

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI  
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ



**TEZĂ DE DOCTORAT**  
**REZUMAT**

Metode avansate de analiză a transferului de energie electrică în sisteme  
energetice cu inerție mică

Ing. Radu PLĂMĂNESCU

Coordonator științific: prof. dr. ing. Mihaela ALBU

## CUPRINS

1	Sisteme electroenergetice cu inerție mica.....	5
1.1	Sisteme electroenergetice emergente. Introducere in problematica inerției.....	5
1.2	Rețele active de distribuție. Conceptul de microrețea .....	5
1.3	Concentratori de informație. Definirea masuranzilor caracteristici transferului de energie 7	
1.4	Tehnici emergente de măsurare .....	7
2	Analiza semnalelor caracteristice regimurilor de funcționare cu variabilitate ridicata .....	8
2.1	Introducere in domeniul semnalelor neliniare si nestaționare care caracterizează transferul de energie.....	8
2.2	Analiza Fourier de termen scurt (STFT) .....	8
2.3	Echipeamente cu rata foarte mare de raportare .....	8
2.4	Metoda Hilbert – Huang.....	9
2.4.1	Frecventa instantanee .....	9
2.4.2	Funcții de mod intrinsec.....	9
2.4.3	Descompunerea in regim empiric (EMD).....	9
2.4.4	Semnale de tip masca pentru a separa frecventele înalte .....	10
2.5	O metodă hibridă Hilbert-Huang pentru monitorizarea semnalelor distorsionate cu variabilitate mare în timp.....	10
2.5.1	Transformata Fourier Discreta si Semnale de tip masca pentru îmbunătățirea EMD 11	
2.5.2	Metoda EMD îmbunătățită cu semnale de tip masca.....	11
2.5.3	Metoda de post-procesare.....	11
2.5.4	Abilitatea metodei de a separa componentele interioare.....	12
2.5.5	Demonstrarea metodei.....	14
3	Monitorizarea funcționării si servicii pentru comunitățile de energie bazate pe informație cu rata mare de raportare a contoarelor de energie .....	16
3.1	Contoare inteligente de energie de generație noua .....	16
3.2	Agregare si pierdere de informație .....	16
3.3	Descrierea demonstratorului.....	17
3.4	Metodologie pentru evaluarea cantitativa a pierderii de informație.....	17
3.5	Rezultate experimentale .....	19
3.5.1	Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru unul dintre etajele căminului studentesc.....	19
3.5.2	Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru întreg căminul studentesc ...	20
3.5.3	Scenariu pentru un profil de putere trifazat pentru întreg căminul studentesc.....	20
3.6	Comentarii legate de pierderea de informație asociata profilurilor de putere .....	22

3.7	Creșterea gradului de observabilitate în operare și servicii pentru comunitățile de energie pe baza informație cu rata mare de raportare a contoarelor de energie .....	22
3.7.1	Context și metodologie.....	22
3.8	Scenarii de simulare și evaluarea rezultatelor .....	24
4	Funcționare flexibilă a microrețelelor cu flux de putere cu variabilitate ridicată .....	25
4.1	Context.....	25
4.2	Definirea problemei analizate.....	25
4.3	Profiluri de putere variabilă achiziționate cu rata mare de raportare pentru utilizatorii de energie .....	26
4.4	Profiluri de putere variabile achiziționate cu rata mare de raportare pentru generarea de energie folosind panouri solare.....	27
4.5	Profiluri de putere predefinite cu distribuitorul/furnizorul de energie .....	27
4.6	Sistem de stocare a energiei folosind baterii .....	27
4.7	Condițiile inițiale de simulare pentru comunitatea de energie cu legătura la tensiune continuă .....	28
4.7.1	Standard pentru funcționarea rețelelor DC la joasă tensiune (LVDC).....	28
4.7.2	Utilizatorii Flexi-MLAB .....	28
4.7.3	Generarea PV în cadrul Flexi-MLAB .....	29
4.7.4	Alimentarea cu energie dinspre rețeaua publică de distribuție .....	29
4.8	Mediul de simulare în timp real Typhoon HIL.....	30
4.9	Rezultatele simulării în timp real.....	30
4.9.1	Cazul 2. Scenariul asociat unei zile de weekend de vară .....	30
4.10	Introducere în domeniul simulării digitale în timp real și mediul Typhoon HIL .....	31
5	Concluzii și contribuții personale .....	32
5.1	Concluzii.....	32
5.2	Contribuții personale .....	34

## 1 Sisteme electroenergetice cu inerție mica

### 1.1 Sisteme electroenergetice emergente. Introducere in problematica inerției

Sistemul electroenergetic este o infrastructura critica. Funcționarea acestor sisteme a cunoscut o evoluție continua in ultima suta de ani gratie dezvoltărilor fără precedent in industria electrotehnica, electronica si energetica. In ultimii ani s-a produs o schimbare de paradigma in funcționarea sistemelor electroenergetice care include si distribuția energiei electrice la tensiune continua.

Inerția în sistemele energetice se referă la energia stocată în generatoarele mecanice mari și in unele motoare industriale, ceea ce le oferă tendința de a rămâne în rotație. Această energie stocată poate fi deosebit de importanta, atunci când o centrală mare iese din funcțiune, deoarece ea poate compensa temporar puterea pierdută de la generatorul defect. Acest răspuns temporar – care este de obicei disponibil pentru câteva secunde – permite sistemelor mecanice care controlează. Pe măsură ce rețeaua evoluează odată cu instalarea pe scara larga a generatoarelor interfațate de convertoare statice – de exemplu, generarea eoliana, fotoelectrică și stocare în baterii electrochimice – care nu poseda inerție, au început întrebările cu privire la necesitatea inerției și rolul acesteia în evoluția sistemelor energetice. Astfel, inerție unui sistem electroenergetic scade pe măsură ce utilizarea convertoarelor statice in transferul de energie crește. Inerția scăzută a unui sistem energetic duce la creșterea vitezei de variație a frecvenței (rocof) și a deviațiilor de frecvență într-un interval de timp scurt cauzate de dezechilibrele de putere (generată și utilizată) care afectează stabilitatea sistemului. [149,][153]. De obicei inerția unui generator este descrisa în termeni de energie cinetică de rotație stocată [38], astfel încât inerția are aceeași unitate de măsură ca energia (putere furnizată într-o perioadă de timp).

### 1.2 Rețele active de distribuție. Conceptul de micronețea

In acest capitol se va face o scurta introduce si analiza a noțiunii de micronețea [59], ca structură a rețelei de distribuție care poate debloca potențialul surselor distribuite de Energie (DG), formând astfel blocuri/elemente constitutive ale viitoarelor rețele active de distribuție. Pe scurt, rețelele de distribuție se transformă din rețele pasive in rețele active, in sensul in care deciziile si controlul transferului de energie se face distribuit si bidirecțional.

