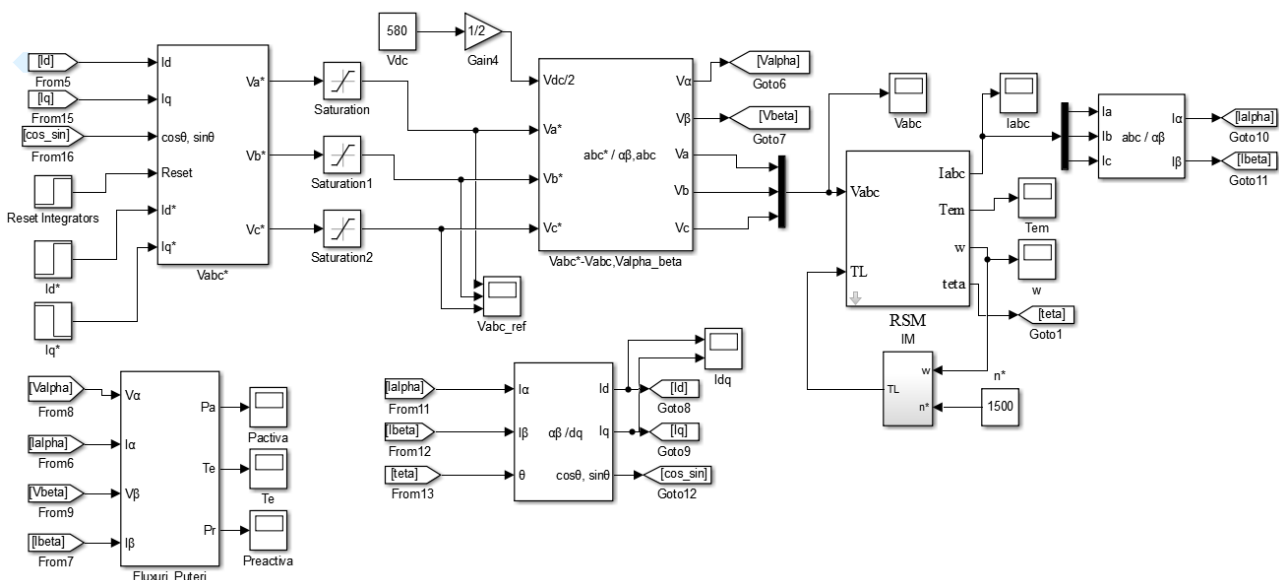


Figura 66. Modelul de simulare Matlab/Simulink

#### 7.4.1. Modelul mașinii sincrone cu reluctanță variabilă

Pe baza ecuațiilor mașinii (7.8) - (7.20) s-a implementat modelul mașinii în Matlab/Simulink prezentat în Figura 67., având ca mărimi de intrare: tensiunile de alimentare ( $V_{abc}$ ), și cuplul rezistent ( $T_L$ ), iar ca mărimi de ieșire: curenții aferenți celor trei faze ( $I_{abc}$ ), cuplul electromagnetic ( $T_{em}$ ), viteza unghiulară ( $\omega$ ), poziția rotorului ( $\theta$ ).



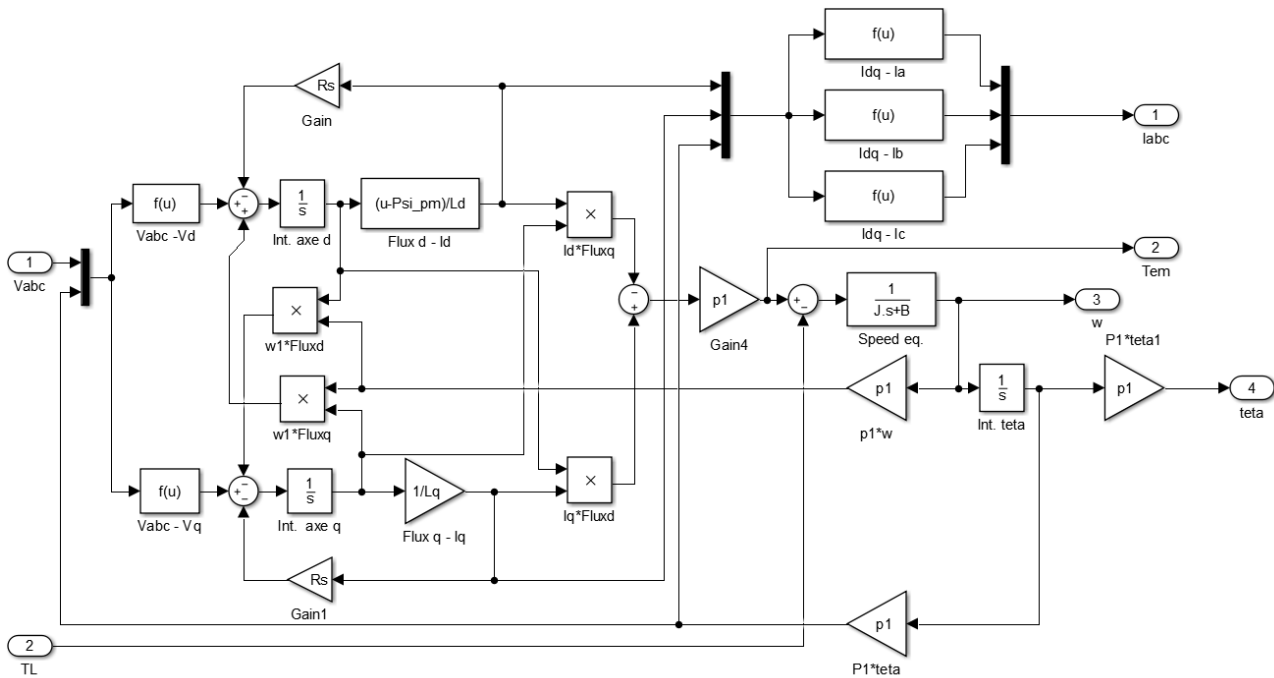


Figura 67. Modelul Matlab/Simulink al mașinii sincrone cu reluctanță variabilă

#### 7.4.2. Subsistemul de control

Sistemul prezentat în Figura 68. este bazat pe două regulatoare de curent în coordonatele dq, fiecare fiind de tip proporțional integrator (PI). Ieșirea reguletoarelor reprezintă referințele de tensiune pentru inverter. Ecuațiile pentru reguletoarele de curent se pot observa în (7.21), (7.22), iar ecuațiile aferente transformării tensiunilor din coordonatele dq în coordonatele  $\alpha\beta$  sunt date în (7.23)(7.24) [60]. Blocul de reset se folosește pentru sincronizarea (resetarea) integratoarelor cu simularea.

$$V_d^* = k_p(I_d^* - I_d) + k_i \int (I_d^* - I_d) dt \quad (7.21)$$

$$V_q^* = k_p(I_q^* - I_q) + k_i \int (I_q^* - I_q) dt \quad (7.22)$$

$$V_\alpha^* = \sqrt{\frac{2}{3}} [V_d^* \cos(p_1 \theta) + V_q^* \sin(p_1 \theta)] \quad (7.23)$$

$$V_\beta^* = \sqrt{\frac{2}{3}} [V_d^* \sin(p_1 \theta) - V_q^* \cos(p_1 \theta)] \quad (7.24)$$

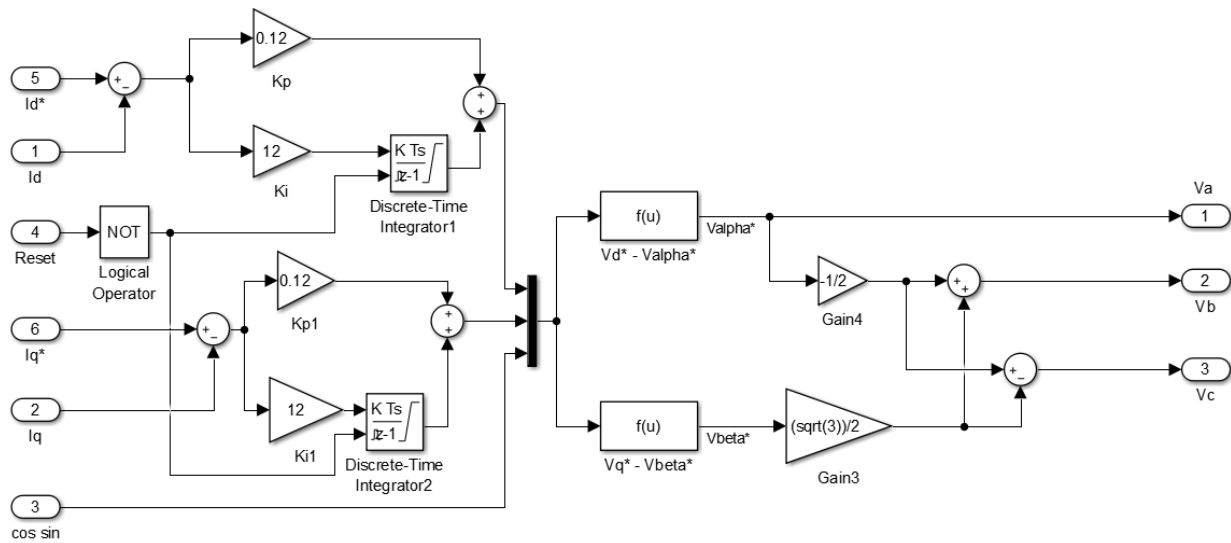


Figura 68. Subsistemul de control

#### 7.4.3. Determinarea parametrilor energetici (P, Q, cos φ)

Determinarea parametrilor energetici: puterea activă (P), puterea reactivă (Q) și a factorului de putere (cos φ) a fost implementată utilizând ecuațiile (7.25) - (7.28) și modelul de simulare a acestora este dat în Figura 69.

$$P = \frac{3}{2}(V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta}) \quad (7.25)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_{\beta}I_{\alpha} - V_{\alpha}I_{\beta}) \quad (7.26)$$

$$T_{em} = p_1 \frac{3}{2}(\Psi_{\alpha}I_{\beta} - \Psi_{\beta}I_{\alpha}) \quad (7.27)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (7.28)$$

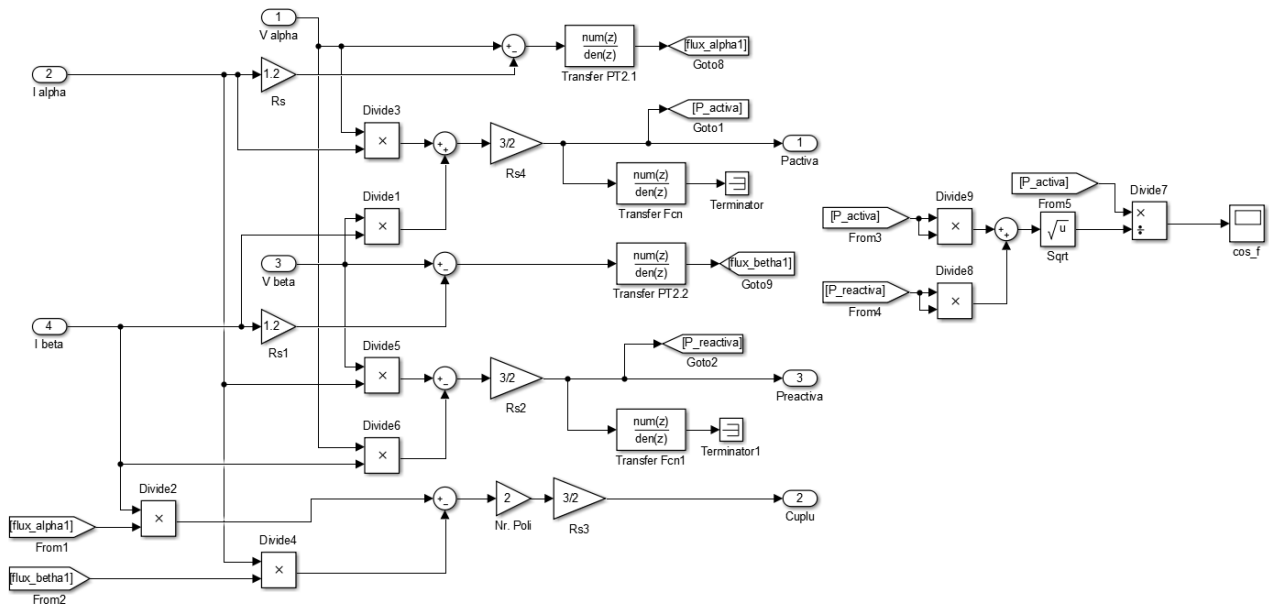


Figura 69. Determinarea parametrilor energetici

### 7.5. Rezultatele de simulare

Timpul de simulare a fost ales pentru a se putea urmări procesele tranzitorii la variația prescrierilor de curent. (Figura 70. - Figura 77.). În al doilea set de grafice (Figura 78. - Figura 85.) au fost redată mărimea caracteristică pentru câteva perioade ale tensiunii de alimentare. Curenții de referință au fost astfel aleși, încât să se obțină regimul nominal al generatorului.

Rezultatele de simulare susțin obținerea performanțelor propuse prin metoda de control aleasă.