In prezent, exista mai multe definiții pentru micronețele:

- ca sisteme de distribuție a energiei electrice, compuse din utilizatori si surse distribuite de energie (cum ar fi generatoare distribuite, echipamente de stocare sau utilizatori a căror funcționare poate fi controlata), care pot fi operate într-un mod controlat si coordonat atât in funcționare conectate la rețeaua de distribuție cat si in mod izolat [21];
- ca sisteme locale de distribuție de mici dimensiuni, care conțin generare și consumatori, a căror funcționare poate fi separată în totalitate de sistemul public de distribuție sau conectată la acest sistem, (care diferă de sistemele energetice insularizate existente – cum ar fi platformele *offshore* de petrol/gaz, nave etc.) în care conectarea și deconectarea de la rețeaua publica este un eveniment cu apariție regulata [17];
- ca sisteme de distribuție, cuprinzând sisteme la joasa tensiune, cu surse distribuite de energie (micro-turbine, panouri fotoelectrice PV, etc.), elemente de stocare a energiei (sisteme de baterii, condensatoare, roti volante) si utilizatori variabili (cu flexibilitate in operare), care pot funcționa conectate la rețeaua principala sau in sistem insularizat, într-un mod controlat si coordonat [59] si au un singur punct de conectare cu rețeaua publica.

În principiu, partea de control a transferului de energie este elementul care distinge micronețele de rețelele de distribuție cu generare distribuită. O micronețea poate funcționa in mai multe scenarii

și sub diverse forme așa cum este prezentat și descriptiv în Figura 1-1. În general, puterea nominală a unei microrețele (în ceea ce privește cererea maximă de energie) este limitată la câțiva MW.

Conceptul de microrețea include 3 caracteristici importante: utilizatori de energie (locali), generatoare de putere mică (microgeneratoare) locale și controlul transferului de energie. În multe dintre situații se ia în considerare și protecția mediului înconjurător prin definirea amprentei de carbon asociate funcționării, prin utilizarea generării din surse regenerabile de energie și tehnologii de cogenerare. În absența uneia dintre caracteristici, discuția este despre interconectarea generării distribuite sau agregarea cererii de energie. O clarificare vizuală a ceea ce *nu* reprezintă o microrețea este prezentată în Figura 1-2.

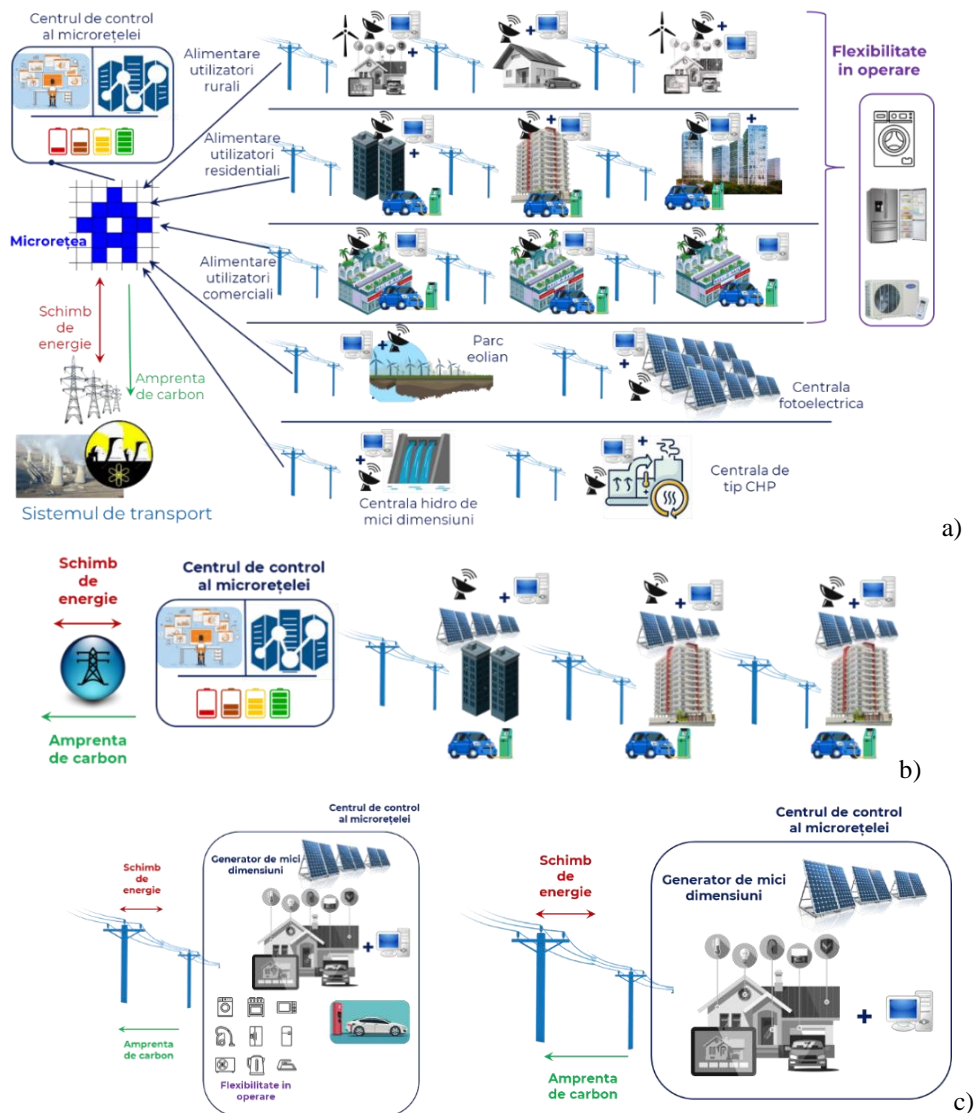


Figura 1-1. Diverse tipuri de microrețea

a) microrețea ca o rețea la joasă tensiune b) microrețea ca alimentare radială la joasă tensiune c) microrețea ca infrastructura a unei locuințe/utilizator la joasă tensiune (sub două forme)

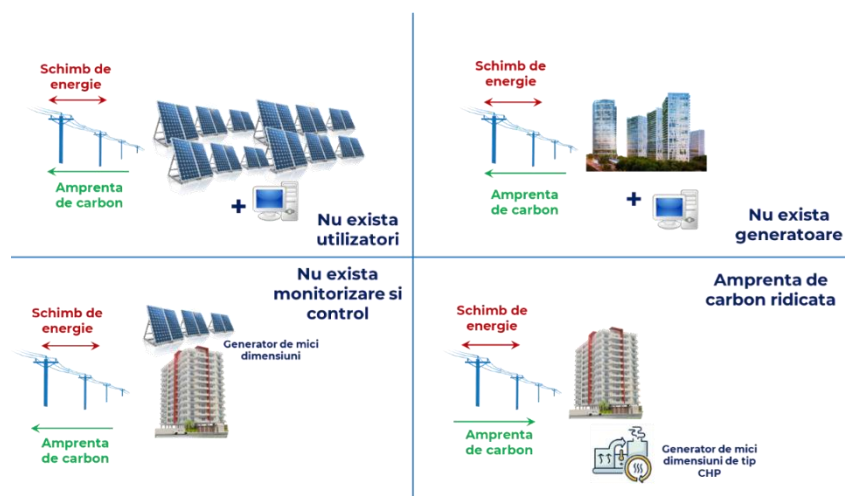


Figura 1-2. Exemple simple de structuri energetice care nu sunt micrețele

### 1.3 Concentratori de informație. Definierea masuranzilor caracteristici transferului de energie

Transferul de energie într-un sistem energetic este asociat de obicei unui model caracterizat de mărimi asociate unui sistem sinusoidal periodic. În analiza și extragerea informațiilor ce provin de la sistemul analizat se urmărește determinarea parametrilor care caracterizează transferul de energie. În acest context semnalele asociate mărimilor ce descriu funcționarea sistemului pot fi descrise de un set minimal de parametri, așa numiții concentratori de informație. Acest lucru presupune o pierdere de informație prin reducerea setului de valori ce descrie variația mărimii de măsurat pe durata măsurării  $T_m$  la una sau două valori măsurate. Astfel, pentru un semnal periodic  $x(t)$  se definesc următorii parametri caracteristici semnalului pe durata intervalului de măsurare (valoarea medie, valoarea medie redresată, valoarea efectivă). Mai mult, acești parametri sunt supuși unor algoritmi de agregare (mediere pătratică sau aritmetică) [63] pentru a obține rate de raportare a valorilor măsurate compatibile cu sistemele de măsurare și control adecvate sistemelor electroenergetice cu inerție mare (uzual 3s).

### 1.4 Tehnici emergente de măsurare

Abordarea este dată de incertitudinea asociată modelelor fenomenelor considerate în obținerea semnalelor ce caracterizează transferul de energie în regim nestaționar, date ce sunt rezultatul măsurării și depind de calitatea asociată procesului, calitate numită în continuare paradigma 2M. Astfel, pentru măsurarea caracteristicilor unui semnal variabil în timp, fără pierdere de informație, trebuie găsită o relație între durata măsurării, banda de frecvență a sistemului de măsurare și viteza de variație (banda de frecvență) a semnalului [57], [91], împreună cu modelul semnalului de măsurare considerat și dincolo de aplicarea simplistă a teoremei eșantionării [74]. Este propus un concept de semnalizare (*label* sau *flag*) pentru mărimile supuse măsurării, în condiții de regim staționar, bazat pe monitorizarea de tip RVC definită în ultimul standard IEC 61000-4-30 (ed. 3) [74]. Acest concept de identificare a variației de tip staționar se va numi **3S**. Prin definirea acestui concept se poate trece la o propunere pentru o definiție mai complexă a procesului de măsurare (denumită paradigmă **4M**) prin includerea în rezultatul măsurării și a semnalizării de tip **3S** provenind din selectarea, în funcție de aplicație, a ferestrei de analiză.

## **2 Analiza semnalelor caracteristice regimurilor de funcționare cu variabilitate ridicată**

### **2.1 Introducere în domeniul semnalelor neliniare și nestaționare care caracterizează transferul de energie**

Informația de măsurare reprezintă realitatea percepută de oameni; prin urmare, analiza acestora are două scopuri: determinarea parametrilor necesari construirii unui model de analiză și confirmarea construirii modelului de a reprezenta fenomenul fizic analizat. Elemente specifice ale diferitelor moduri componente ale semnalului care variază în timp pentru semnalele distorsionate de tensiune și curent sunt date de faptul că valoarea distorsiunilor este mică și variază de obicei între 1%–10% (pentru tensiune) și 10%–30% (pentru curent) față de componenta fundamentală, frecvența fundamentală nu este nici ea constantă în timpul observației, și de asemenea frecvențele distorsiunilor în studiile privind calitatea energiei electrice se pot încadra într-o octavă, ceea ce reprezintă o provocare de separare a acestora. Lucrând cu astfel de informații, există opțiuni limitate de analiză.

### **2.2 Analiza Fourier de termen scurt (STFT)**

O abordare alternativă pentru analiza semnalelor nestaționare (variabile în timp) și realizarea unei analize spectrale dependente de timp este reprezentată de Transformata Fourier pe Termen Scurt. Este o metodă de estimare a spectrului de frecvență a unui semnal variabil în timp. Abordarea acestei metode presupune împărțirea semnalului în mai multe intervale de lungime egală (care se pot suprapune sau nu) folosind o fereastră alunecătoare și apoi aplicarea transformatei Fourier peste aceste intervale (transformata Fourier aplică pe ferestre alunecătoare). Principalul dezavantaj al transformatei Fourier pe termen scurt poate fi subsumat principiului incertitudinii, care decurge din limitările teoretice ale transformatei Fourier. Când dimensiunea ferestrei utilizate scade, localizarea în timp a componentelor semnalului crește dar, în același timp, identificarea în frecvență scade. Când dimensiunea ferestrei crește, se întâmplă invers, se cunoaște frecvența, dar localizarea în timp a componentei respective scade. Metoda transformatei Fourier folosind ferestre alunecătoare este folosită în identificarea componentelor de frecvență înaltă prezente în semnalele variabile, până la limita de 150 kHz, folosind metoda de măsurare specificată în ultima ediție a standardului IEC 61000-4-7 [78], având contribuții din specificațiile de implementare din CISPR 16-1-1 [77].

### **2.3 Echipamente cu rată foarte mare de raportare**

Tehnologia măsurărilor sincronizate a fazorilor sau măsurarea parametrilor sincrofazorilor ce caracterizează transferul de energie a fost propusă pentru monitorizarea, observarea comportamentului sistemului și controlul în timp real pentru funcționarea optimă a sistemului energetic. Potențialul sincrofazorilor în multe aplicații de monitorizare, protecție, funcționare și control a sistemului energetic a fost exploatat prin instalarea echipamentelor de tip Unități de Măsurare a Fazorilor (PMU). Pentru creșterea observabilității și vizibilității fenomenelor dinamice în cazul aplicațiilor de monitorizare și control, valoarea ratei de raportare a echipamentelor de măsurare sincronizate a fazorilor este în mod uzual de 50 de cadre pe secundă. Caracteristica importantă a acestor sisteme de măsurare este legată de utilizarea informației de timp disponibilă cu precizie ridicată (40–50 ns, caracteristic sistemului de sateliți utilizat).

## 2.4 Metoda Hilbert – Huang

Metoda analizată în acest capitol (metoda Hilbert-Huang), prezentată pe larg [62] iar mai apoi cu o propunere de îmbunătățire [115], abordează problema semnalelor distorsionate prin descompunerea semnalului distorsionat în mono-componente existente la diferite scări de timp, estimarea frecvențelor și amplitudinilor instantanee ale fiecărei componente și localizarea variațiilor temporale ale acestor amplitudini și frecvențe cu exactitate pe scala de timp.

În acest capitol, se va prezenta o metodă de analiză a informației de măsurare bazată pe descompunerea în regim empiric (EMD), care va genera o serie de funcții de mod intrinsec (IMFs). Descompunerea se bazează pe extracția energiei asociată la diferitele variații în timp ale componentelor semnalului analizat. Semnalul este astfel descompus în funcții de mod intrinsec (IMFs), care mai departe sunt analizate folosind transformata Hilbert, pe baza căreia se pot calcula „frecvențele instantanee”. Astfel, orice eveniment poate fi localizat atât în timp, cât și în frecvența

### 2.4.1 Frecvența instantanee

Ideea de „frecvență instantanee”, este relevantă o dată cu introducerea transformatei Hilbert pentru care în orice moment, se poate calcula o singură valoare a frecvenței, care caracterizează o singură componentă (de unde provine astfel și denumirea de „mono-componentă”).