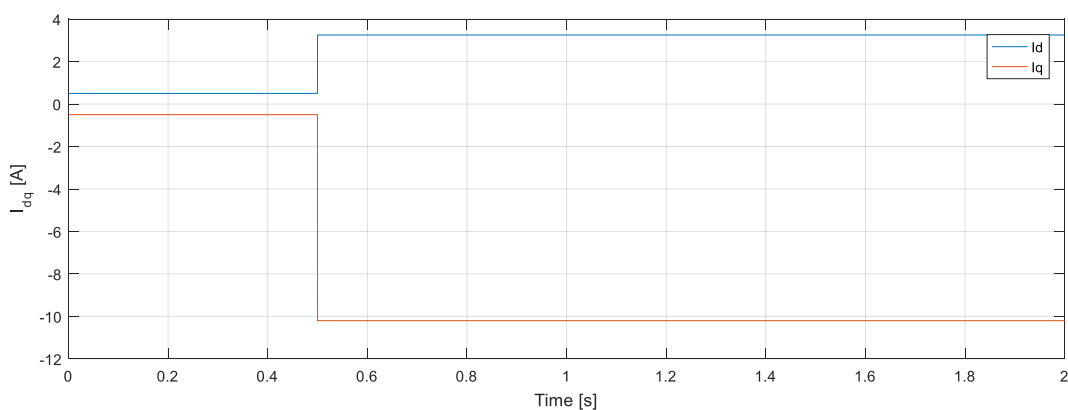


Figura 70. Curenții de referință Id<sub>q</sub>

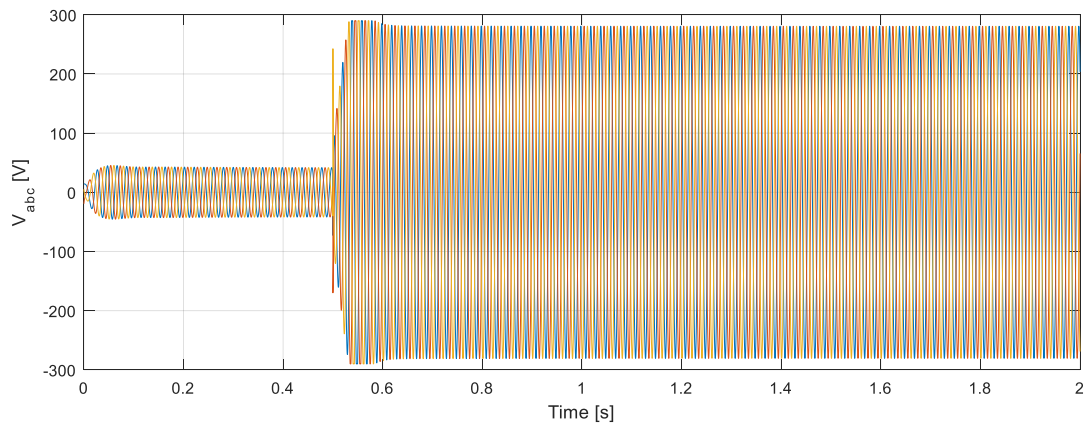


Figura 71. Tensiunile de pe fazele a,b,c

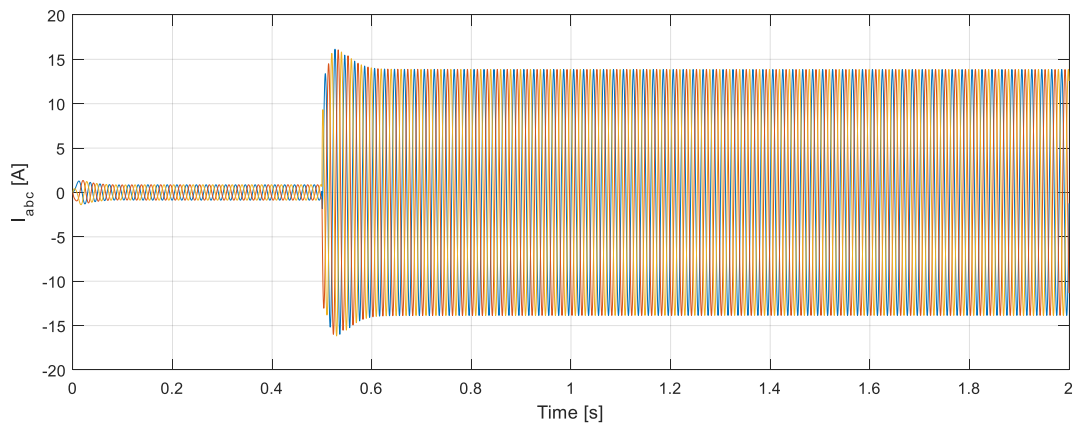


Figura 72. Curenții de pe fazele a,b,c

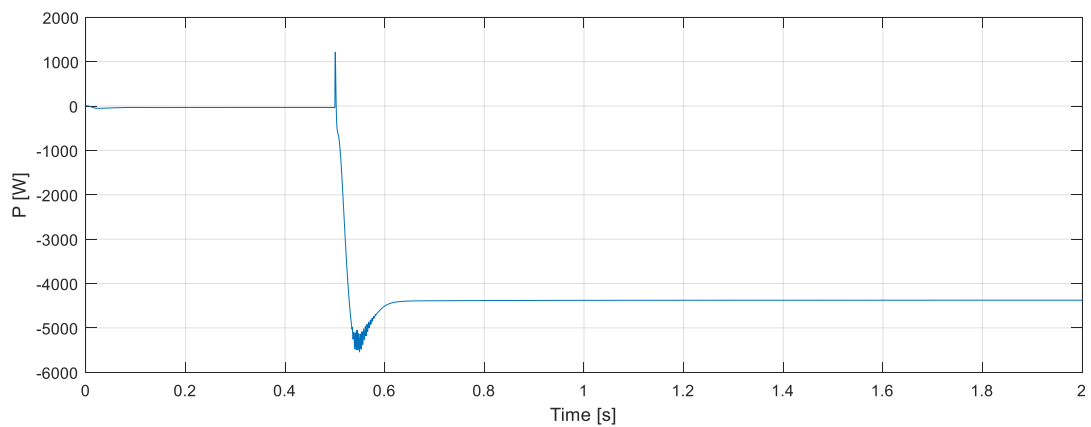


Figura 73. Puterea activă

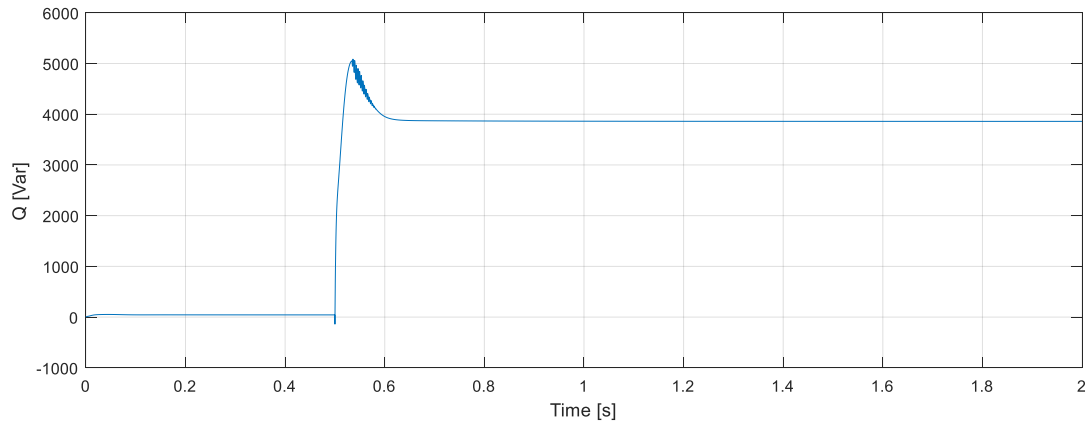


Figura 74. Puterea reactivă

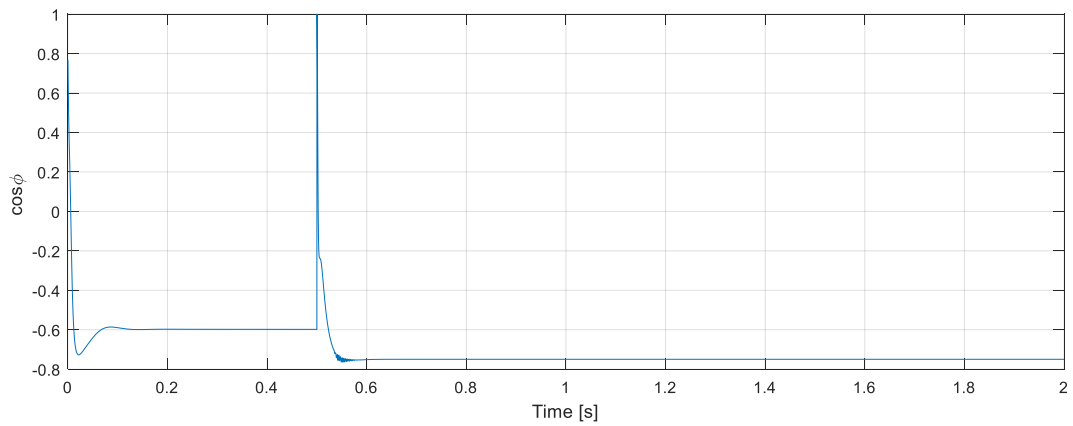


Figura 75. Factorul de putere

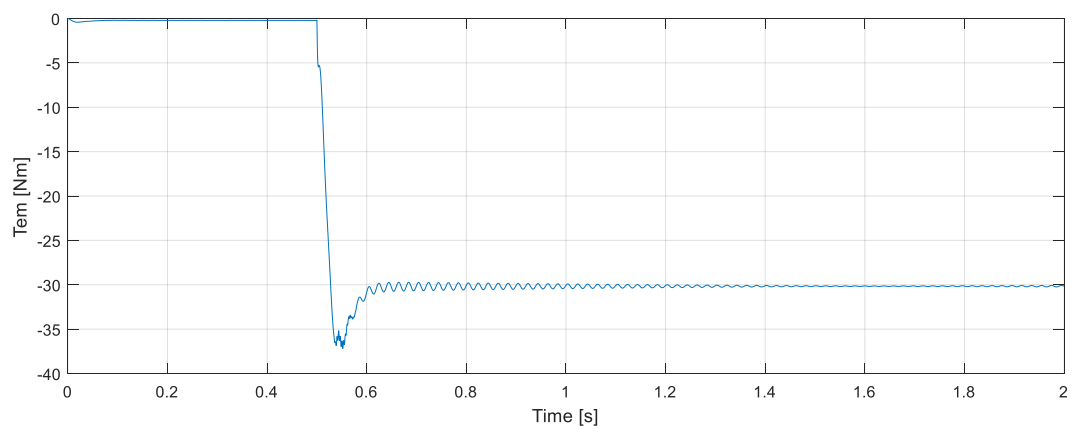


Figura 76 Cuplul electromagnetic

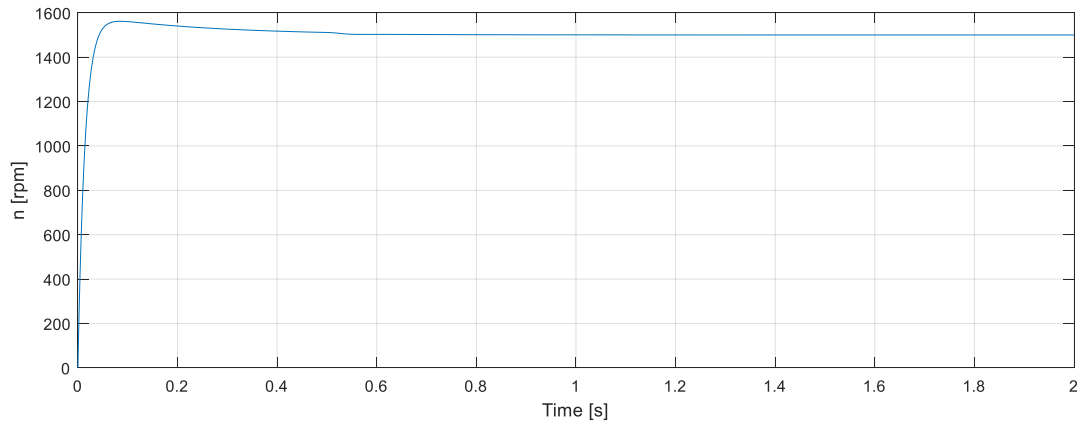


Figura 77 Viteza unghiulară

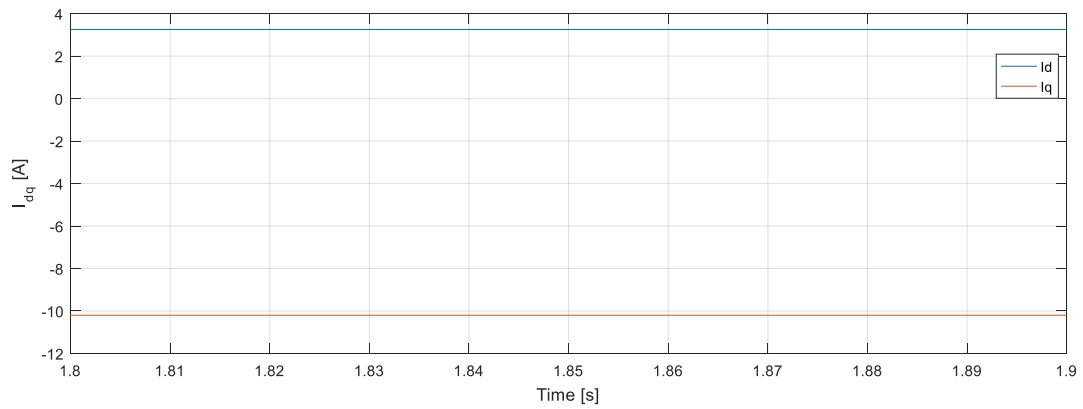


Figura 78. Curenții de referință  $I_{d,q}$  pe o perioadă de 0,1 [s]

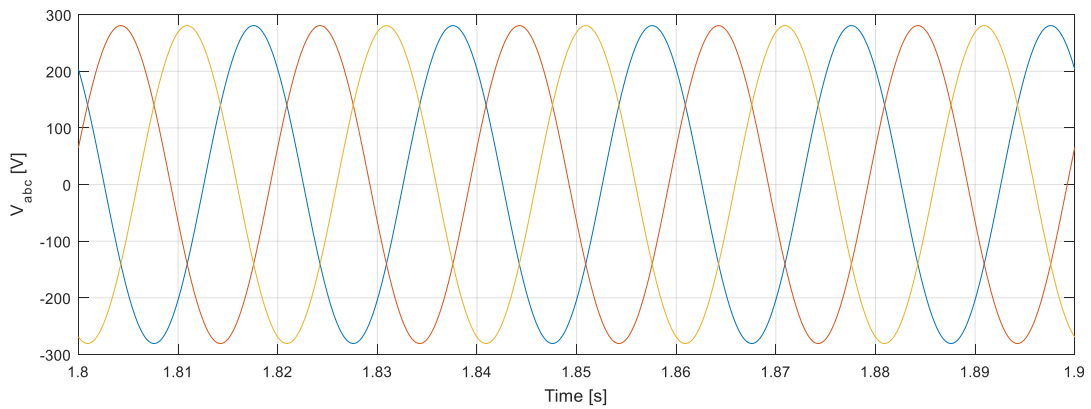


Figura 79. Tensiunile de pe fazele a,b,c pe o perioadă de 0,1 [s]

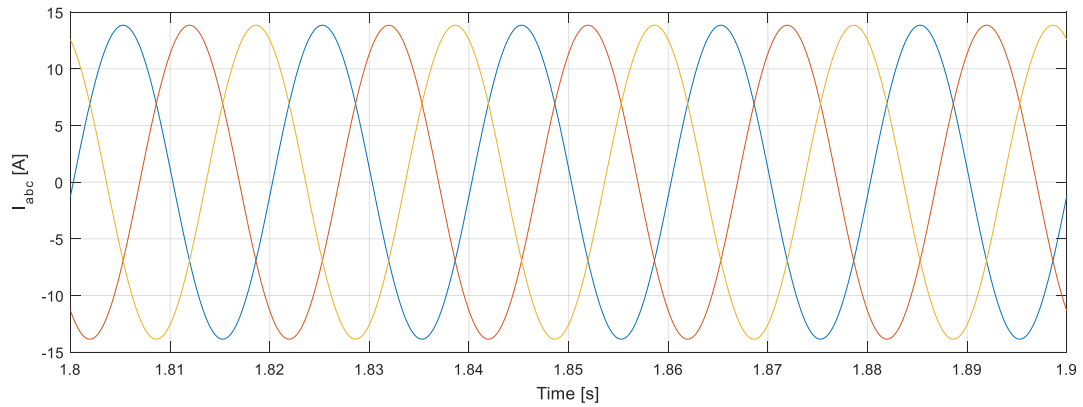


Figura 80. Curenții de pe fazele a,b,c pe o perioadă de 0,1 [s]

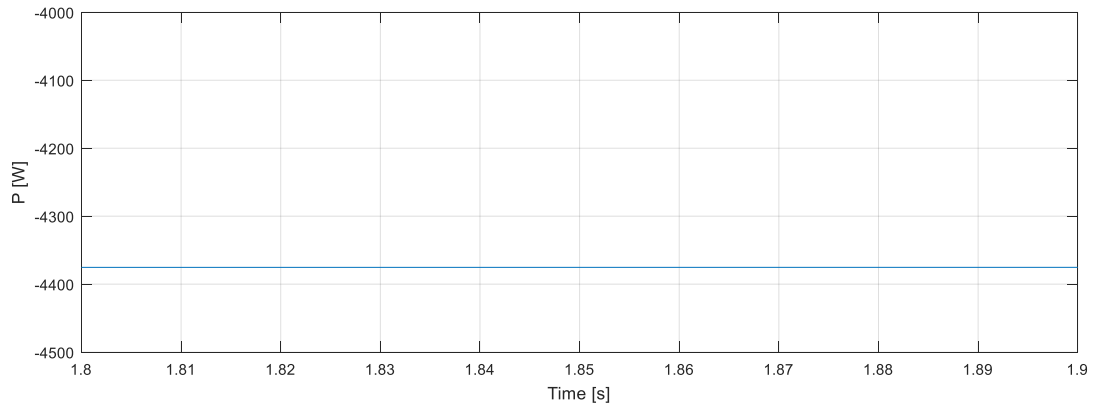


Figura 81. Puterea activă pe o perioadă de 0,1 [s]

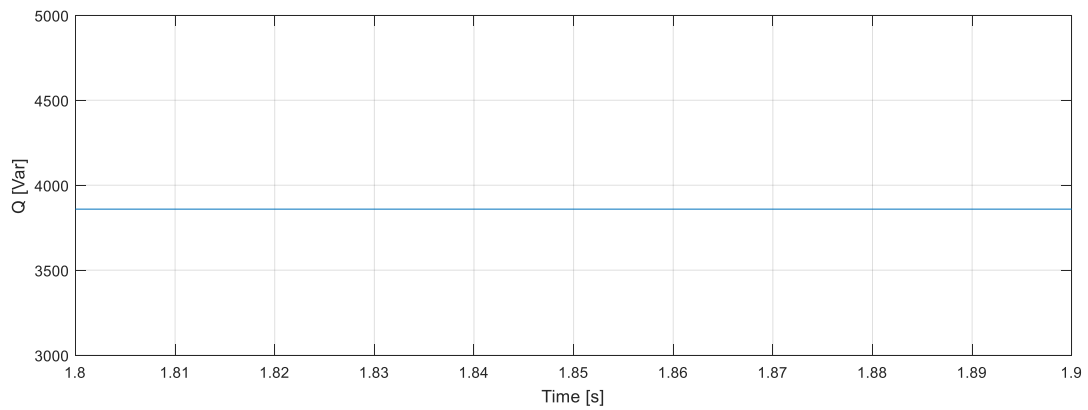


Figura 82. Puterea reactivă pe o perioadă de 0,1 [s]



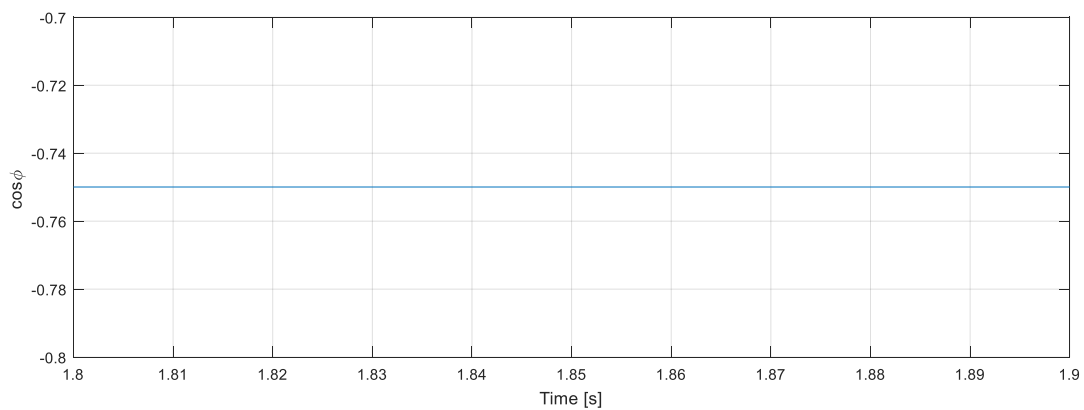


Figura 83. Factorul de putere pe o perioadă de 0,1 [s]

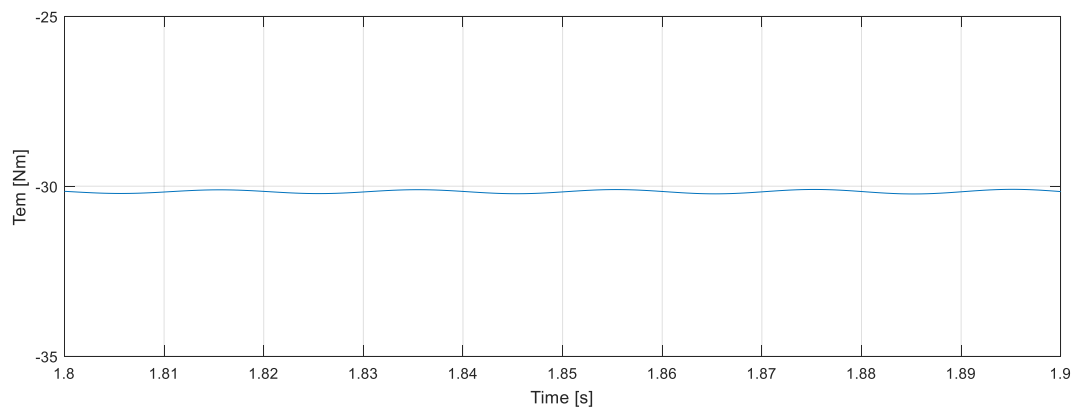


Figura 84. Cuplul electromagnetic pe o perioadă de 0,1 [s]

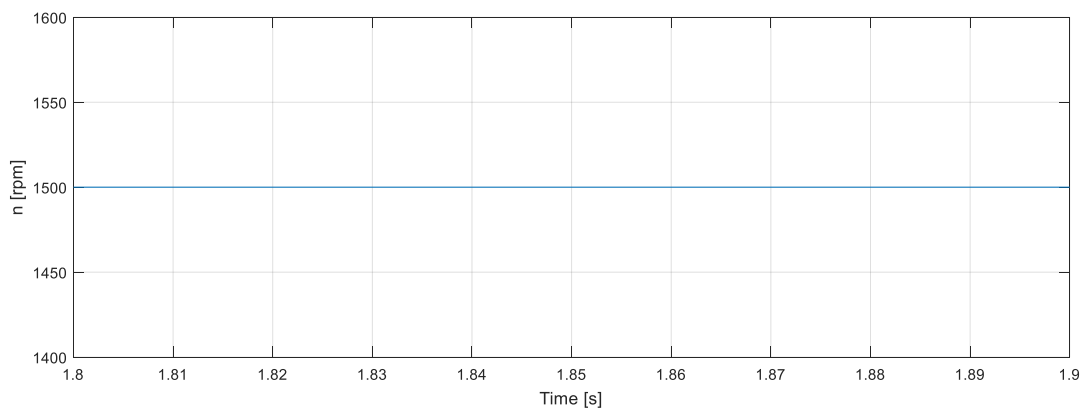


Figura 85. Turația pe o perioadă de 0,1 [s]

## 8. Modelarea Acumulatorilor Pb-Acid

Pentru a obține un model de simulare cât mai precis este important ca și modelul bateriilor de acumulatori să fie cât mai complex, astfel încât sistemul pe ansamblu să aibă o comportare cât mai apropiată de realitate.

Modelele echivalente propuse în literatură pentru aceste tipuri de baterii se sunt de mai multe tipuri. Un model standard ar fi modelul Thévenin (Figura 86), care conține o sursă de tensiune cu o rezistență serie, o grupare paralel RC (pentru a modela efectele supratensiunilor), componente prin care se încearcă simularea bateriei.

Unele modele sunt de ordin superior, pentru a putea simula cât mai bine funcționarea unei baterii (Figura 87). Există modele dinamice, neliniare în care se înglobează funcții complexe pentru elementele din circuit (Figura 88). Parametrii care apar în scheme sunt următorii:

- $E_m$  – tensiunea de gol
- $R_1$   $R_2$  – rezistențele la finalul descărcării
- $C_1$  – capacitate dinamică de regim tranzient
- $I_p$  – curent parazit
- $R_0$  – Rezistență internă

Unul dintre cele mai complexe modele este unul de ordin 3, în care se implementează o metodologie de calcul al parametrilor cu roi de particule și optimizare neliniară. Aceasta are o utilizare crescută pe toată gama de stări de încărcare și diferiți curenți (Figura 89).

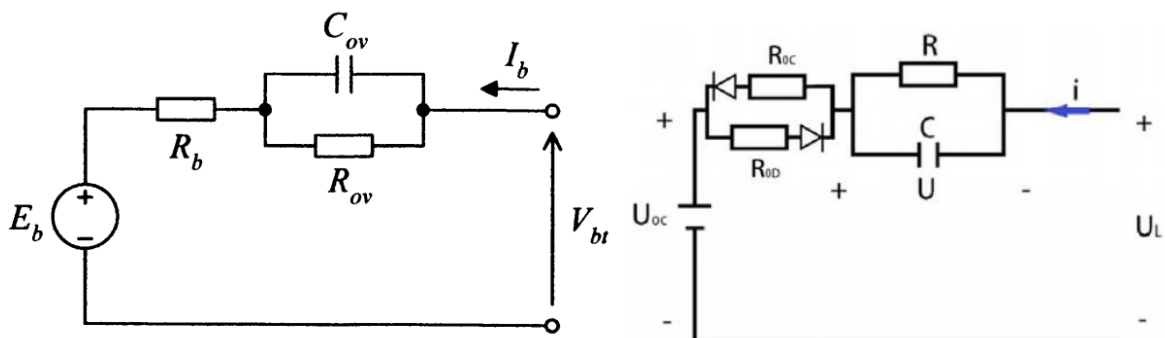


Figura 86. Modelul de baterie clasic Thévenin (stânga); cu histereză (dreapta).

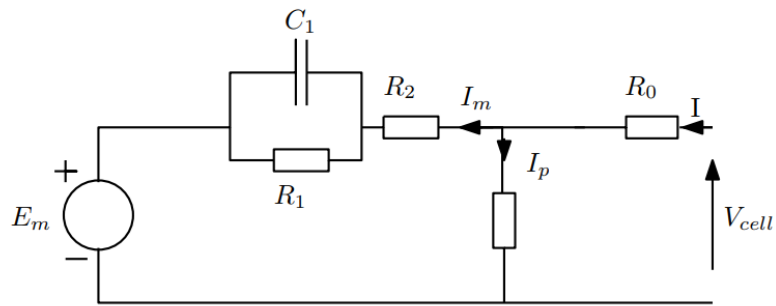


Figura 87. Model de baterie de ordin 3 [65].

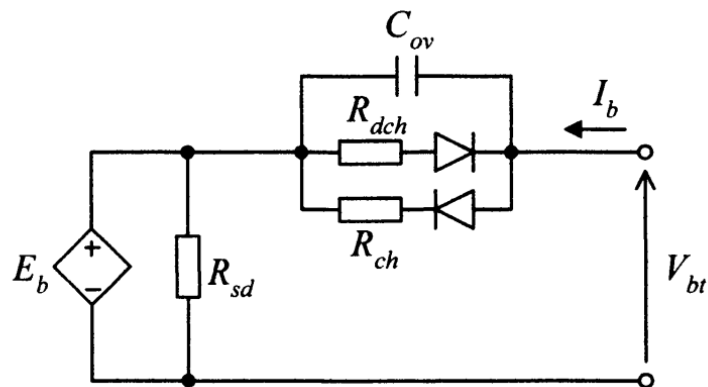


Figura 88. Model dinamic neliniar [65].

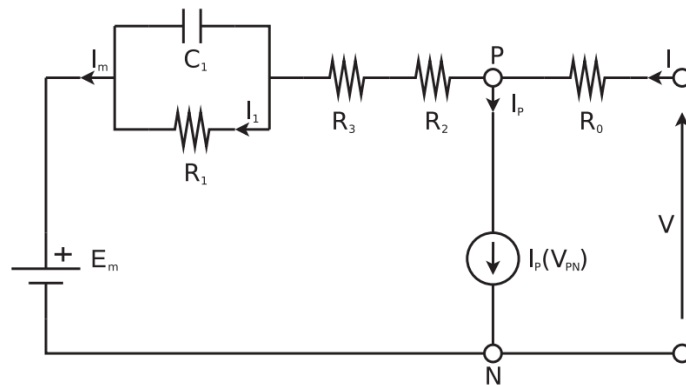


Figura 89. Model complex de ordin superior modificat [66].

Modelul de simulare ales utilizează ca intrări curentul și temperatura ambientală, și oferă ca ieșire tensiunea, starea de încărcare și temperatura electrolitului. Figura 90 ofera imaginea de ansamblu a modelului de simulare. Acesta se poate împărți în trei părți: un model termic (Thermal model), un model al capacității și pentru încărcare (Charge and capacity), și un model circuit echivalent.

Modelul capacității urmărește starea de încărcarea a bateriei (SOC), adâncimea de descărcare în funcție de curentul de descărcare (DOC) și capacitatea bateriei. Modelul capacității depinde de

temperatură și de curentul de descărcare. Ecuțiile circuitului echivalent (Figura 92) simulează funcționarea acestui circuit, acesta depinzând de curentul bateriei și câteva elemente neliniare de circuit. Pe baza modelului de simulare, și a schemei echivalente (Figura 91), s-au obținut rezultatele din Figura 93 până la Figura 104, pe baza curentului dreptunghiular din Figura 96.

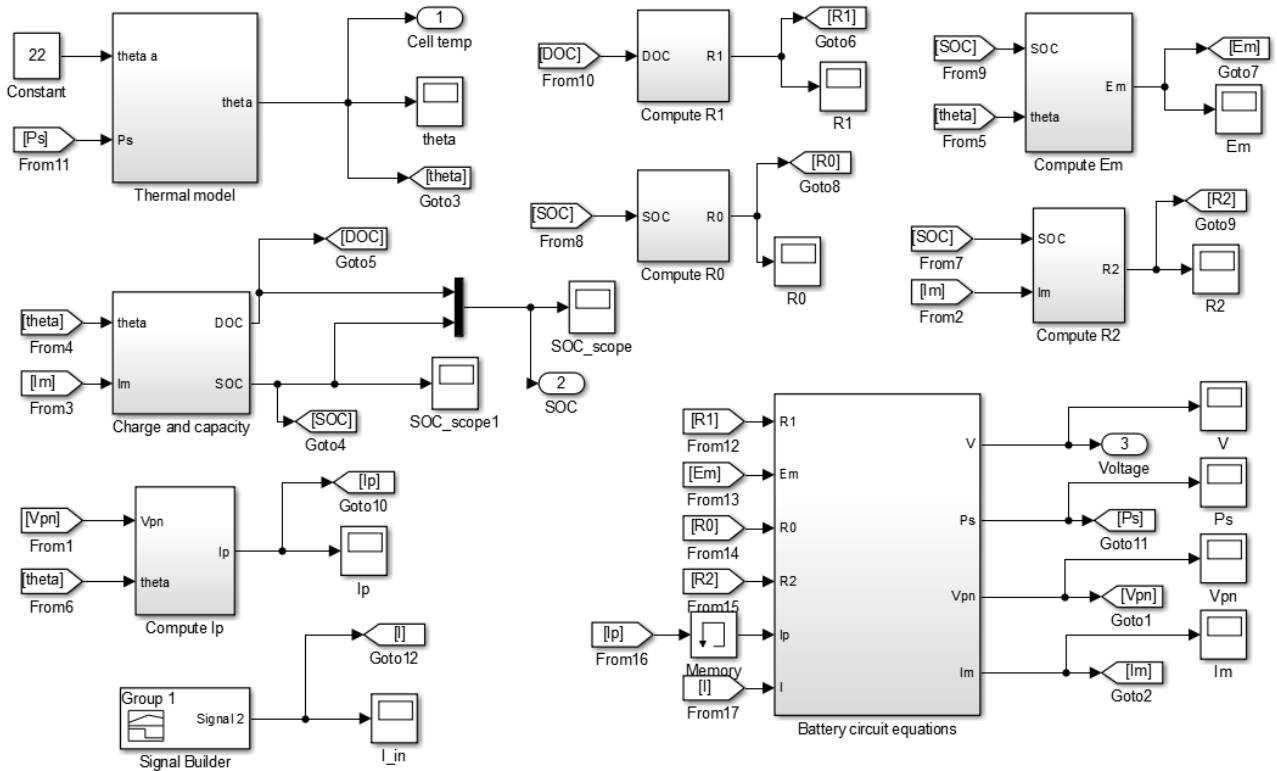


Figura 90. Implementarea modelului de simulare.

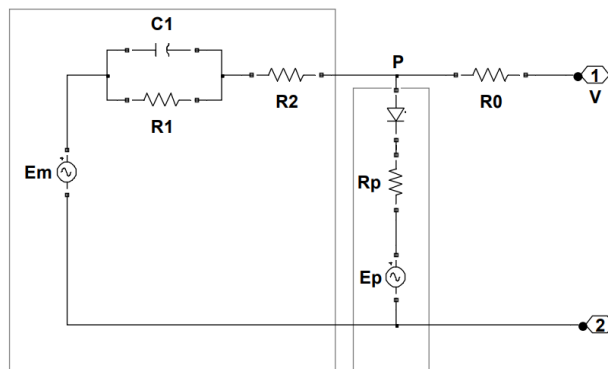


Figura 91. Circuitul echivalent al bateriei.

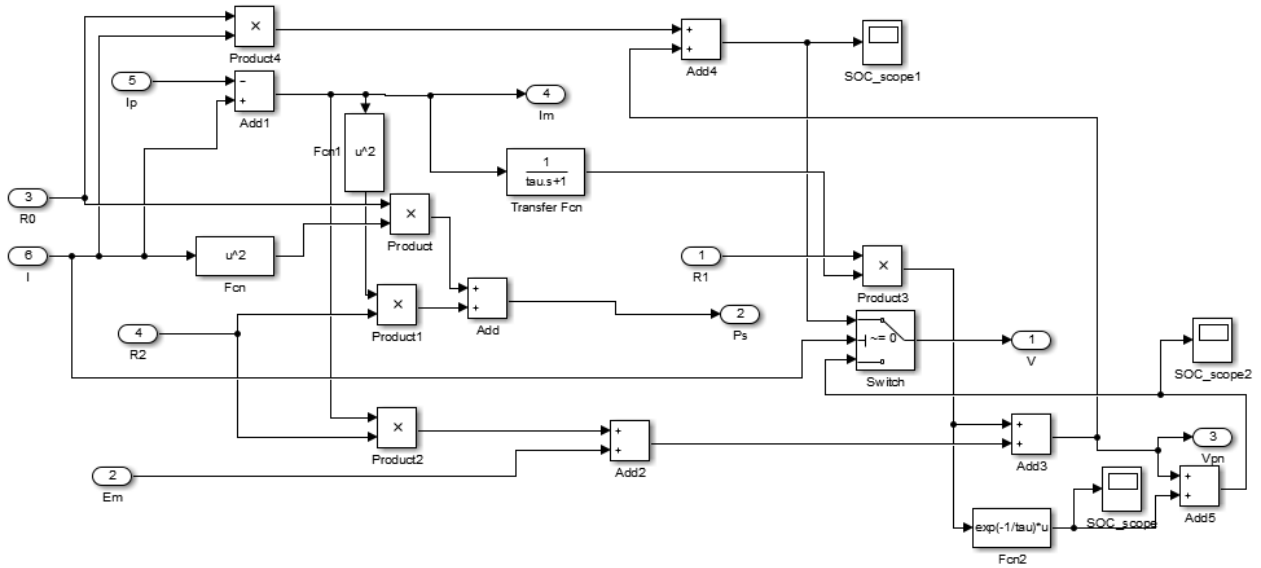


Figura 92. Ecuțiile circuitului bateriei.

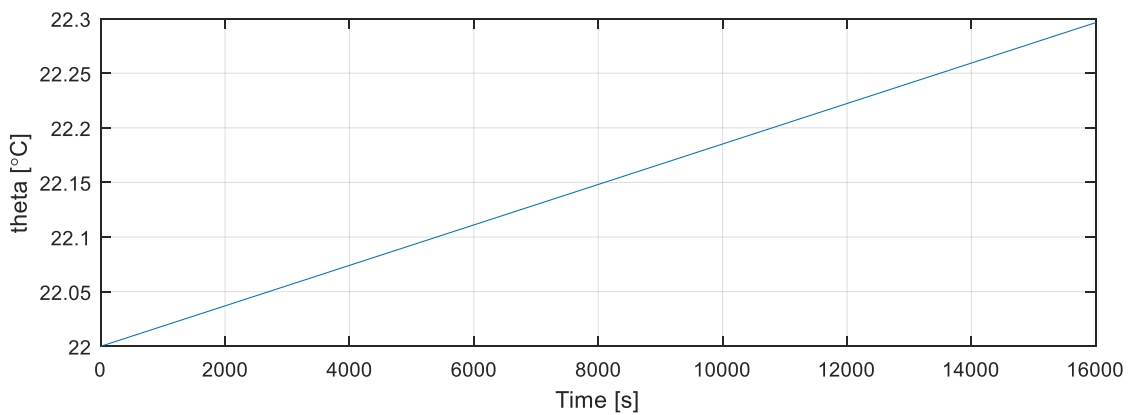


Figura 93. Temperatura electrolitului.

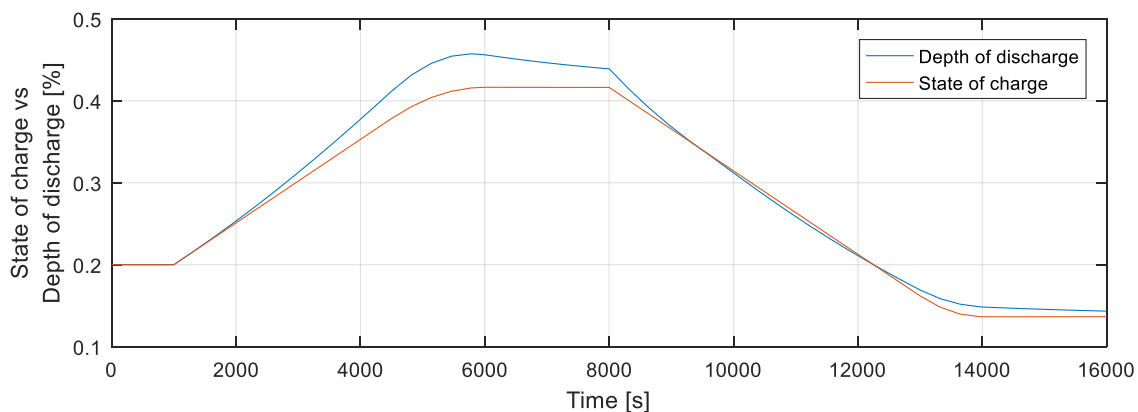


Figura 94. Starea de încărcare (SOC), adâncimea de descărcare (DOC).

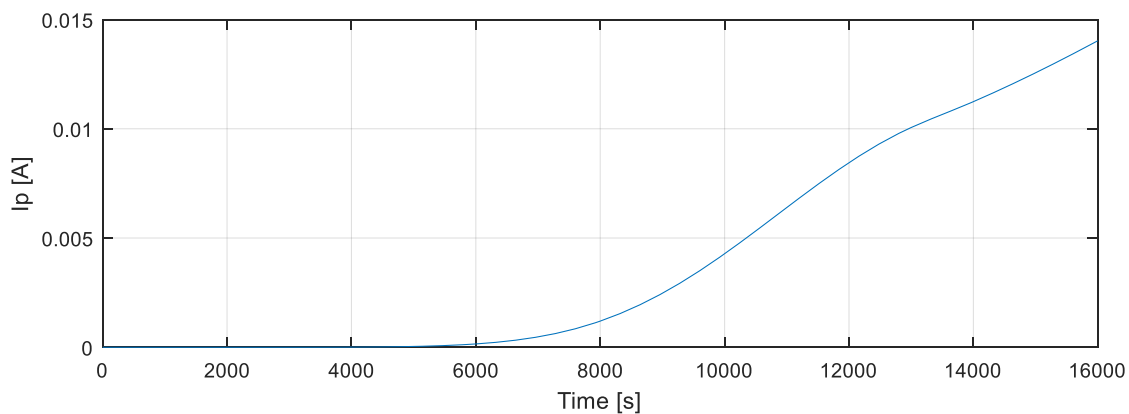


Figura 95. Curentul parazit din ramura de pierderi.

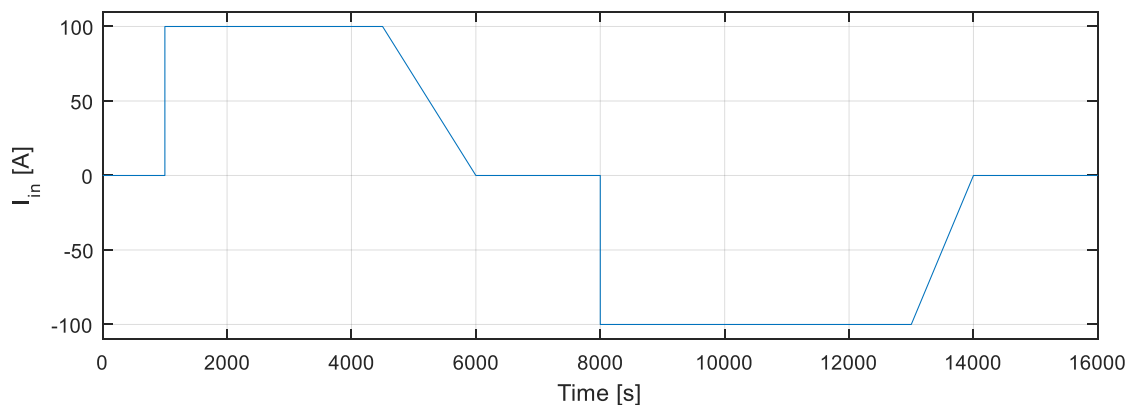


Figura 96. Curent de intrare în baterie.