### 2.4.2 Funcții de mod intrinsec

O funcție de mod intrinsec (IMF) este o funcție care îndeplinește două condiții: în primul rând pentru domeniul de definiție al semnalului, numărul de puncte de extrem și numărul de treceri prin zero trebuie fie egal sau să fie diferit cu cel mult o unitate; și în al doilea rând, în orice moment, valoarea medie a semnalului între punctul de maximum local și punctul de minimum local trebuie să fie egală cu zero. Astfel pentru a utiliza definiția unică a „frecvenței instantanee” asupra unei variabile aleatoare, aceasta trebuie descompusă în componente de mod intrinsec (IMF) pentru care se poate calcula „frecvența instantanee” pentru fiecare în parte. În consecință, pentru semnalele cu variabilitate ridicată, putem avea mai multe frecvențe instantanee la un moment dat la nivel local.

### 2.4.3 Descompunerea în regim empiric (EMD)

Conform definiției unei funcții de tip IMF, metoda de descompunere se prezintă pe scurt folosind următorii pași:

- a1) Identificarea punctelor de maximum și minimum local asociate semnalului analizat,  $x(t)$ ;
- a2) Aplicarea interpolării de tip „spline” între punctele de maximum și minimum local pentru a obține două noi semnale  $s_M(t)$  și respectiv  $s_m(t)$ ;
- a3) Crearea unui nou semnal ca medie a celor două noi semnale de mai sus,  $m(t) = \frac{s_M(t) + s_m(t)}{2}$ ;
- a4) Determinarea  $c_1(t) = X(t) - m(t)$ ;
- a5)  $c_1(t)$  este de tip IMF dacă numărul de puncte de extrem local este egal sau diferă de numărul trecerilor prin zero cu o unitate, și media este zero. Dacă  $c_1(t)$  nu este de tip IMF, se repeta pașii descriși de punctele de mai sus (a1 – a4) asupra semnalului  $c_1(t)$  (nu asupra lui  $X(t)$ ) până când noul semnal  $c_1(t)$  obținut satisface condițiile unei funcții de tip IMF;
- a6) Calcularea semnalului rezidual  $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ ;
- a7) Dacă semnalul rezidual  $r_1(t)$  este peste o valoare impusă a erorii, atunci se repeta pașii de la a1) – a6) asupra semnalului  $r_1(t)$  pentru a obține o altă funcție de tip IMF și un nou semnal rezidual;



#### 2.4.4 Semnale de tip mască pentru a separa frecvențele înalte

Semnalele de tip mască sunt introduse pentru a putea separa componente ale căror frecvențe se află în aceeași octavă și pentru a putea pune în evidență semnalele de energie mică în spectrul superior de frecvență, astfel încât să poată fi „cernute” în timpul analizei EMD.

#### 2.5 O metodă hibridă Hilbert-Huang pentru monitorizarea semnalelor distorsionate cu variabilitate mare în timp

Accentul este pus pe profilurile (dar și tiparele) de consum puternic influențate de tipurile de aparate electrocasnice dar și de încărcarea vehiculelor electrice.

Metoda prezentată se bazează pe Transformata Fourier, descompunerea în moduri empirice, EMD îmbunătățită cu semnale de tip mască, Transformata Hilbert și un algoritm de descompunere în intervale de regim staționar pentru identificarea ulterioară a amplitudinilor și frecvențelor fiecărei mono-componente din interiorul semnalului original.

Semnalul  $x(t)$ , în cadrul ferestrei de analiză  $T_a$  este eșantionat cu frecvența de eșantionare adecvată  $f_s$ , rezultând semnalul discret  $x[p]$ , cu incertitudinea standard de măsurare în limitele date de lanțul de măsurare (de obicei 2%, pentru condiții normale de funcționare). În ceea ce privește tipul de prosumator analizat pentru rețeaua la joasă tensiune,  $f_s$  ar trebui să aibă o valoare mai mare de 10 kHz. În cadrul acestei analize a fost folosită o frecvență de eșantionare de 20 kHz,  $f_s = 20 \text{ kHz}$  și o fereastră de analiză  $T_a = 1 \text{ s}$ . Pașii parcurși pentru aplicarea metodei sunt următorii:

1.  $x[p]$  (corespunzător lui  $x(t)$  în intervalul  $T_a$ ) este descompus în modurile de oscilație care îl compun cu ajutorul metodei de descompunere în mode empirice EMD, dar îmbunătățită cu semnale de tip mască (obținute prin aplicarea Transformatei Fourier Discrete asupra semnalului original  $x[p]$ ).
2. Semnalele de tip mască sunt create folosind algoritmul consacrat și, deoarece procesul se bazează pe spectrul de frecvență [global] rezultat, noutatea/îmbunătățirea este legată de selecția adecvată a componentelor (amplitudini și frecvențe) de interes prin setarea unui prag, discriminând informațiile utile de zgomot.
3. Prin aplicarea descompunerii în mod empiric (EMD) asupra semnalului eșantionat, se vor obține funcții de tip mono-componente numite funcții de mod intrinsec (IMF). Fiecare dintre acestea, pentru o fereastră de timp aleatoare, are media egală cu zero și numărul de extreme locale egal sau diferit cu cel mult 1 față de numărul de treceri prin zero.
4. După obținerea componentelor de tip funcții de mod intrinsec (IMF), este aplicată transformata Hilbert pentru a calcula amplitudinile și frecvențele corespunzătoare (instantanee) componentelor obținute. Astfel descompunerea în componente de tip funcții de mod intrinsec (IMF) emulează o descompunere de tip Fourier generalizată având eficiență și aplicabilitate în studiul semnalelor nestaționare (caracterizate de amplitudini și frecvențe variabile).
5. În unele cazuri, când metoda de descompunere în mod empiric (EMD) îmbunătățită cu semnale de tip mască nu furnizează semnale (componente) de tip mono-componente (funcții de mod intrinsec), se recomandă ca după aplicarea transformatei Hilbert să fie aplicat un proces de demodulare. După aplicarea transformatei Hilbert se poate observa o modulație rezultantă.
6. Fiecare componentă de tip funcție de mod intrinsec (IMF) reprezintă o aproximație a modurilor de oscilație prezente în componenta semnalului și astfel este necesară introducerea unei metode de post-procesare. Aceasta metodă va fi prezentată pe larg în această lucrare și presupune identificarea intervalelor de timp cuasi-staționare pe baza frecvenței instantanee calculată folosind transformata Hilbert. Prin obținerea și detectarea

intervalelor de timp în care semnalul are o variație staționară, transformata Fourier clasică este folosită pentru a obține amplitudinile și frecvențele adevărate ale componentelor interioare ale semnalului original.