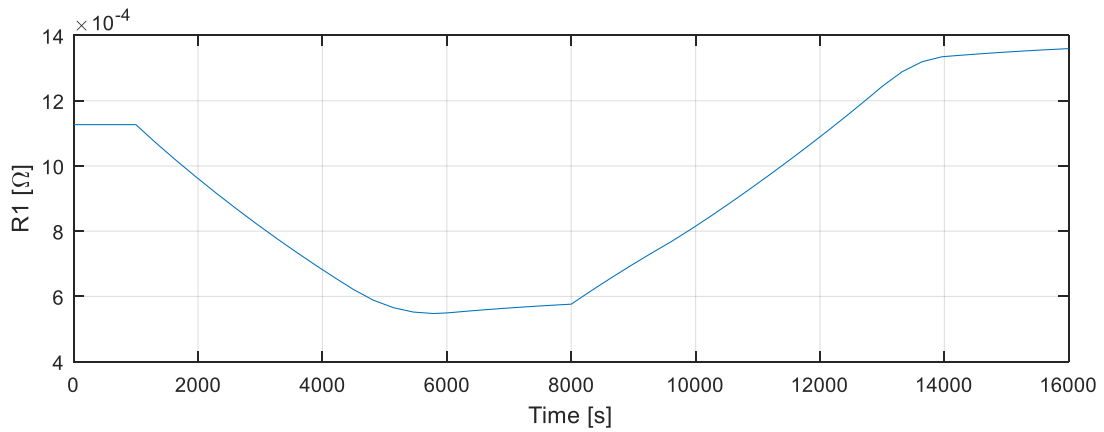


Figura 97. Rezistența din ramura primară a bateriei.

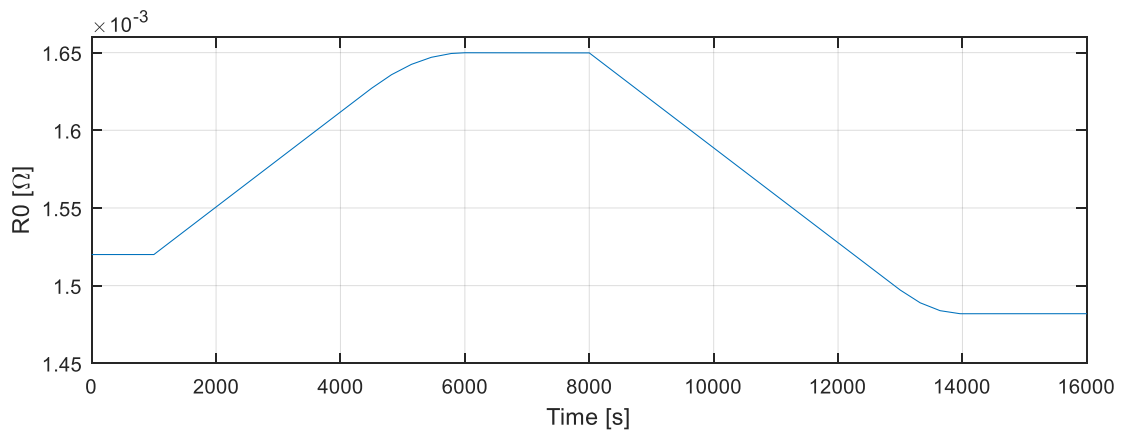


Figura 98. Rezistența percepută la bornele bateriei.

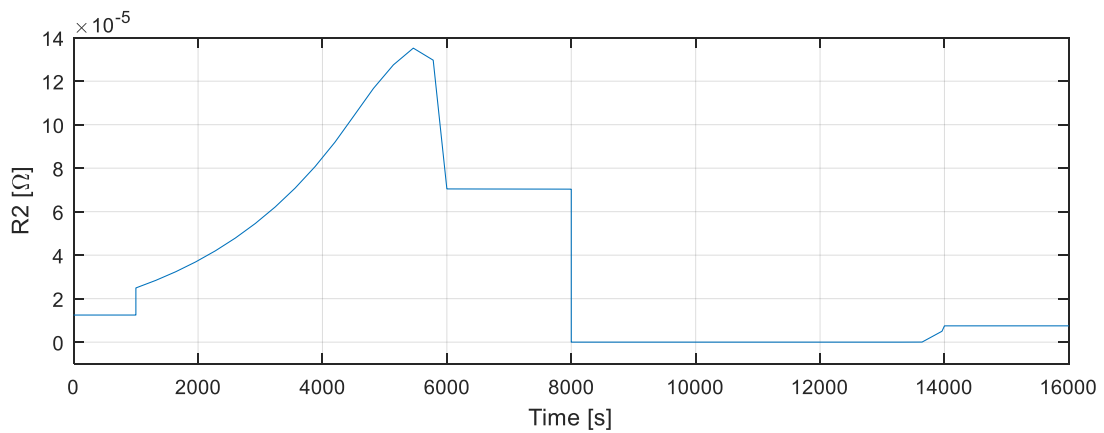


Figura 99. Rezistența principală în ramura de pierderi.



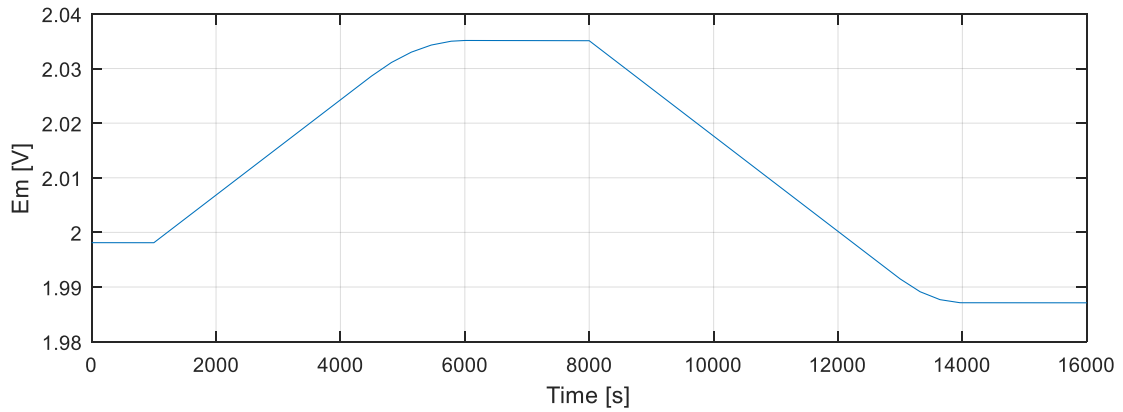


Figura 100. Tensiunea electromotoare a unei celule.

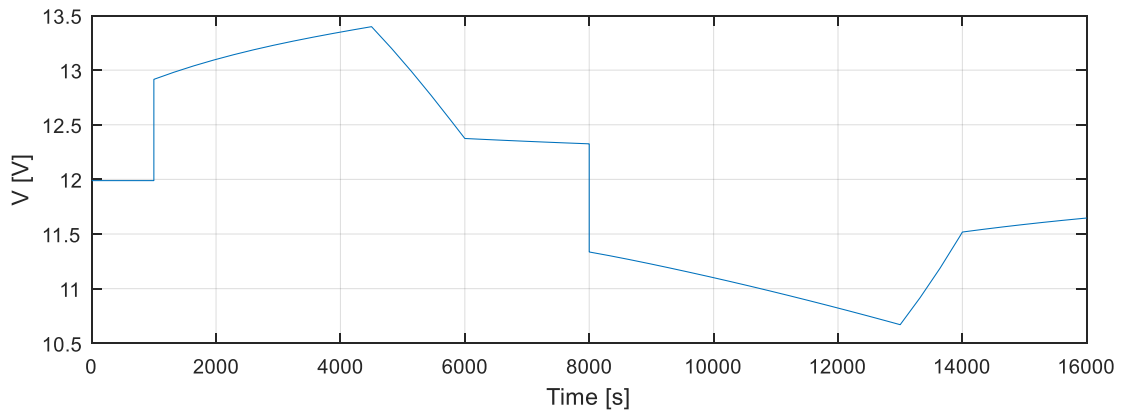


Figura 101. Tensiunea la bornele bateriei.

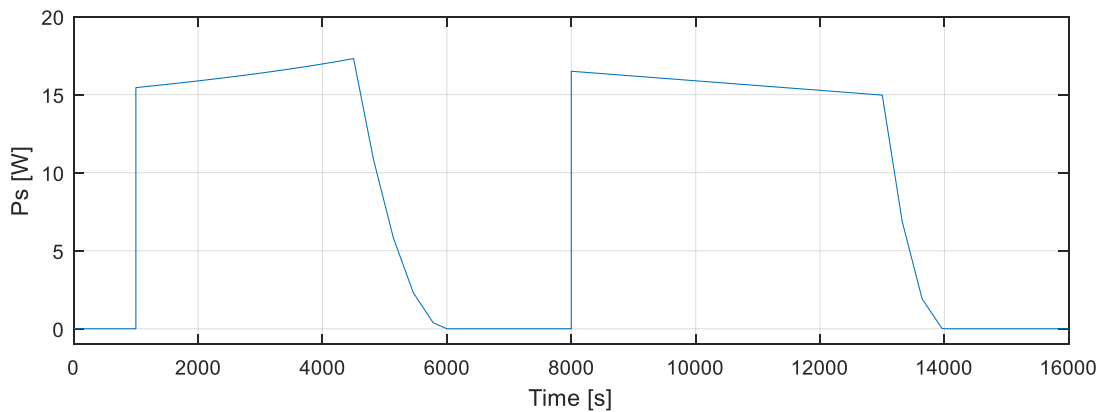


Figura 102. Puterea de pierderi internă.

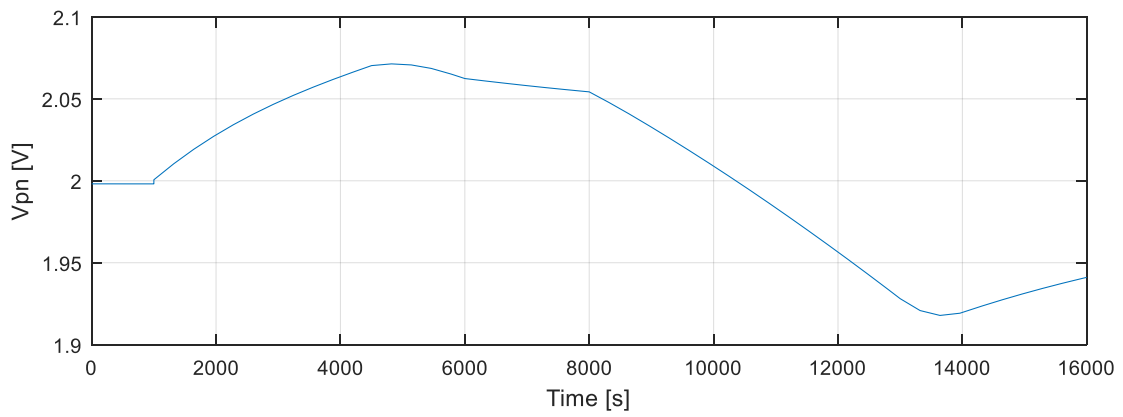


Figura 103. Tensiunea ramurii parazite.

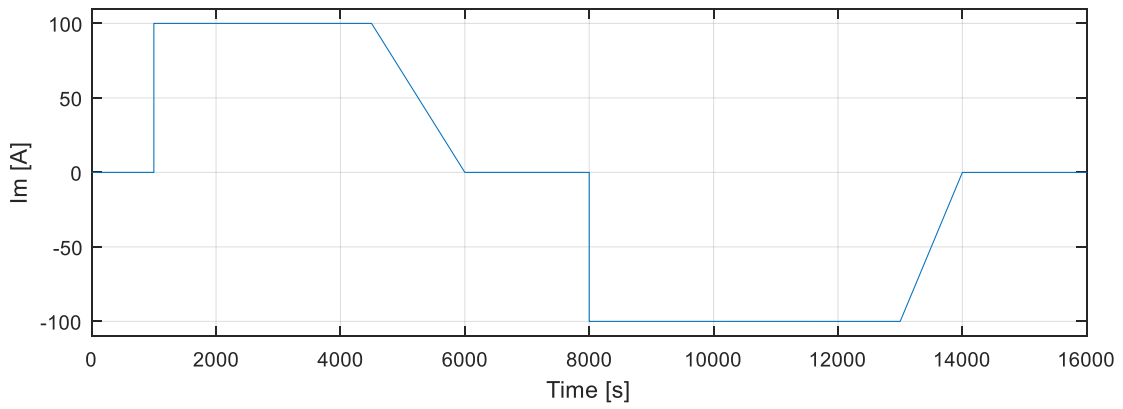


Figura 104. Curentul din ramura principală.

## **9. Model de sistem de conversie a energiei cu urmărirea puterii electrice maxime pentru un generator cu magneți permanenți**

### **9.1. Introducere**

Una din cele mai importante surse de energie regenerabile pe plan global este energia eoliană, aceasta reprezintă aproximativ 20% din totalul surselor de energie regenerabile disponibile în prezent [67]. Principalele avantaje ale utilizării energiei vântului sunt: reducerea la zero a substanțelor poluante sau a gazelor cu efect de seră dar și a costurile reduse pe unitatea de energie produsă. Dezavantajele unui astfel de sistem energetic constau în faptul că energia eoliană este o sursă limitată și strict dependentă de condițiile meteorologice, poluarea vizuală (aspectul neplăcut în mediul natural), poluarea sonoră și riscul distrugerii în cazul furtunilor violente.

Extragerea puterii maxime la un randament ridicat se realizează prin utilizarea unui convertor electronic de tip curent alternativ – curent continuu (redresor trifazat cu modulare în durata impulsurilor). Atingerea punctului maxim de putere este posibilă prin modificarea vitezei unghiulare a PMSG-ului, acest control este realizat prin metoda menținerii curentului după axa d la zero (ZDC-zero direct axis current control).

### **9.2. Considerații teoretice generale**

#### **9.2.1. Modelul turbinei eoliene**

*Turbina eoliană cu ax orizontal*, studiată în această lucrare, este formată din două părți importante (Figura 105): partea mecanică și partea electrică. Deoarece scopul acestui studiu este strict legat de a doua parte (electrică), atenția este îndreptată în continuare spre modul prin care se pot controla parametrii energiei electrice prin intermediul convertorului electronic de putere. În subcapitolele care urmează sunt abordate teoretic elementele care tin de conversia energiei electrice (turbina eoliană, generatorul electric și comanda electronică).

Partea mecanică

Partea electrică

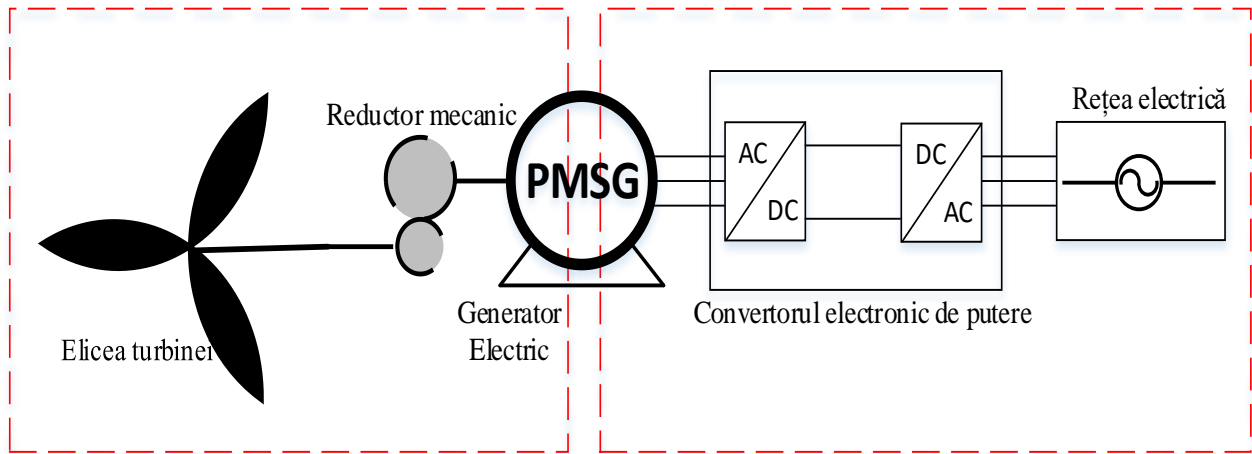


Figura 105. Sistemul turbinei eoliene.

Puterea mecanică dezvoltată de către turbina eoliană se calculează cu relația următoare:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda) = k v^3 \quad (9.1)$$

unde  $P_m$  – puterea mecanică,  $\rho$  – densitatea aerului,  $A = \pi r^2$  – aria cercului generat de  $r$ -raza paletelor turbinei,  $v$  – viteza vântului,  $C_p$  – coeficientul de putere (relația (9.2)) în funcție de  $\lambda$  – raportul vitezelor (relația **Error! Reference source not found.**),  $k$  – coeficientul puterii.

$$C_p(\lambda) = \frac{P_m}{P_0} = 0.73 \left[ \frac{151}{\lambda} - 13.2 \right] e^{\left( -\frac{18.4}{\lambda} \right)} \quad (9.2)$$

$$\lambda = \frac{r \omega_m}{v} \quad (9.3)$$

unde  $\omega_m$  – viteza unghiulară a elicei turbinei și  $P_0$  – puterea debitată de forța vântului. Convertirea puterii vântului ( $P_0$ ) în puterea de rotație a turbinei se realizează la valoarea maximă care o poate avea coeficientul de putere ( $C_{p\_max}=0,593$ ) conform *limitei lui Betz*, această limită maximă a conversiei este de 59,3 % [68] [69].

Cuplul mecanic produs de turbina eoliană poate fi calculat cu ajutorul relației **Error! Reference source not found.**:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{1/2 \rho A v^3 C_p(\lambda)}{\omega_m} \quad (9.4)$$

### 9.2.2. Modelul generatorului sincron cu magneți permanenți

Ecuțiile de tensiuni statorice în regim dinamic, aplicând transformarea Park (Figura 106) vor avea următoarea forma:

$$U_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - p\omega L_s I_{sq} \quad (9.5)$$

$$U_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + p\omega L_s I_{sd} + p\Omega \Phi_m \quad (9.6)$$

unde:  $R_s$  – rezistența înfășurărilor statorice,  $L_s$  – inductanța înfășurărilor statorice,  $p$  – numărul de perechi de poli,  $\omega$  – viteza de rotație a rotorului,  $\Phi_m$  – fluxul magnetic produs de magneți permanenți [70].

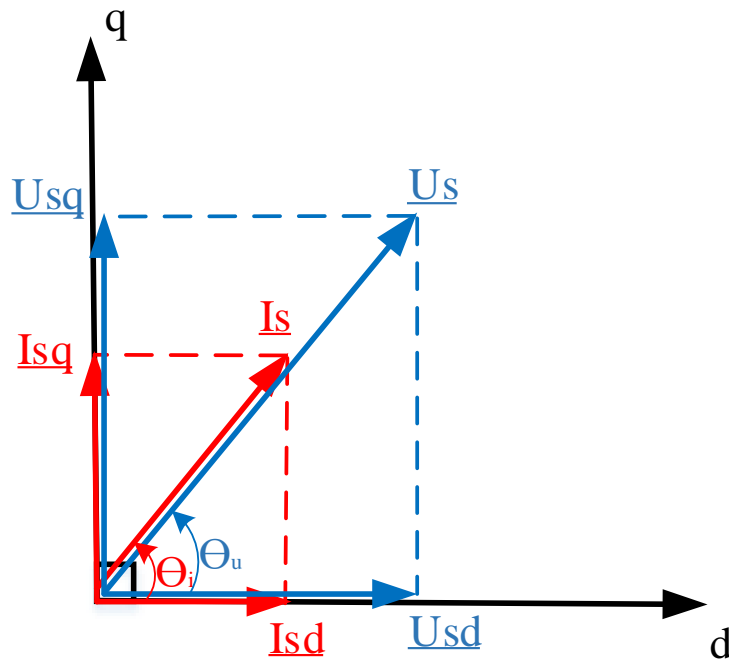


Figura 106. Diagrama fazorială [69].

Cuplul electromagnetic  $T_{em}$  care apare în interiorul generatorului sincron cu magneți permanenți poate fi calculat cu ajutorul expresiei matematice (9.7), în funcție de inductanțele  $L_d$  și  $L_q$  după axele d-q [71].

$$T_{em} = \frac{3}{2} p [\Phi_m I_{sq} - (L_d - L_q) I_{sd} I_{sq}] \quad (9.7)$$

### 9.2.3. Controlul turbinei eoliene

Tehnica de control utilizată este denumită în literatura tehnică din limba engleză ”*Zero d-Axis Current (ZDC) Control*” și reprezintă metoda de orientare după fluxul rotoric prin care axa de referință ”q” este considerată pe aceeași direcție cu fazorul spațial al curentului statoric  $I_s=I_{sq}$ , astfel componenta curentului după axa ”d” va fi egal cu zero ( $I_{sd}=0$ ). Cuplul electromecanic optim este exprimat cu ajutorul expresiei (9.7) care va deveni [69]:

$$T_{em\_ZDC} = \frac{3}{2}p\Phi_m I_{sq} = \frac{3}{2}p\Phi_m I_s \quad (9.8)$$

iar ecuația tensiunii statorice poate fi dedusă din ecuațiile (9.5) și (9.6) pe Montru  $I_{sd}=0$  :

$$U_{sd} = -p\omega_m L_s I_{sq} \quad (9.9)$$

$$U_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + p\Omega \Phi_m \quad (9.10)$$

Urmărirea punctului maxim de putere se realizează prin tehnica de perturbare și observare (Figura 107). P&O reprezintă o metodă matematică de optimizare care presupune căutarea punctului optim de extragere maximă a energiei. Această metodă se bazează pe controlul prin perturbare și apoi se observă rezultatele sistemului, până când diferența dintre perturbare și observare va devenii zero [72]. Eficiența aceste metode este dată de către rezoluția mare a pasului de căutare a MPPT-ului, dar folosirea unei rezoluții mari de căutare implică efectuarea procedurii de căutare într-un timp scurt. Această problemă se poate rezolva prin folosirea unui pas de căutare variabil, cu rezoluție mică pe porțiunea unde curba puterii este abruptă și cu rezoluția mare în zona unde curba puteri devine mai aplatazată [68] [72].

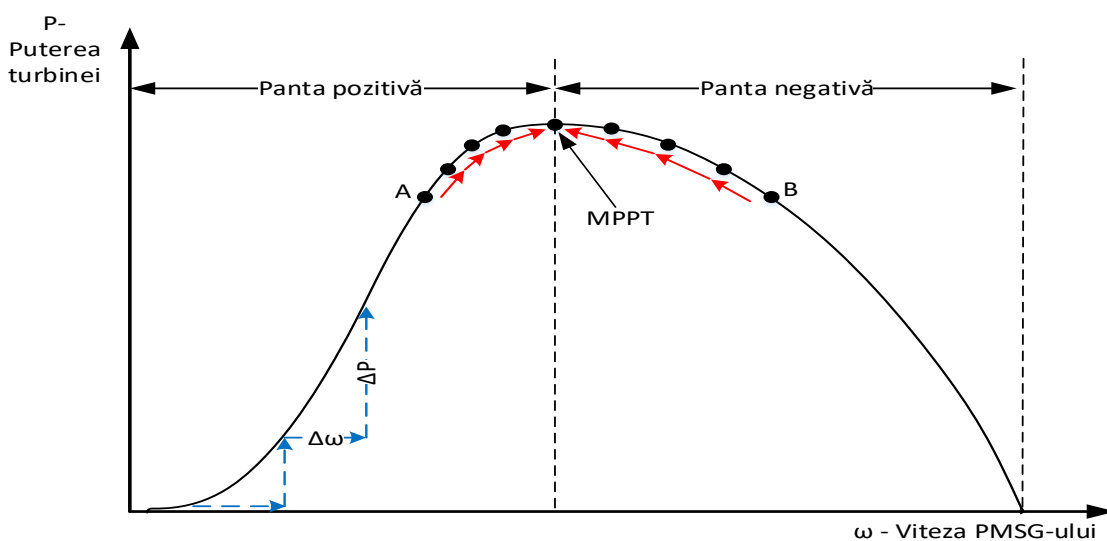


Figura 107. Metoda P&O [67].

### 9.3. Modelarea și simularea tehnicii de urmărire a punctului maxim de putere prin metode de perturbare și observare

Controlul turbinei eoliene se realizează prin intermediul a două bucle de reglare automată, acestea controlează componentele curentului statoric după axele d-q. Curenții statorici sunt mășurați și transformați în componentele  $I_d$  și  $I_q$  după axele mobile de coordonate care variază după unghiul de rotație  $\theta$  și vor reprezenta mărimile celor două bucle de reacție.

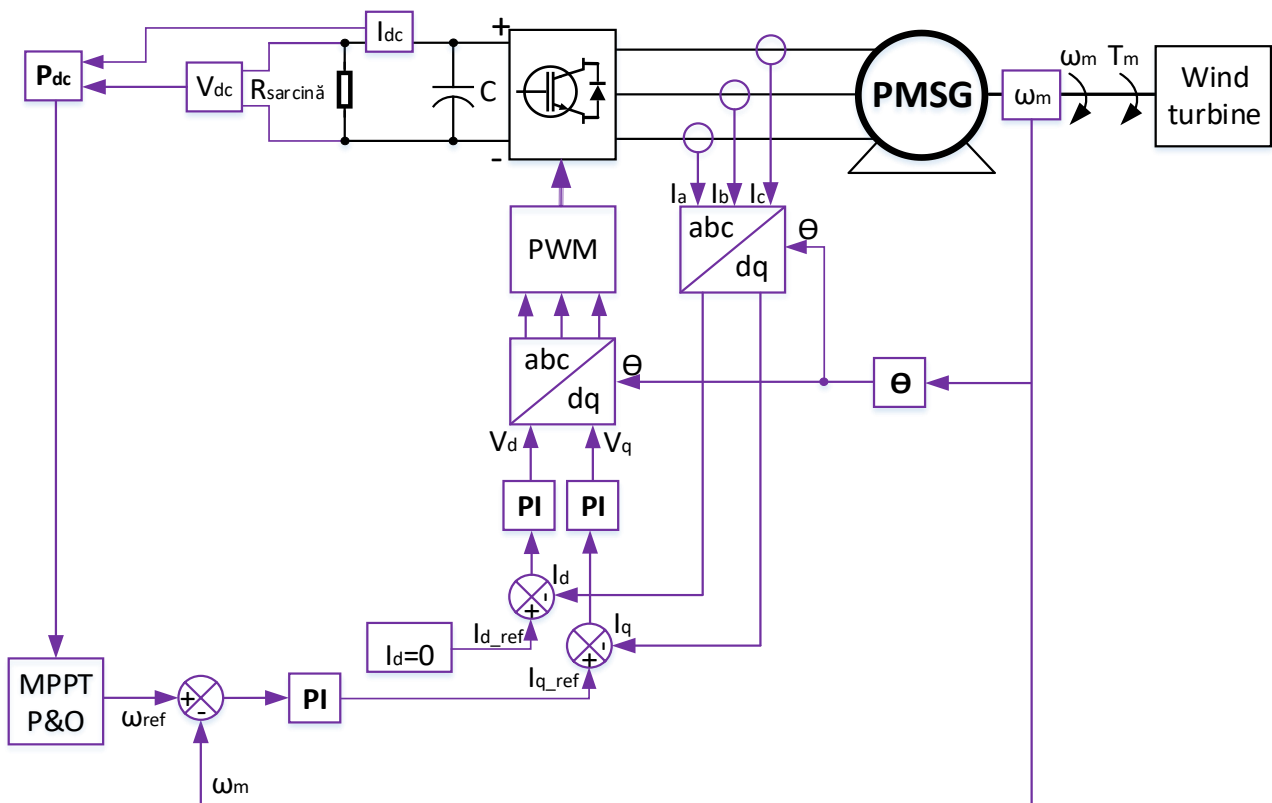


Figura 108. Schema de automatizare [73].

*Prima buclă de reacție* se bazează pe calcularea referinței de viteză unghiulară ( $\omega_{ref}$ ), care este dată prin metoda P&O de MPPT, această referință este comparată cu viteza unghiulară ( $\omega_m$ ) a generatorului, iar eroarea rezultată va impune mărimea curentului de referință după axa-q  $I_{q\_ref}$ , prin intermediul unui controller de tip proportional integrator (PI). Această mărime de curent este comparată cu mărimea curentului măsurat după axa-q, eroarea va fi introdusă într-un controller PI care ne va da mărimea tensiunii statorice după axa-q ( $V_q$ ). Aceasta buclă va controla cuplul electromagnetic statoric [67].



A doua buclă de reacție va menține curentul după axa-d la zero. Se impune curentul  $I_d=0$  care se va compara cu mărimea curentului măsurat după axa-d, eroarea va fi introdusă într-un controller PI care ne va da mărimea tensiunii statorice după axa-d ( $V_d$ ).

Cele două tensiuni rezultante ( $V_d, V_q$ ), vor fi transformate într-un sistem trifazat de tensiuni sinusoidale, acestea vor fi modulate în durata impulsurilor și vor reprezenta marimile de comandă a redresorului trifazat în punte [69].

Modelul implementat în MATLAB-Simulink cuprinde patru grupuri principale așa cum se poate observa în Figura 109.

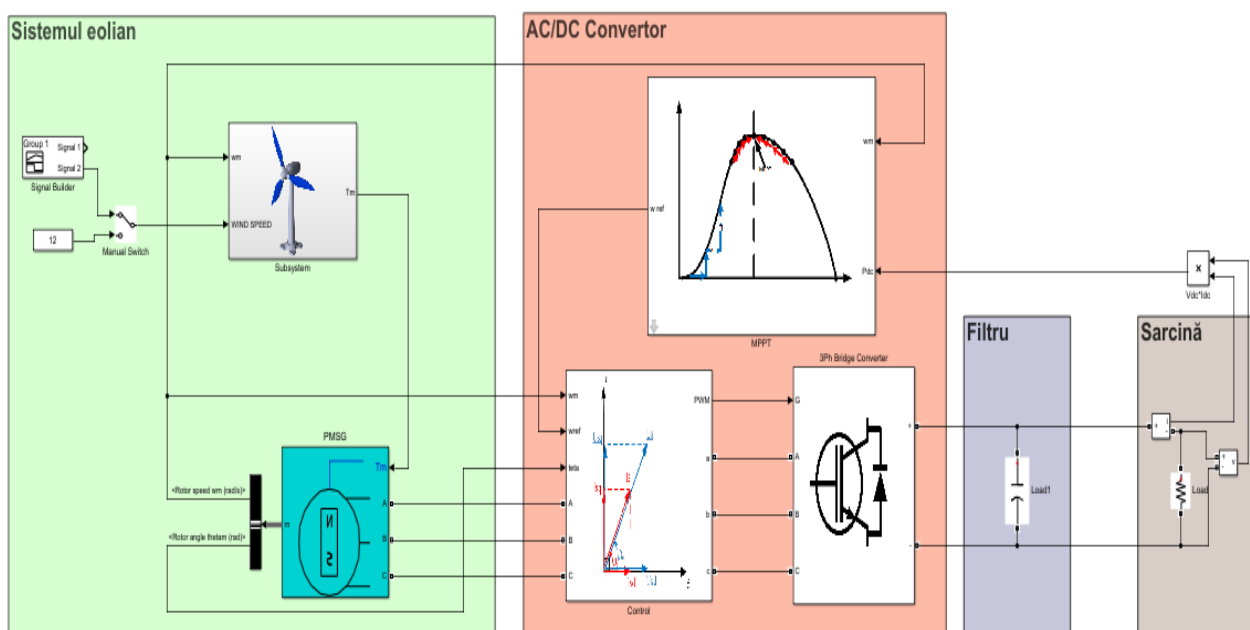


Figura 109. Modelul în Simulink

Primul grup cuprinde convertorul electro-mecanic a **sistemului eolian** și este creat pe baza ecuațiilor matematice ale turbinei eoliene prezentate anterior. Viteza vântului (wind speed) în metri/secundă și viteza unghiulară a rotorului ( $w_m$ ) în radiani/secundă reprezintă intrările în acest sistem iar mărimea de ieșire care va fi impusă generatorului este cuplul mecanic ( $T_m$ ). Al doilea grup este format din blocul controlului, blocul care conține algoritmul de MPPT și puntea redresoare trifazată.

Controlul convertorului (Figura 110) se bazează pe schema din figura 4 unde curentul trifazat este controlat prin tensiune. Mărimile de intrare fiind viteza unghiulară a generatorului ( $w_m$ ), viteza de referință ( $w_{ref}$ ), unghiul teta și fazele A, B, C care sunt introduse în bloc doar pentru efectuarea măsurării tensiunii și curentului statoric. Ieșirea acestui bloc fiind șase pulsuri care se obțin prin modularea tensiunilor  $V^*_{abc}$  în durata pulsului. Cele trei controllere de tip PI sunt de tip paralel și sunt parametrizate în funcție de rolul funcțional al fiecăruia. Blocul "Three-Phase V-I Measurement" măsoară tensiunile de linie și curenți pe fiecare fază, blocul "I abc/dq" efectuează transformarea

directă a curenților din sistemul trifazat în componente de curent continuu cu ajutorul ecuațiilor matriceale, blocul "V dq/adc" realizează transformarea directă, inversă din tensiunea  $V_{dq}$  într-un sistem trifazat de tensiuni."PWM Generator" efectuează modularea în durata impulsului prin compararea celor trei tensiuni ( $V^*_{abc}$ ) cu trei semnale triunghiulare care reprezintă unda purtătoare și a căror frecvență este de 20 [kHz].

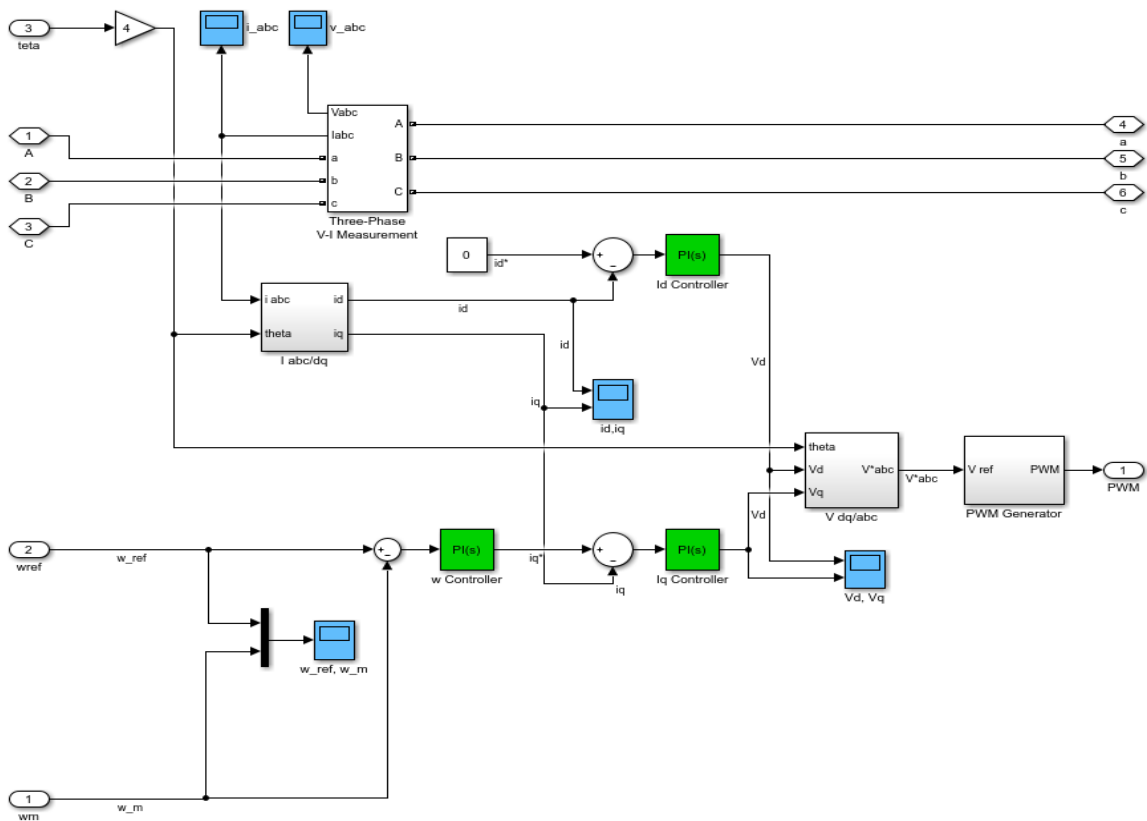


Figura 110. Tehnica de control.

Pentru urmărirea punctului maxim de putere se folosește tehnica de perturbare și observare cu pas fix. Cele două intrări în acest bloc sunt puterea debitată pe sarcină ( $P_{dc}$ ) și viteza unghiulară a generatorului ( $w_m$ ), iar ieșirea este viteza unghiulară de referință ( $w_{ref}$ ) impusă blocului de control, după cum se poate observa în figura următoare.