Abordarea metodei din această teză este o continuare a celei propuse original [150], și are ca scop îmbunătățirea performanțelor acesteia și de a extinde aria de aplicații care implică analiza semnalelor distorsionate și este prezentată în Figura 2-1.

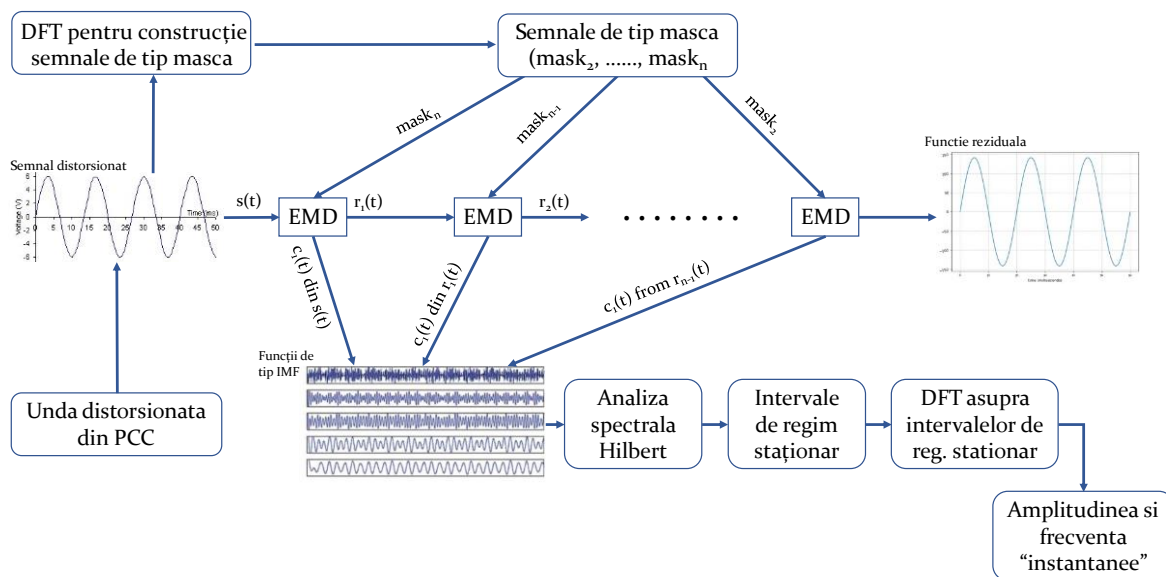


Figura 2-1. Pașii pentru descompunerea semnalelor distorsionate în componente de înaltă frecvență folosind metoda Hilbert-Huang

### 2.5.1 Transformata Fourier Discretă și Semnale de tip masca pentru îmbunătățirea EMD

Principalul punct evidențiat în această secțiune este că metoda EMD propusă de Huang pentru a determina frecvența instantanee a semnalelor de tip mono-componentă (semnale denumite IMF) este îmbunătățită cu semnale de tip masca generate corespunzător. Metoda este îmbunătățită cu o tehnică inovatoare și versatilă a Transformatei Fourier Discrete (DFT) esențială pentru calcularea parametrilor semnalelor de tip masca. Semnalul original (în cazul nostru al intensității curentului prin circuit)  $i(t)$ , supus investigației pe durata ferestrei de timp  $T_w$ , este eșantionat cu frecvența de eșantionare adecvată  $f_s$  rezultând semnalul discret  $i[p]$ . Ulterior, frecvențele estimate și amplitudinile asociate vor fi selectate în mod adecvat din spectrul de frecvență rezultat, iar semnalele de tip masca vor fi create pe baza rezultatelor Transformatei Fourier Discrete.

### 2.5.2 Metoda EMD îmbunătățită cu semnale de tip masca

Metoda de descompunere în mod empiric (EMD) este aplicată semnalelor neliniare, nestaționare și variabile în timp pentru a fi descompuse în mai multe funcții de mod intrinsec (IMF) care satisfac proprietățile transformatei Hilbert.

### 2.5.3 Metoda de post-procesare

Pentru a obține valorile reale pentru amplitudinile și frecvențele componentelor interioare ale semnalului eșantionat, se va efectua la final o analiză DFT pe aceste intervale cvasi-staționare. Se calculează apoi media alunecătoare aplicată rezultatelor transformatei Hilbert, pentru a accentua tranziția între intervale de timp în care semnalul își modifică tipul de variație.

În această secțiune este propusă și definită o metodă de descompunere a semnalului original în ferestre de timp în cadrul cărora semnalul are variație staționară pe baza rezultatelor transformatei Hilbert și a unei abordări adaptate pe baza algoritmului de identificare a tranzițiilor rapide de

tensiune (RVC) [63]. Algoritmul va fi denumit „Identificarea intervalelor cvasi-staționare” (QSSI). Diagrama logică a procedurii pe care se bazează algoritmul QSSI este prezentată mai jos, în Figura 2-2.

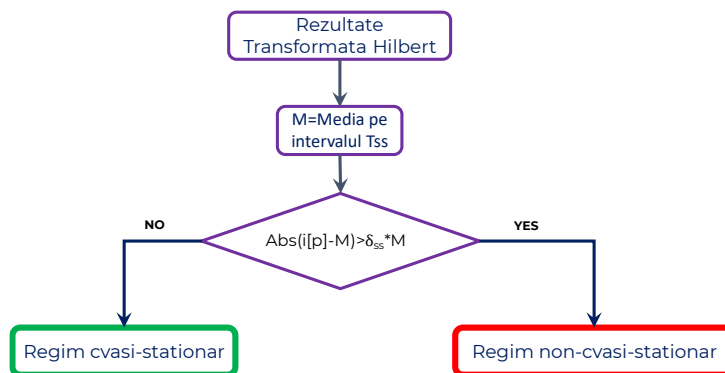


Figura 2-2. Algoritmul QSSI folosit pentru metoda hibrida Hilbert-Huang

### 2.5.4 Abilitatea metodei de a separa componentele interioare

Un semnal sintetic discret de tip intensitatea curentului electric a fost creat pentru validarea metodei. Un semnal distorsionat care emulează parametrii intensității curentului într-un punct comun de conexiune pentru o comunitate locala de energie este construit și eșantionat cu o frecvență de 51,2 kHz, având frecvența fundamentală de 50 Hz și mai multe componente variabile în timp, așa cum este descris în Tabel 2-1. Pentru exemplificare, după cum se poate observa în tabel, componentele nu sunt prezente pe toata durata ferestrei de timp de analiza ( $T_w$ ), ci doar pe anumite intervale, amplitudinile lor fiind exprimate în procente din valoarea efectivă a semnalului original.

Tabel 2-1. Componentele semnalului original aflat sub analiza

Interval de timp [s]	Amplitudinea componentei (% din valoare efectivă a semnalului)				
	150 Hz	250 Hz	350 Hz	430 Hz	450 Hz
0–0.253	23%	9%	19%	0%	0%
0.253–0.450	14%	0%	5%	0%	5%
0.450–1	0%	15%	0%	15%	0%

Semnalul descris în tabelul de mai sus este reprezentat grafic în Figura 2-3a împreună cu spectrul său DFT (Figura 2-3b) al componentelor furnizate de analiza Fourier. Spectrul DFT este primul pas în cadrul metodei hibride Hilbert-Huang.

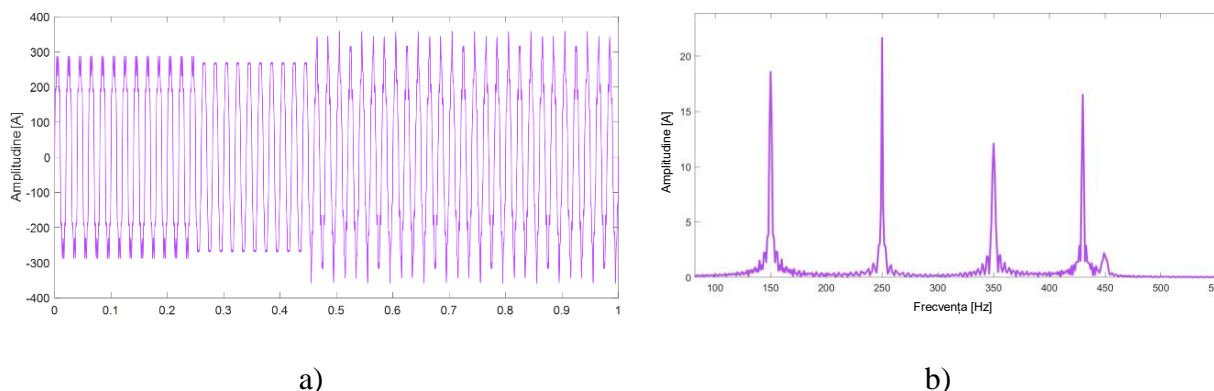


Figura 2-3. (a) Semnalul original discret descris în Tabel 2-1, (b) Spectrul analizei Fourier (DFT) asociat semnalului original în domeniul 100 Hz - 550 Hz

Pe baza informațiilor de frecvență obținute din spectrul DFT, au fost create semnale de tip masca pentru a îmbunătăți metoda EMD și pentru a extrage în mod corespunzător patru mono-componente de tip IMF. Peste fiecare IMF a fost aplicată Transformata Hilbert, apoi filtrare printr-o medie alunecătoare a rezultatelor și, în final, cu ajutorul metodei propuse de post-procesare descrisă în Secțiunea 2.5.3 au fost identificate trei intervale cvasi-staționare. Trebuie menționat ca trecerile bruște de la un interval de variație la altul au fost omise (înlăturate din rezultate) din cauza efectului tranzitoriu de scurta durată, fără semnificație fizică. După obținerea acestor intervale de timp, s-au aplicat ferestre de tip Hanning pe fiecare interval, obținându-se următoarele semnale, după cum se poate observa în Figura 2-4.

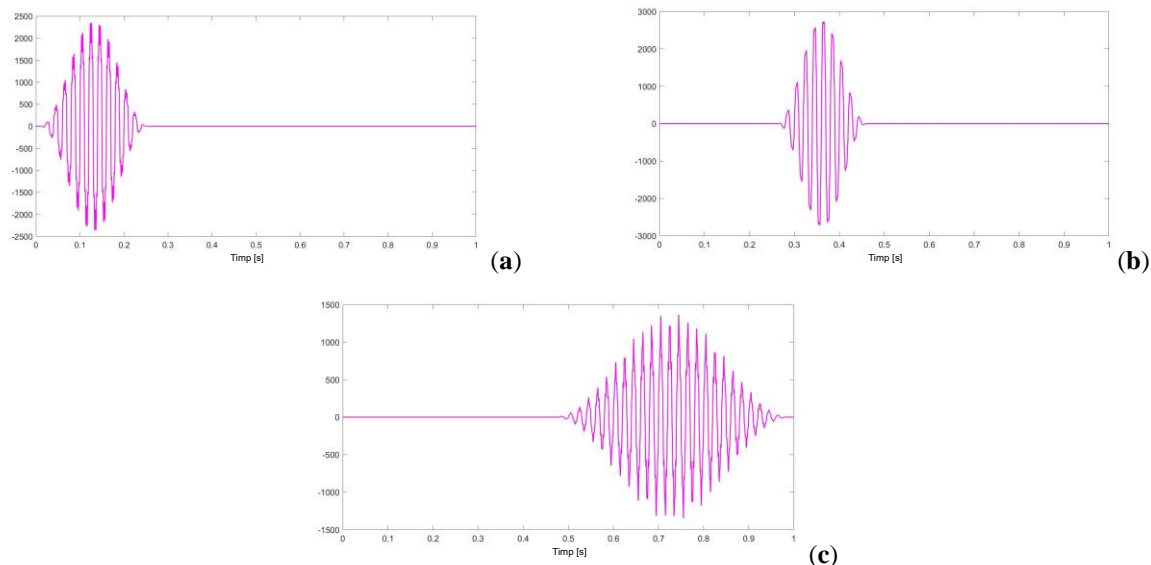


Figura 2-4. (a) Primul interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning; (b) al doilea interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning (c) al treilea interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning

Cu obiectivul de a identifica și separa modurile de oscilație interioare semnalului distorsionat, cu intervalele cvasi-staționare calculate, se poate aplica DFT pe fiecare dintre aceste intervale de timp și se pot calcula frecvențele instantanee și amplitudinea componentelor interioare ale semnalului original nestaționar, nelinier. Frecvențele finale și amplitudinile corespunzătoare sunt prezentate în Figura 2-5, observând ca metoda a identificat cu succes mono-componentele, a identificat intervalele de timp și la final a fost aplicat DFT aplicat pe intervale cvasi-staționare.

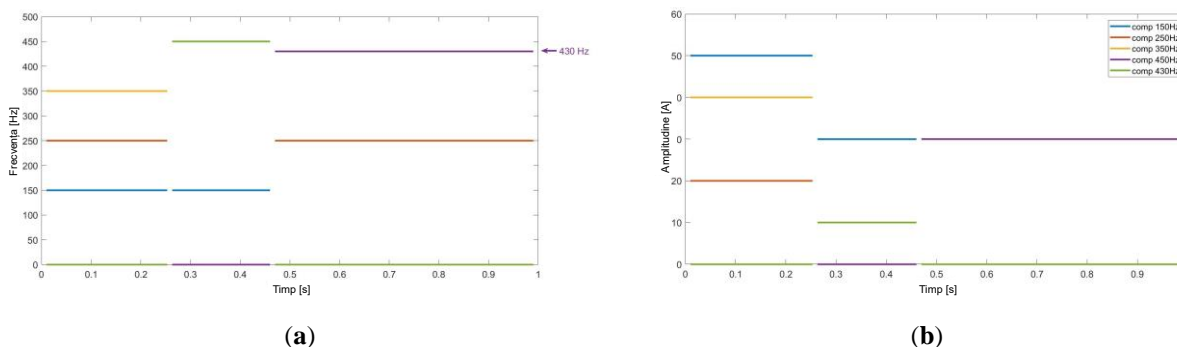


Figura 2-5. (a) Frecvențele instantanee și (b) amplitudinile mono-componentelor - extrase folosind metoda hibridă Hilbert - Huang, pe semnalul sintetic descris în Tabel 2-1