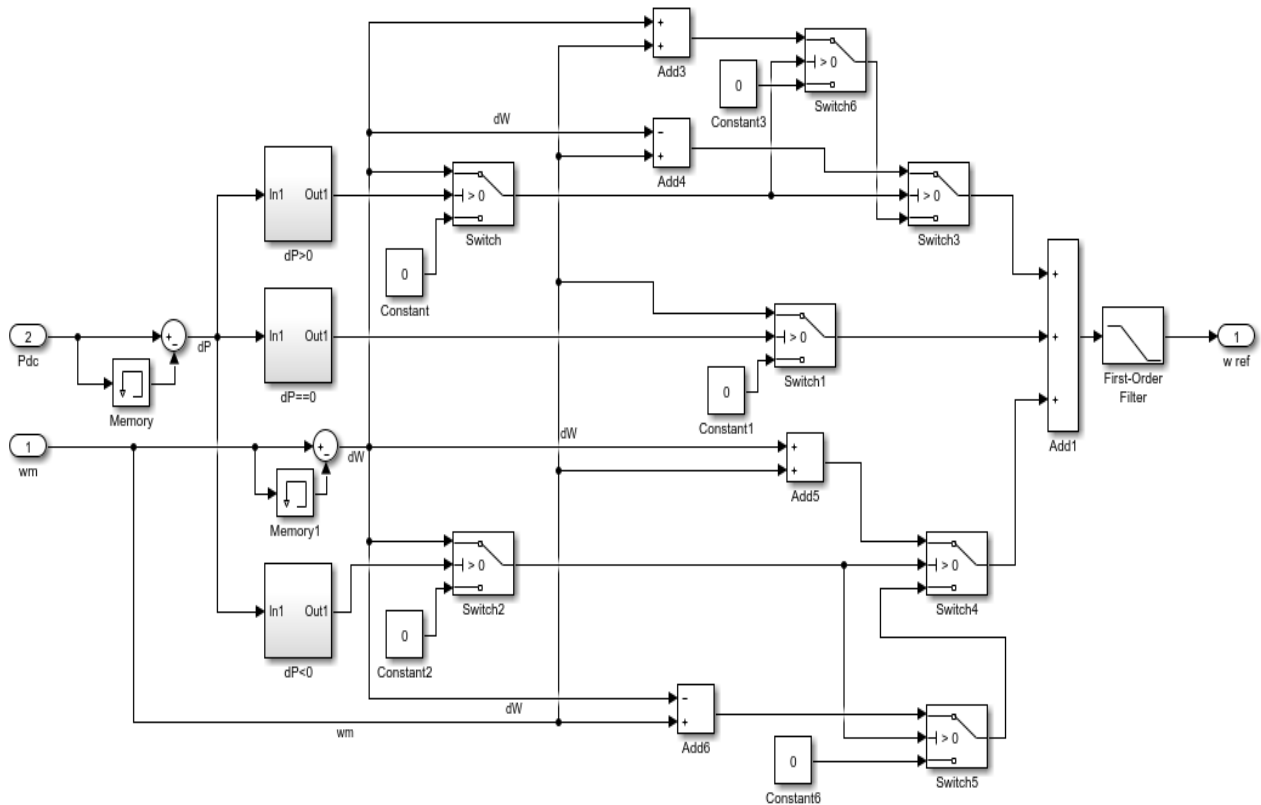


Figura 111. Tehnica de MPPT.

#### 9.4. Rezultatele obținute în mediul Matlab - Simulink

Performanțele obținute cu sistemul de generator eolian prezent în capitolele anterioare vor fi prezentate în continuare prin simularea în mediul Matlab-Simulink folosind toolbox-ul SimPowerSystem, modelul respectiv a fost prezentat în subcapitolul precedent. Simularea se efectuează într-un timp de 7 secunde, la "sample time" de  $10^{-6}$  [s]. Pentru a diminua procesele tranzitorii apărute la începutul simulării, se va impune ca viteza unghiulară de rotație la momentul  $t=0$  [s] să fie  $w_m=170$  [rad/s].

Turbinei eoliene se va impune profilul vitezei vântului care va varia între 5 și 15 metri/secundă pe parcursul întregii perioade în care rulează simularea. Evoluția propriuzisă este împărțită în patru perioade:

Tabel 7. Parametrii simulare

Nr. Per.	Intervalul de timp [sec]	Viteza vântului [m/sec]	Viteza de rotație [rad/s]	Cuplul la arbore [N*m]
1	0-1.5	10	190	-7
2	1.5-3.5	12	240	-8
3	3.5-5	15	310	-9
4	5-7	5	70	-4

Cuplul mecanic de la arborele generatorului sincron cu magneți permanenți ( $T_m$ ) și viteza de rotație a generatorului ( $w_m$ ), vor evolua după profilul vitezei vântului impus cu procesele tranzitorii apărute datorită variației bruște a vitezei vântului (Figura 112).

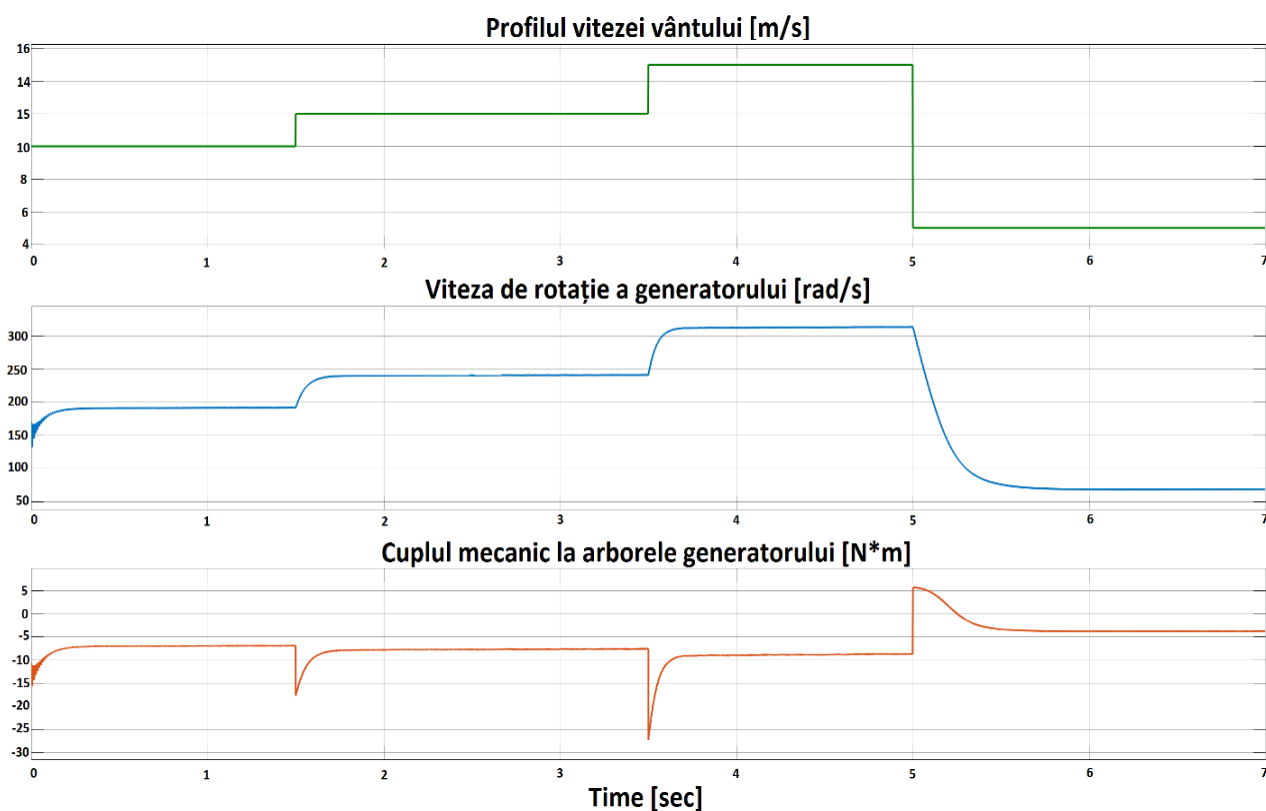


Figura 112. Mărimile mecanice ale simulării.

Semnalele redresate de la ieșire vor fi influențate de amplitudinea semnalelor de la intrare care depind de viteza vântului și de tehnica de realizare a MPPT-ului, riplurile aferente proceselor apărute sunt netezite de către filtrul capacitiv.

Tensiunea de la ieșire poate fi estimată cu relația matematică (9.11), unde  $m_a$ -adâncimea de modulare [73]:

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}V_{ab}}{m_a\sqrt{3}} \quad (9.11)$$

Pe Figura 113. Realizarea controlului sunt prezentate evoluțiile mărimilor de control ale redresorului comandat, acestea pot fi comparate cu formele de undă care intervin în controlul propriuzis. Semnificațiile acestor forme de undă sunt următoarele:

- Profilul vitezei vântului;
- Viteza unghiulară de referință dată de blocul care realizează MPPT-ul;
- Evoluția în timp a puterii ( $P_{dc}=V_{dc}*I_{dc}$ ) absorbite de către sarcina rezistivă;
- Evoluția tensiunilor de referință după axele d-q;
- Evoluția curenților măsurați și calculați după axele d-q;
- Sistemul tensiunilor sinusoidale trifazate de referință, care urmează să fie modulați.

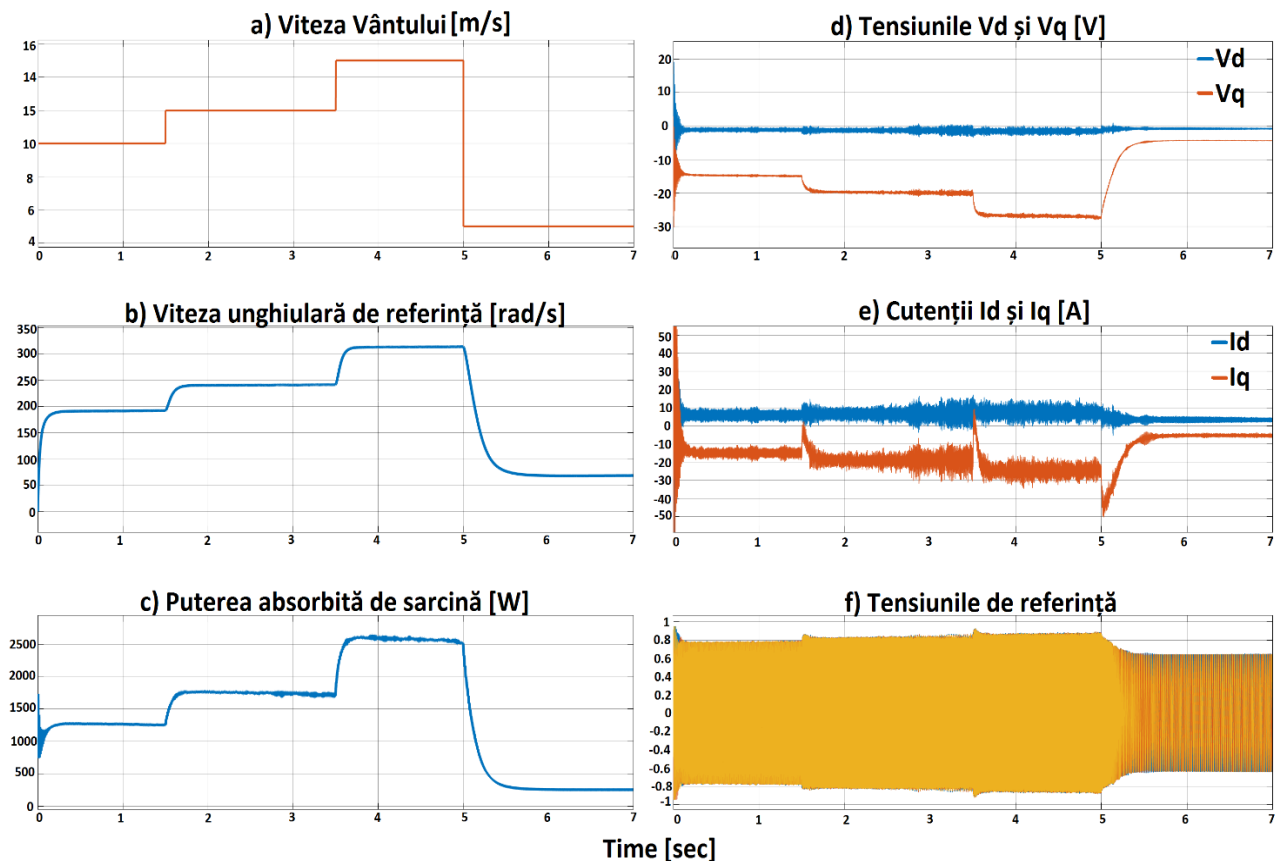


Figura 113. Realizarea controlului.

Randamentul conversiei energiei mecanice în energie electrică este calculat prin raportarea puterii electrice la puterea mecanică, valorile acestuia sunt considerate ca fiind mediile pe fiecare perioadă și sunt trecute în tabelul de mai jos.

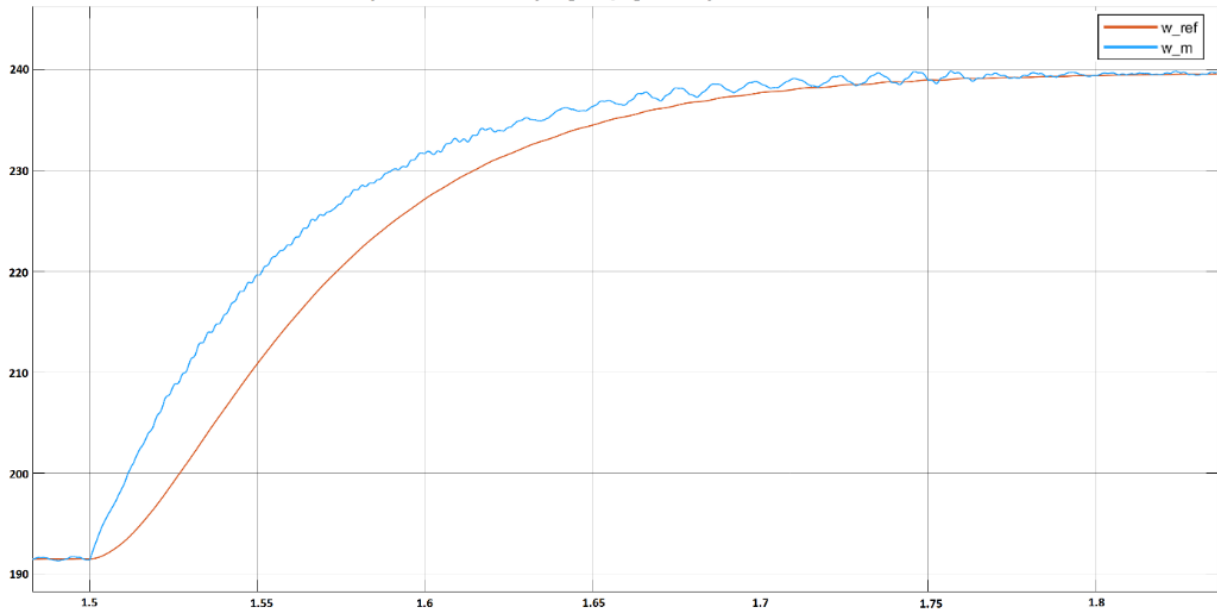
Tabel 8. Randamentul conversiei energiei mecanice

Nr. Per.	Viteza vântului [m/sec]	Randamentul [%]
1	10	95.0
2	12	93.5
3	15	92.8
4	5	96.5

### 9.5. Observații și concluzii

- Urmărirea punctului maxim de putere prin tehnica de perturbare și observare este realizată prin controlul vitezei unghiulare a generatorului sincron cu magneți permanenți (Figura 114).
- Prin folosirea metodei menținerii curentului  $I_d$  la zero (ZDC) s-a obținut un *control de orientare după câmpul magnetic* al rotorului. Rezultatele acestei metode se pot observa în Figura 113 d) și e), unde curentul și tensiunea după axa-d tind la zero.
- Odată cu creșterea vitezei vântului (Figura 114.a), tehnica de MPPT va impune o viteză unghiulară mai mică decât viteza unghiulară măsurată, convertorul v-a lucra în regim capacitiv prin conducerea fazorului curentului în fața fazorului de tensiunii cu un defazaj. Când începe scăderea vitezei vântului, viteza unghiulară de referință este mai mare decât viteza unghiulară măsură, în acest caz defazajul este mai mic.
- Randamentul conversiei energetice este invers proporțional cu viteza vântului, acesta variază între 92.8 % și 96.5%. Cel mai bun rezultat la randamentul s-a obținut în cazurile în care viteza vântului este scăzută.

a) Viteza de rotație [rad/s] la creșterea vitezei vântului



b) Viteza de rotație [rad/s] la scăderea vitezei vântului

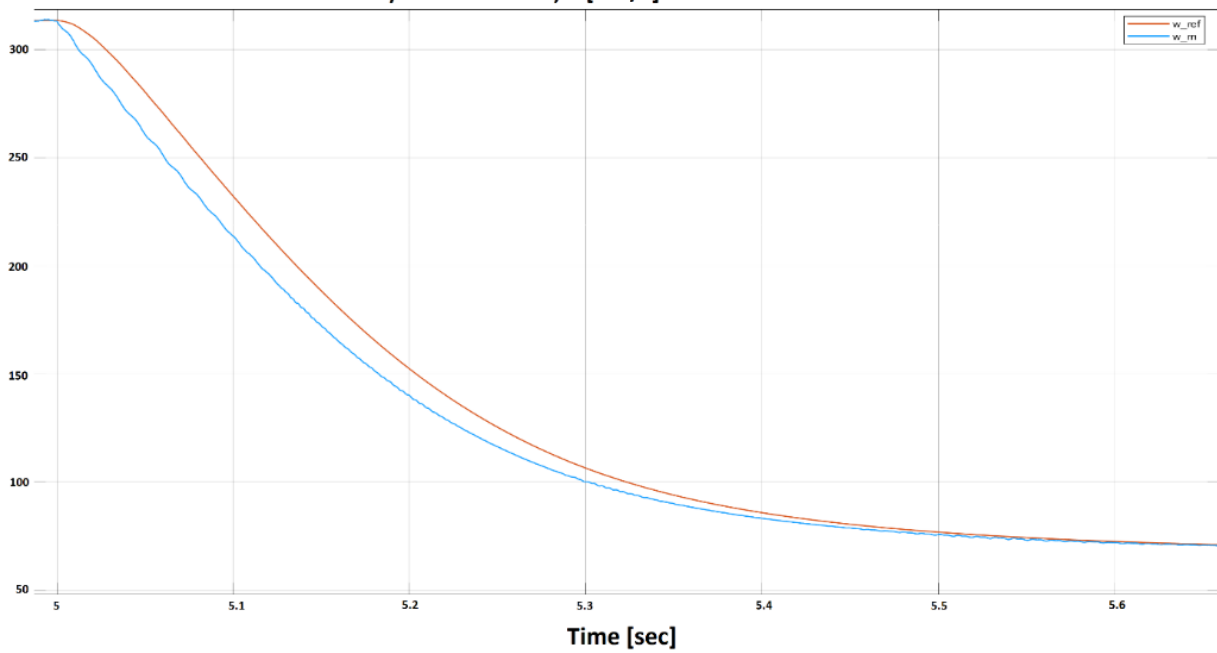


Figura 114. Viteza de rotație.