### 2.5.5 Demonstrarea metodei

Pentru a demonstra aplicarea metodei, a fost folosit un semnal achiziționat pentru intensitatea curentului electric specific funcționării unui cuptor cu microunde, iar informația de măsurare a fost furnizată de un echipament ELSPEC folosit în analizele de calitate a energiei [37]. Semnalul asociat intensității curentului eșantionat cu 1024 de puncte pe perioada (fundamentală a semnalului de 50 Hz), adică o frecvență de eșantionare de 51,2 kHz, a fost studiat pe o fereastră de timp de  $T_w = 7$  s. Fereastra de timp a fost aleasă în mod corespunzător pentru a surprinde modul ciclic, specific de funcționare al unui cuptor cu microunde. Puterea nominală a cuptorului aflat sub investigație este de 1200 W. După cum se va observa în Figura 2-6, intensitatea curentului variază de la aproximativ 8 A (valoare vârf la vârf) la 0,3 A și apoi înapoi la 8 A cu o tranziție de 1 s când curentul atinge 4 A, valoare vârf la vârf. Componentele cu variația semnificativă din spectrul de frecvențe înalte și variabile în timp de 150 Hz și 250 Hz sunt de așteptat să fie identificate în cadrul ferestrei de timp, dar și componentele cu frecvența 100 Hz, 200 Hz și 350 Hz. Semnalul original și spectrul DFT asociat sunt prezentate în Figura 2-6.

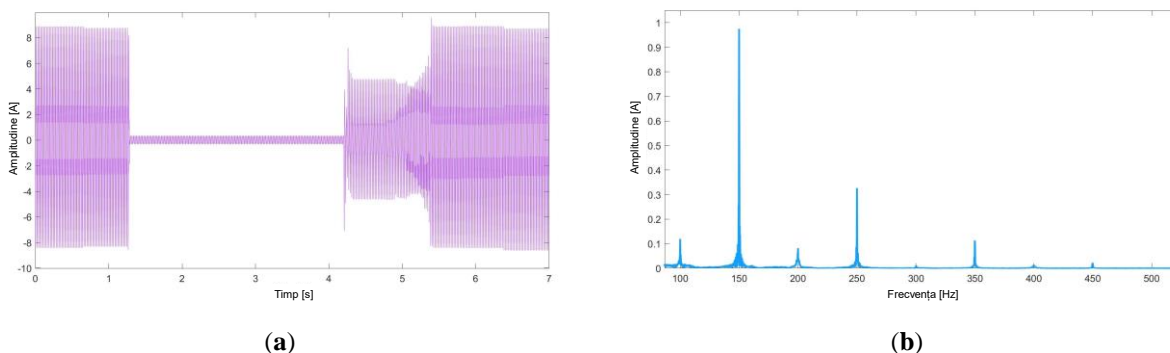


Figura 2-6. (a) Semnalul original (intensitatea curentului) discretizat (b) Spectrul DFT al semnalului original între 100 Hz și 500 Hz

Frecvențele principale, altele decât cea fundamentală, sunt, după cum se poate vedea mai sus, 100 Hz, 250 Hz, 200 Hz, 250 Hz și 350 Hz.

Primul pas în aplicarea metodei EMD îmbunătățită a fost construirea de semnale de tip mască, așa cum este descris în paragrafele anterioare și sintetizat în Figura 2-1. Pe baza spectrului DFT, au fost identificate patru moduri de oscilație în cadrul semnalului la 100 Hz, 150 Hz, 250 Hz, și 350 Hz (care vor duce la separarea a 4 funcții de tip IMF). Pentru aceste componente, semnalele adecvate de tip mască au fost construite având frecvențele de variație egale cu 150 Hz, 250 Hz, 400 Hz și 600 Hz. Funcția IMF 4 va fi considerată neglijabilă în amplitudine și va fi eliminată din analiză, iar Transformata Hilbert va fi aplicată peste funcțiile de tip IMF rămase. Pentru a evidenția performanța metodei HHT chiar și pentru frecvențe de eșantionare mai mici, același semnal a fost, de asemenea, eșantionat cu frecvența de eșantionare de 10 kHz. După cum se poate observa în Figura 2-7 (b), componentele sunt identificate, iar amplitudinile instantanee sunt calculate fără nicio diferență față de rezultatele (Figura 2-7 a) obținute pentru  $f_s = 50$  kHz. Compararea cu frecvența de eșantionare de 10 kHz a fost făcută din cauza memoriei de calcul asociate procedurii EMD, astfel puterea de calcul asociată transformatei Hilbert aplicată semnalelor nestacionare scade liniar cu un factor  $k$ , unde  $f_s^* = \frac{f_s}{k}$ . Utilizarea metodei a fost făcută pe ferestre de în domeniul 1s, și frecvențele obișnuite de eșantionare specifice domeniului de calitate a energiei (10 kHz).

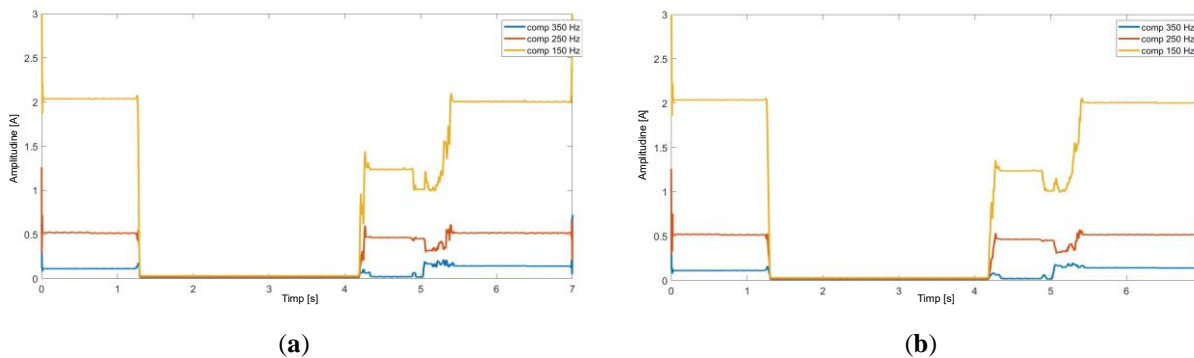


Figura 2-7. (a) Spectrul Hilbert pentru semnalul esantionat cu 50 kHz, (b) Spectrul Hilbert for semnalul esantionat la 10 kHz