## 10. Model sistem de conversie a energiei electrice utilizând convertoare de tip AC-DC pentru conectarea la rețeaua electrică trifaza

### 10.1. Introducere

Conectarea la rețeaua electrică națională reprezintă un aspect esențial pentru dezvoltarea unei microrețele inteligente (Smart Grid) de tip cartier în curent continuu, cu două nivele de tensiune. Implementarea unei astfel de rețele presupune introducerea a două convertoare bidirecționale de tip AC/DC cu performanțe energetice ridicate, câte unul pentru fiecare nivel de tensiune.

În această lucrare se urmărește obținerea conversiei la tensiunea dorită și totodată menținerea unui factor de putere ridicat sau chiar, pentru o analiză ulterioară, posibilitate de control a energiei reactive, acest lucru fiind posibil prin controlarea adecvată a redresoarelor comandate în durata impulsurilor.

### 10.2. Considerații teoretice

Topologia unui sistem de conversie de tip AC/DC este prezentat în Figura 115, unde sarcina rezistivă este alimentată de la rețeaua electrică trifazată prin intermediul filtrului RL și a redresorului comandat PWM, filtru capacitiv având rolul de a menține în anumite momente tensiunea continuă și a reduce riplurile acesteia.

Modelarea matematică a acestui tip de convertor se bazează pe ecuațiile simplificate în sistemul de coordonate rotativ d-q cu mărimi continue. Pentru a ajunge la aceste ecuații este necesară aplicarea transformărilor de coordonate directe. Fazorul tensiunii convertorului va fi compus din componenta reală ( $U_d$ ) și componenta imaginară ( $U_q$ ). Transformarea directă din sistemul alternativ de tensiuni trifazate ( $U_a, U_b, U_c$ ) în sistemul de componente continue ( $U_d, U_q, U_0$ ) se realizează prin următoarele relații matematice [8]. Aceasta transformare se aplică identic și pentru curenții din sistemului trifazat.

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (10.1)$$



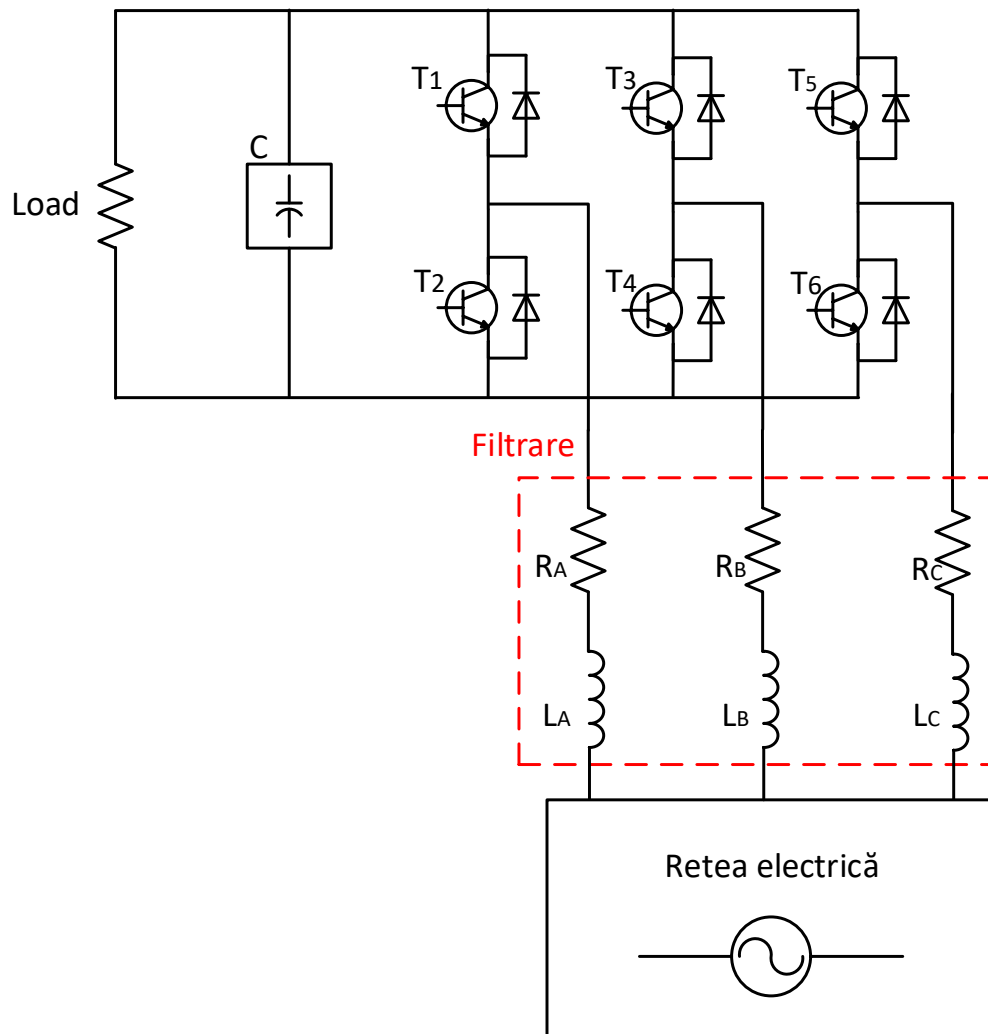


Figura 115. Redresor comandat.

Puterile electrice din sistemul prezentat pot fi exprimate prin intermediul componentelor tensiunilor ( $U_d, U_q$ ) și a curenților ( $I_d, I_q$ ) după axele d-q cu ajutorul relațiilor matematice de mai jos, unde P reprezintă puterea activă iar Q reprezintă putere reactivă. Prin controlarea componentelor după axele rotative d-q se va urmări controlul puterii reactive și menținerea puteri active [74] [75] [76].

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(U_d I_d + U_q I_q) \\ Q = \frac{3}{2}(U_d I_q - U_q I_d) \end{cases} \quad (10.2)$$

Principiul funcțional al controlului redresorului se bazează pe schema din Figura 116, unde bucla de reglare a tensiunii redresate va controla curentul  $I_q$  după axa  $q$ . Controlul puterii reactive se realizează prin intermediul buclei de reglare după axa  $d$ , unde se impune reducerea curentului  $I_d$  și a tensiunii  $V_d$ .

Sistemul convertorului AC/DC este capabil să lucreze bidirecțional, cedând energie rețelei electrice la momentul în care va fi conectată sursa regenerabilă. Astfel convertorul va lucra în regim de inverter fiind sincronizat cu rețeaua electrică prin intermediul blocului PLL (Phase Locked Loop) [75] [76] [77].

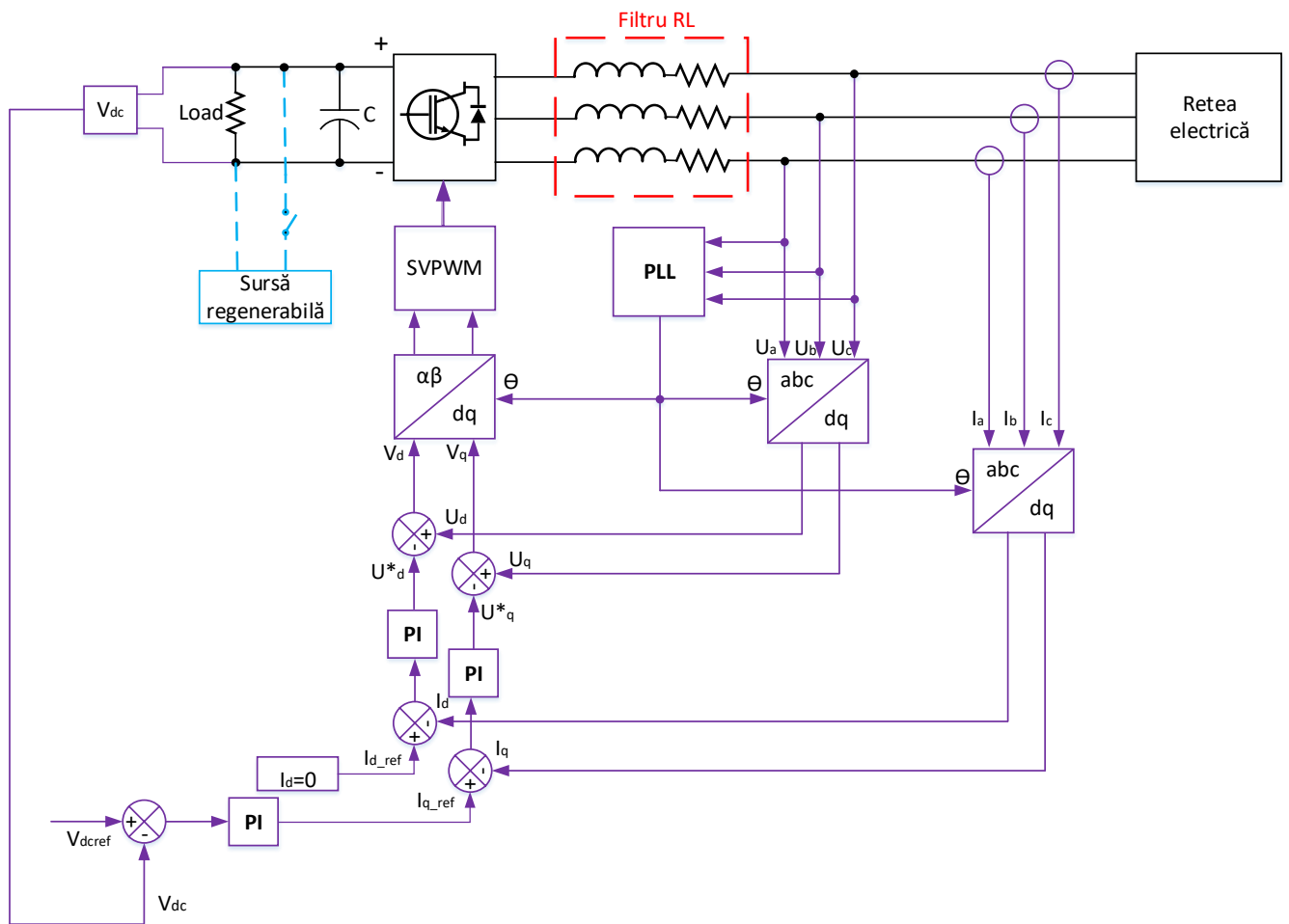


Figura 116. Schema de control redresor comandat.

### 10.3. Modelarea și simularea convertoarelor pentru conectarea la rețeaua electrică

Conectarea la rețeaua electrică cu tensiune de linie de 10 [kV] se realizează prin intermediul transformatorului trifazat cu două secundare, legate în conexiune ”triunghi”, cu tensiunea de linie de 240 [V]. Cele două nivele de tensiune (+375V și -375V) sunt obținute prin controlul identic și independent a două redresoare comandate după schema din Figura 117. Pulsurile de comandă a redresoarelor se obțin cu ajutorul modulării vectorului spațiat de tensiune (SVPWM).

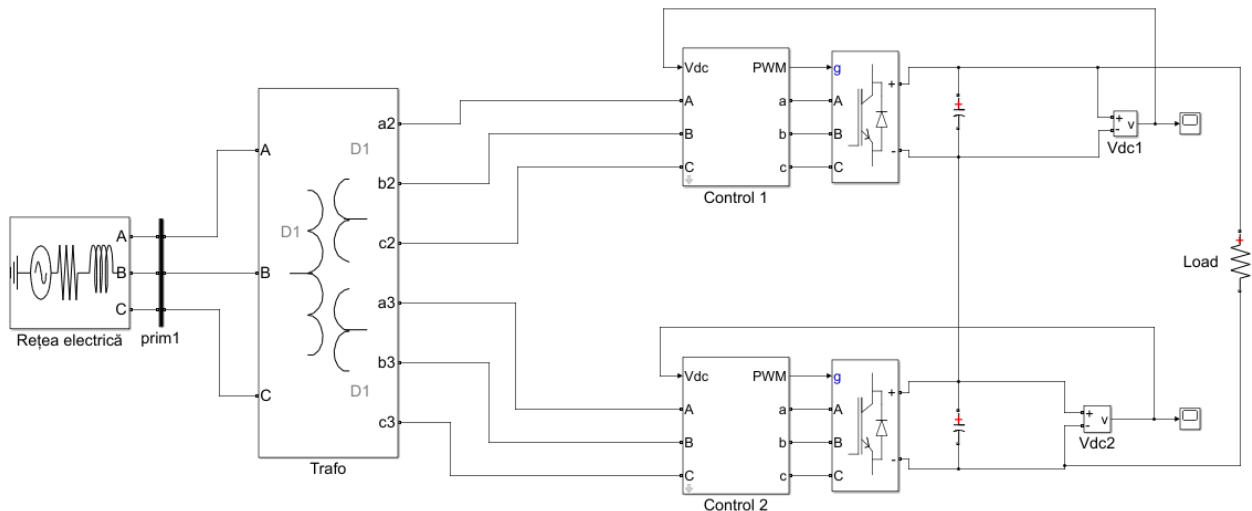


Figura 117. Modelarea sistemului de conversie considerat.

Valoarea sarcini rezistive  $R_{sarcin\grave{a}}$  este calculată cu relația de mai jos ( $V_{dc1}$  și  $V_{dc2}$  sunt tensiunile continue ale celor două convertoare,  $P_{dc}$  reprezintă puterea sarcini rezistive).

$$R_{sarcin\grave{a}} = \frac{(V_{dc1} + V_{dc2})^2}{P_{dc}} \quad (10.3)$$

### 10.4. Rezultatele obținute

Simularea sistemului s-a realizat pe o perioadă de 10 secunde la ”sample time” de  $10^{-6}$  [s], valoarea rezistenței sarcini este calculată pentru puterea de 300 [kW]. În model realizat s-au utilizat mărimile raportate (p.u.) la valorile nominale.

Pe graficele de mai jos se pot observa formele de undă ale tensiunilor și curenților de linie corespunzătorii unui convertor și tensiunea totală redresată.

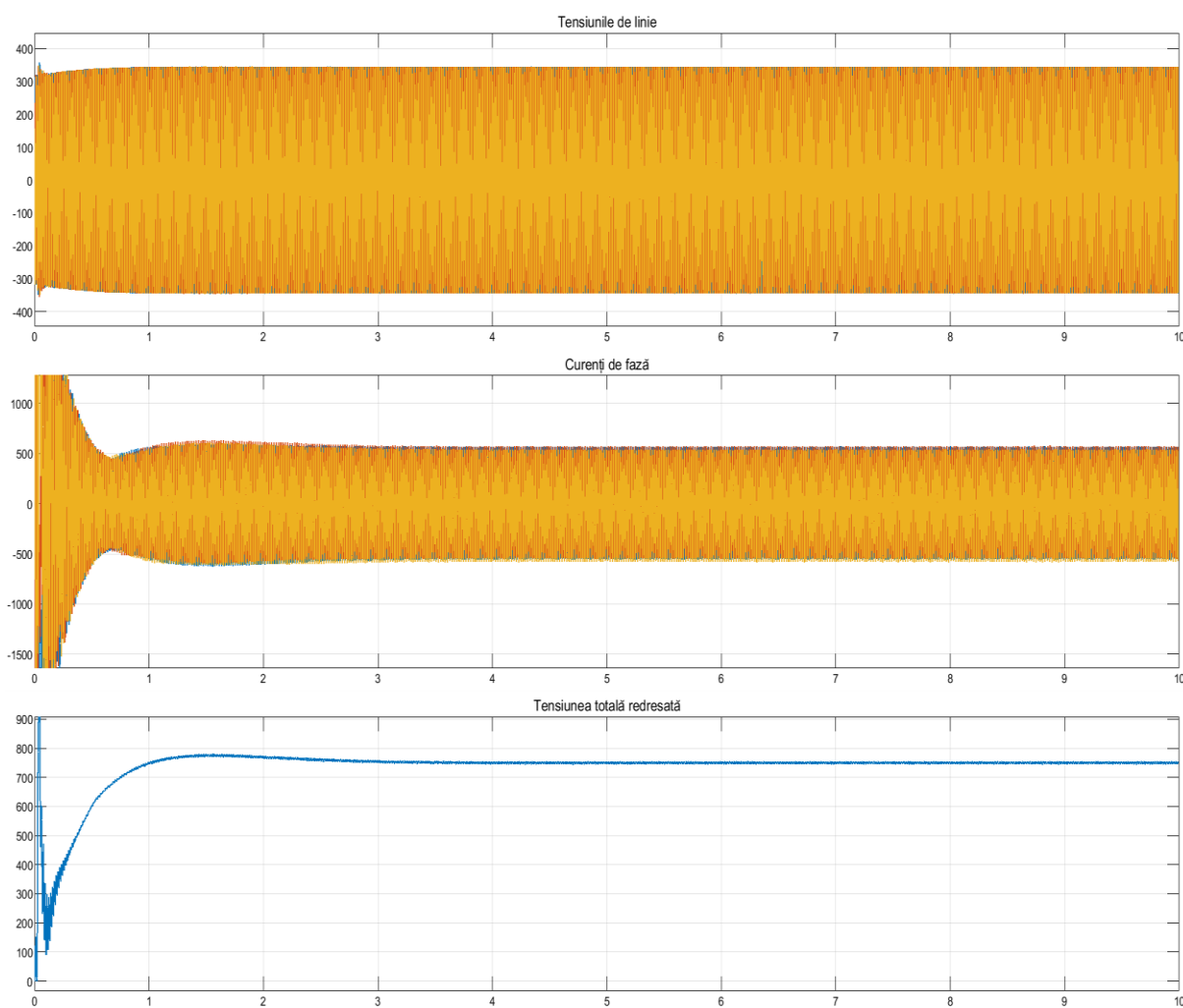


Figura 118. Formele de undă ale tensiunilor și curenților (reprezentare simulare timp 10s).

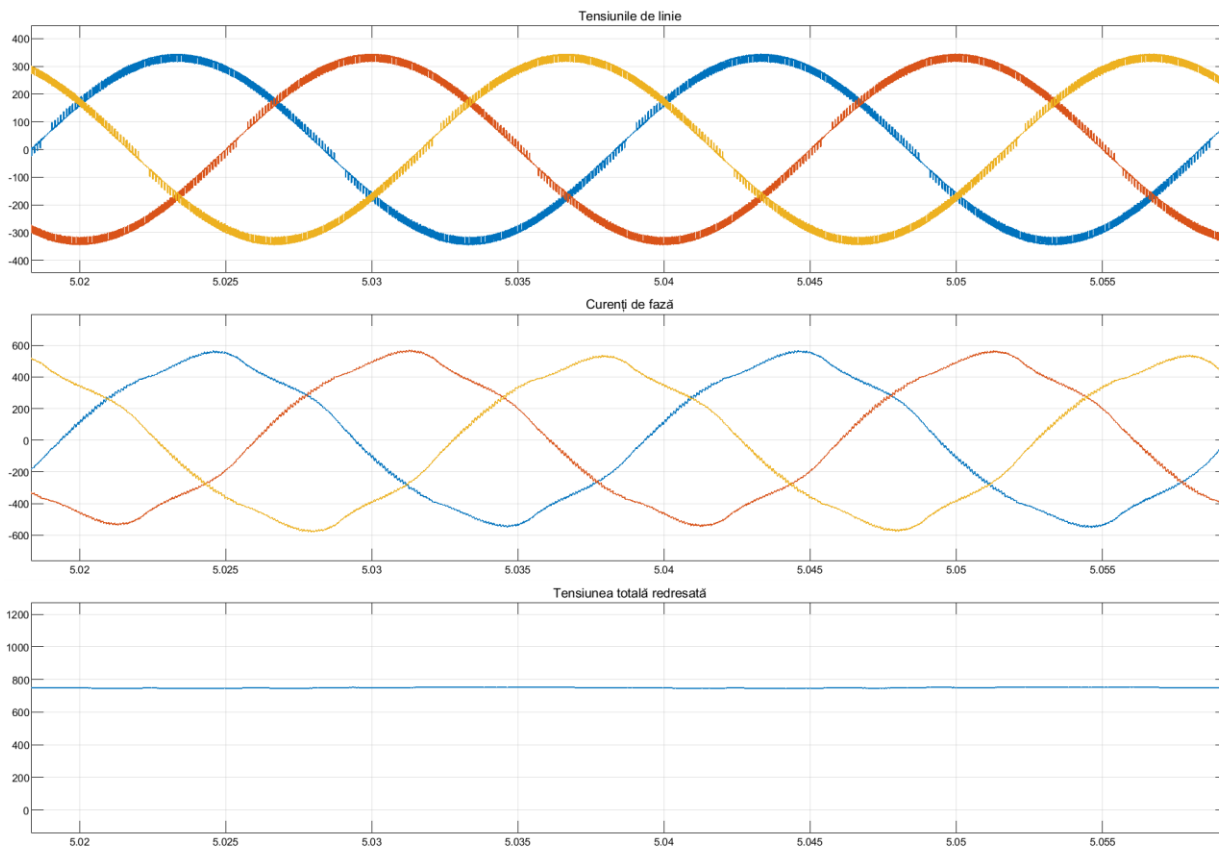


Figura 119. Formele de undă ale tensiunilor și curenților (reprezentare simulare aprox. 40ms ).

Mărimile de control din sistem pot fi urmărite în Figura 120, unde sunt exemplificate valorile acestora (roșu) și evoluția erorilor corespunzătoare (albastru). Se poate observa că erorile buclei de reglare a tensiuni redresate tind la zero, iar eroarea buclei reactive este sub valoarea de zero dar  $V_d$  este aproximativ zero. Se mai pot observa evoluțiile puterii active  $-P$  și a puterii reactive  $-Q$ .

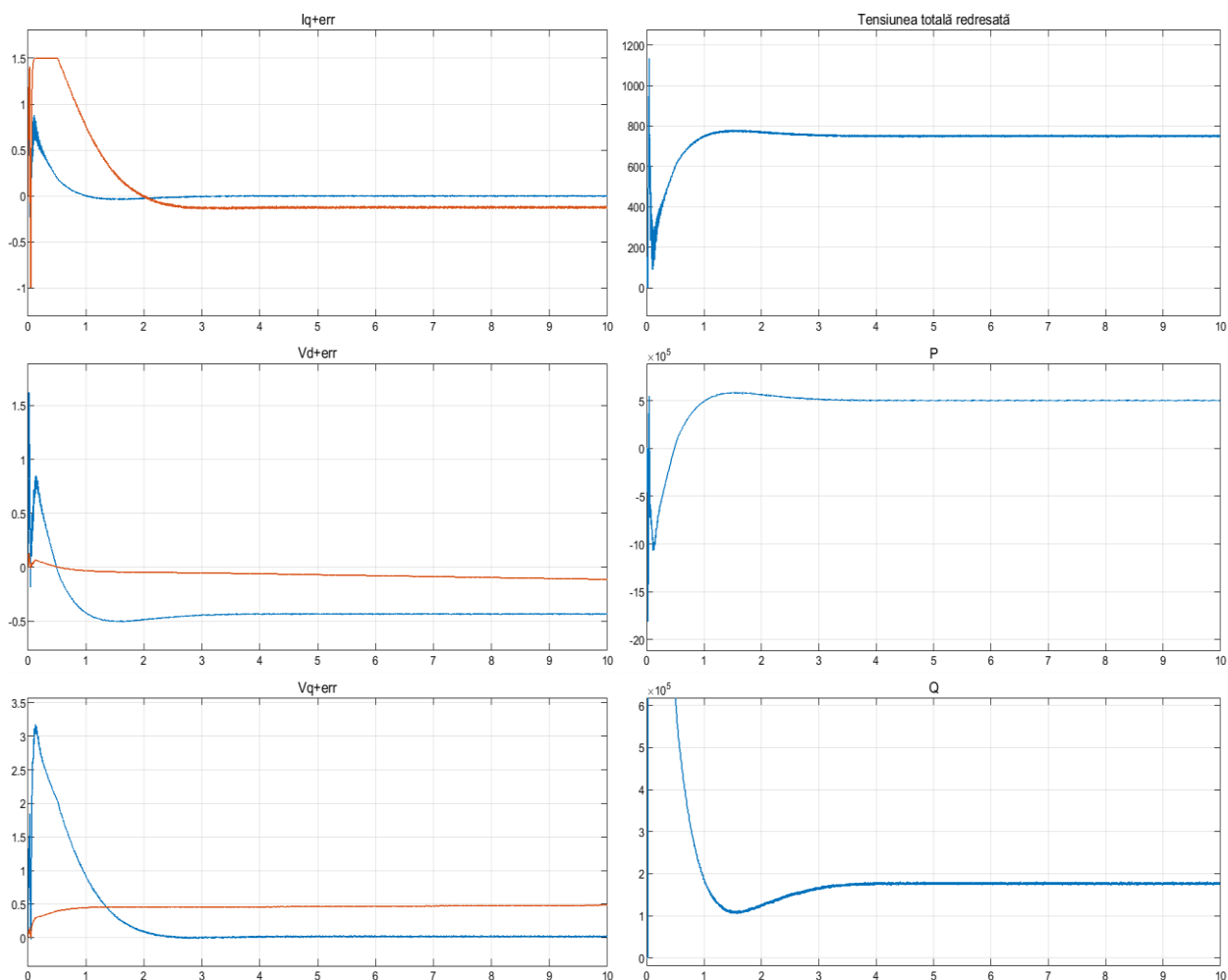


Figura 120. Formele de undă corespunzătoare comenzi.

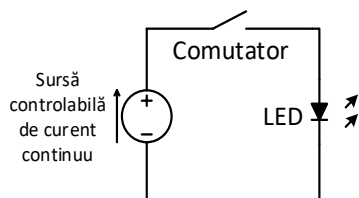
Pe baza acestor parametri s-a obținut o putere reactivă de aproximativ 2,77 ori mai mică de cât puterea activă și folosind acest raport s-a obținut un factor de putere egal cu 0,94.

$$\cos \varphi = \frac{2,77}{\sqrt{2,77^2 + 1^2}} = \frac{2,77}{2,94} = 0,94$$

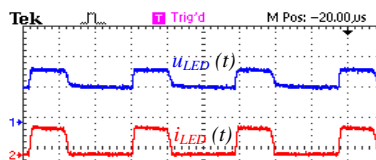
Modelul realizat se poate adapta în mod corespunzător în cadrul etapelor următoare în special pentru realizarea modelului complet de rețea.

## 11. Model sarcină – convertor pentru iluminat LED

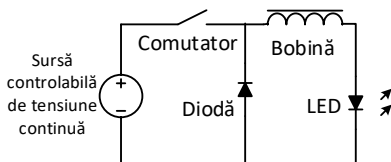
În cadrul etapei a fost realizat un studiu cu privire la impactul formei curentului asupra performanțelor dispozitivelor de iluminat cu LED [1]. Astfel au fost analizate mai multe tipuri de convertoare electronice (Figura 121) pentru iluminat cu LED cu alimentare în curent continuu sau alternativ.



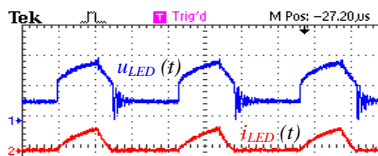
Circuit pentru testare  
Fără riplu de joasă frecvență – curent dreptunghiular prin LED



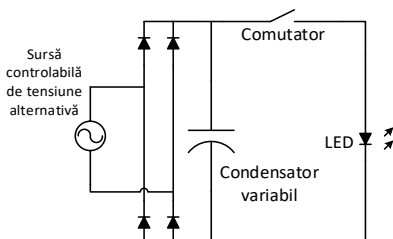
Reprezentare la frecvență ridicată



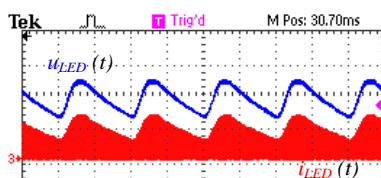
Circuit pentru testare  
Fără riplu de joasă frecvență – curent triunghiular prin LED



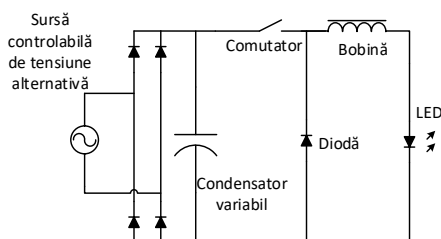
Reprezentare la frecvență ridicată



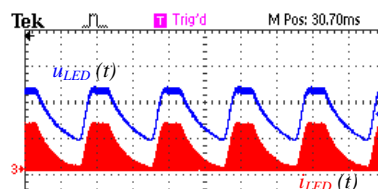
Circuit pentru testare  
50% riplu de joasă frecvență – curent dreptunghiular prin LED



Reprezentare la frecvență joasă



Circuit pentru testare  
100% riplu de joasă frecvență – curent triunghiular prin LED



Reprezentare la frecvență joasă

Figura 121. Reprezentare circuite de testare și formele de undă reprezentative

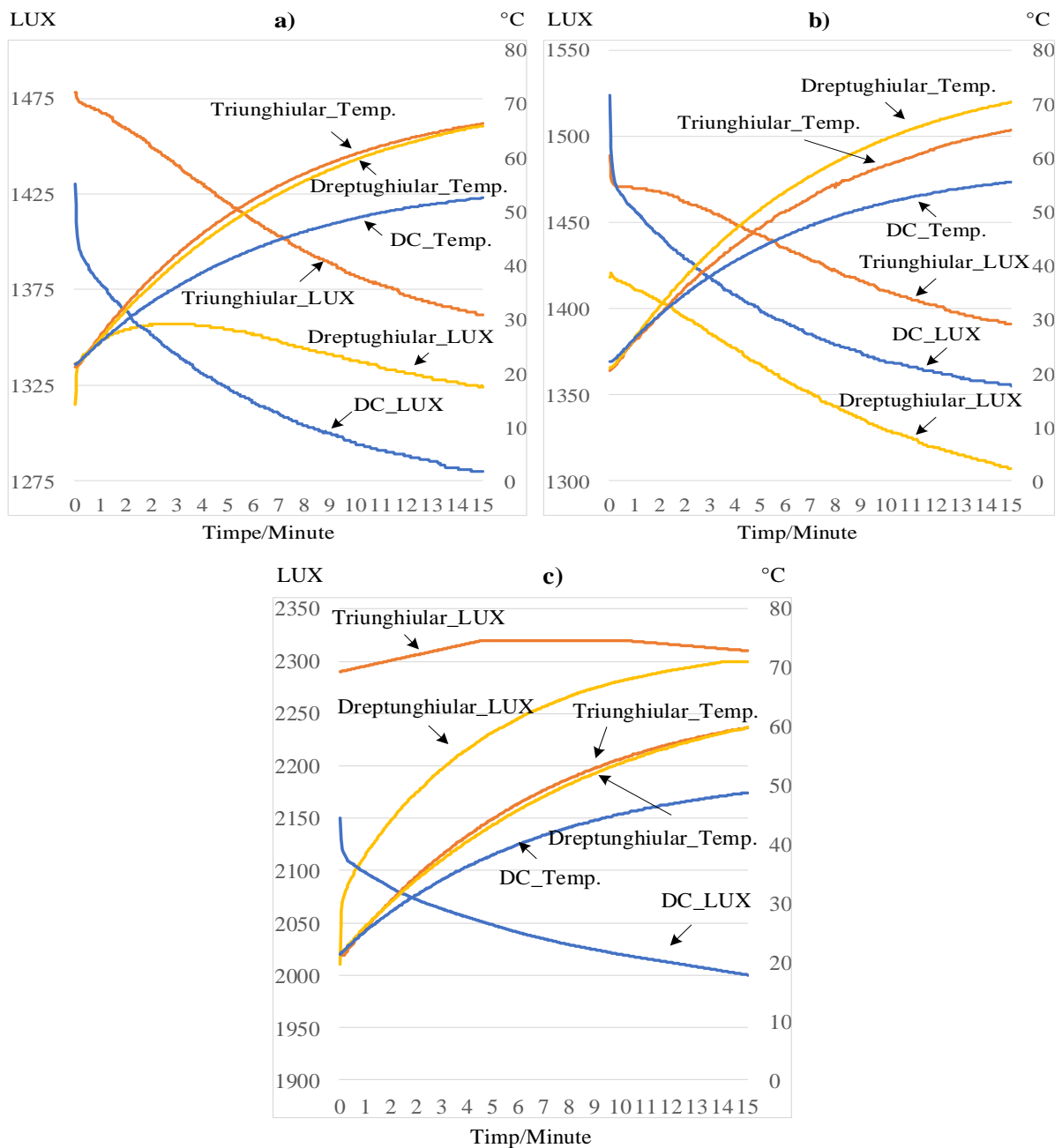
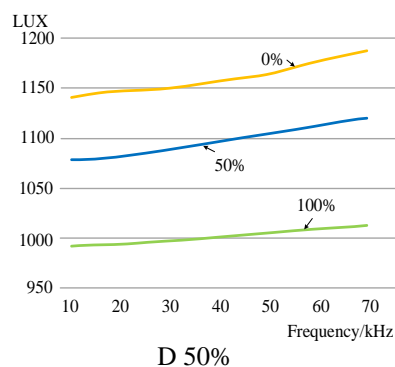
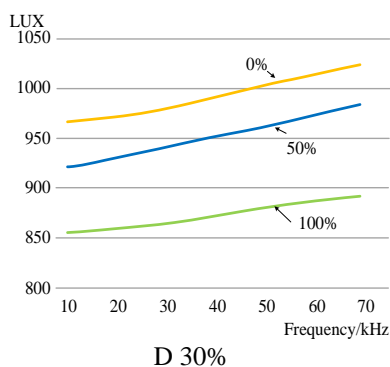
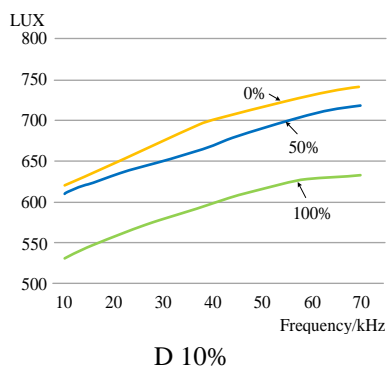


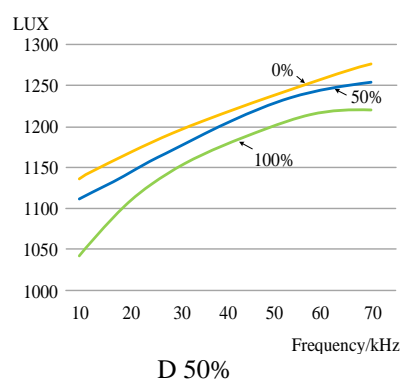
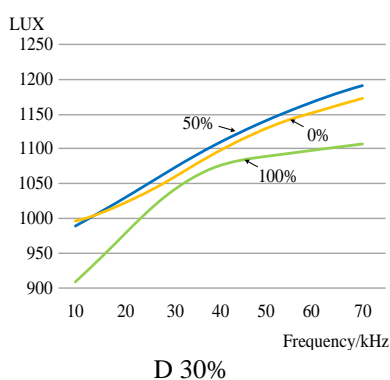
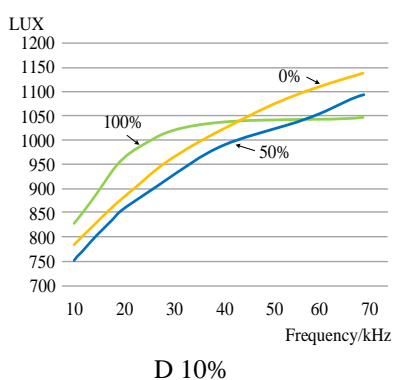
Figura 122. Reprezentările iluminării dispozitivelor LED alimentate cu forme de curent diferite  
(a – CREE; b – CITIZEN; c– OPTOFLASH)

În Figura 122 sunt reprezentate rezultatele obținute pentru 3 tipuri de dispozitive LED. În toate cazurile alimentarea dispozitivelor LED cu un curent triunghiular duce la obținere celor mai bune performanțe. Important de specificat este faptul că puterea electrică este menținută constantă în toate cazurile. În cadrul Figurii 18 sunt reprezentate rezultatele obținute pentru dispozitivul LED Cree considerând diferite ripluri de joasă frecvență și factori de umplere diferiți.





### LED CREE - curent dreptunghiular



### LED CREE - curent triunghiular

Formă curent	Triunghiular							Dreptunghiular						
	10	20	30	40	50	60	70	10	20	30	40	50	60	70
LUX; D-10%; 0% LF Riplu.	785	880	960	1016	1070	1107	1140	620	644	668	698	716	728	740
LUX; D-10%; 50% LF Riplu	753	858	923	984	1020	1048	1090	609	632	650	668	688	705	716
LUX; D-10%; 100% LF Riplu.	827	961	1029	1032	1034	1030	1020	530	555	580	595	609	627	632
LUX; D-30%; 0% LF Riplu	996	1023	1062	1096	1133	1154	1174	966	970	978	989	1001	1012	1022
LUX; D-30%; 50% LF Riplu	990	1030	1070	1105	1142	1168	1192	920	930	939	950	960	972	983
LUX; D-30%; 100% LF Riplu	911	975	1042	1075	1089	1100	1108	854	858	863	870	879	885	890
LUX; D-50%; 0% LF Riplu	1139	1170	1195	1217	1240	1280	1278	1140	1146	1149	1156	1163	1176	1186
LUX; D-50%; 50% LF Riplu	1112	1145	1175	1205	1229	1245	1255	1077	1080	1088	1095	1104	1112	1118
LUX; D-50%; 100% LF Riplu	1043	1109	1152	1180	1200	1220	1222	990	993	995	1000	1004	1007	1011

Figura 123. Rezultate centralizate pentru LED CREE