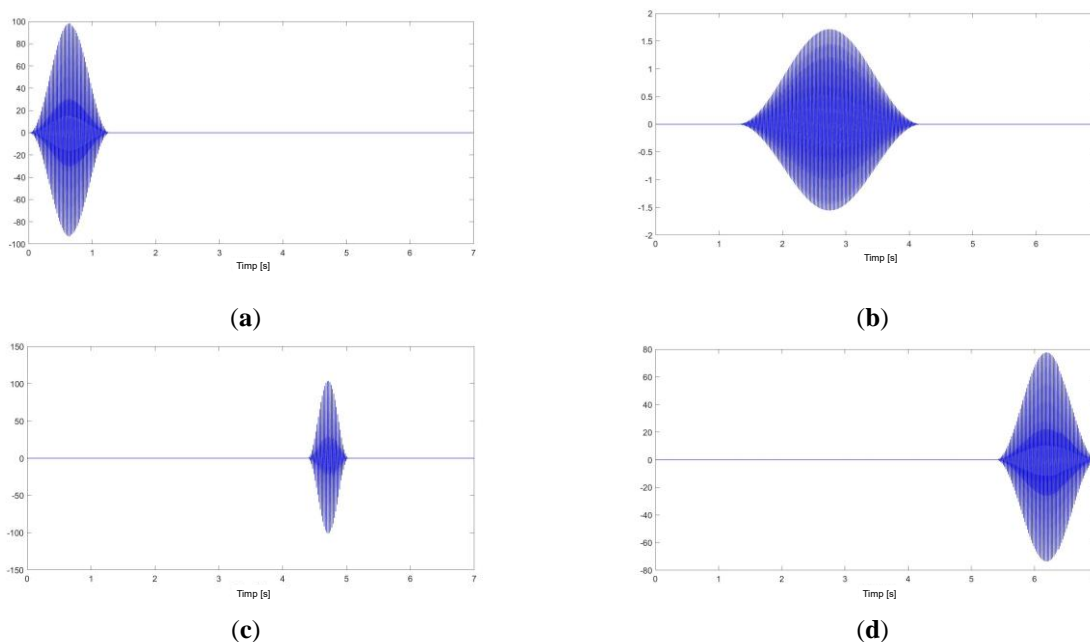


Figura 2-8. Intervalele de tip cvasi-staționar peste care s-a aplicat fereastra Hanning (a) primul interval (b) al doilea interval (c) al treilea interval analizat încă o dată cu metoda EMD, (d) al patrulea interval

Noutatea introdusă în această lucrare în ceea ce privește identificarea intervalelor de timp cvasi-staționare este următorul pas în aplicarea metodei hibride. QSSI își dovedește caracterul practic atunci când vine vorba de semnale distorsionate nestaționare și neliniare specifice transferului de energie pentru care sunt necesare analize suplimentare. După filtrarea rezultatelor transformatei Hilbert, algoritmul de identificare a intervalelor cvasi-staționare a fost aplicat și au fost detectate patru intervale de timp. Intervalele rezultate peste care s-a aplicat o fereastră de tip Hanning sunt prezentate în Figura 2-8.

Intervalul de timp în discuție, supus unei alte descompunerii utilizând metoda hibridă H-H, este prezentat în Figura 2-8(c) și, după cum se poate vedea din imagine (și în comparație cu variația semnalului original), corespunde unui interval de timp de tranziție când distorsionarea semnalului de curent sare de la 0,3 A la 8 A (valoare vârf la vârf). După cum s-a identificat în timpul simulării, acest interval este de aproximativ 1,2 s și este din nou analizat urmând pașii asociați metodei așa cum au fost descriși mai sus. Partea finală de post-procesare aplicată acestui interval de timp arată o identificare cvasi-staționară doar pentru jumătate din intervalul total; pentru restul, putem concluziona că există doar componente de tranziție și, astfel, au eliminate acele artefacte. Analog cu exemplul semnalului sintetic, au fost eliminate marginile ferestrei de timp de observare, precum și tranzițiile dintre intervalele de timp identificate. Amplitudinile și frecvențele instantanee după

aplicarea algoritmului de post-procesare și apoi DFT pe intervalele cvasi-staționare sunt prezentate în Figura 2-9. DFT a fost aplicat pe intervalele QSSI identificate și filtrate cu fereastra Hanning (corespunzătoare întregii ferestre de timp ( $T_w$ ) aflata sub investigație) conform cu Figura 2-8, rezultând o rezoluție în frecvență de 1 Hz.

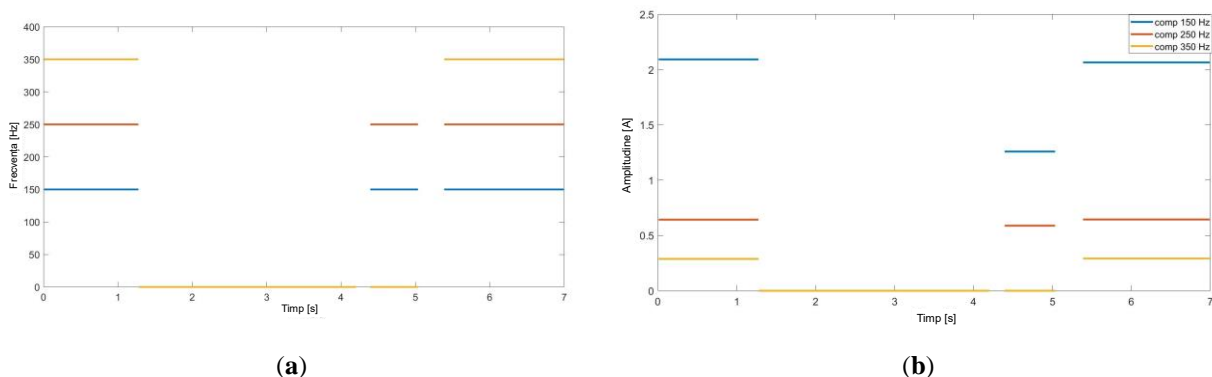


Figura 2-9. (a) Frecvențele instantanee și (b) amplitudinile, mono-componentelor extrase folosind metoda hibridă Hilbert - Huang, a intensității curentului utilizat de un cuptor cu microunde așa cum a fost prezentat în Figura 2-6

Pentru a valida algoritmul hibrid propus, a fost folosit ca referință un analizor de calitate a energiei, ELSPEC [37]. Acest echipament efectuează analiza DFT la fiecare perioadă și poate furniza până la 512 componente armonice ale fundamentalei de 50 Hz. De asemenea, efectuează DFT pe o fereastră de 10 perioade, calculând componentele din spectrul de frecvență cu o rezoluție de 5 Hz, dar nu reușește identificarea componentelor „anormale”, (diferite de componentele armonice), cum ar fi modul de oscilație cu 430 Hz (conform semnalului sintetic de mai sus) sau componenta de 494 Hz.

### 3 Monitorizarea funcționării și servicii pentru comunitățile de energie bazate pe informație cu rata mare de raportare a contoarelor de energie

#### 3.1 Contoare inteligente de energie de generație nouă

O nouă generație de contoare inteligente trebuie să îndeplinească trei cerințe principale: cost redus, informații de înaltă calitate (de exemplu, utilizând rate de raportare de 1 cadru pe secundă sau mai mari) și asigurarea securității cibernetice a datelor /informației de măsurare.

Un exemplu de contor inteligent care răspunde acestor cerințe este definit în jurul conceptului *Unbundled Smart Meter* [120] (*USM* – contor inteligent cu funcții separate), dezvoltat în jurul a două componente. Astfel, în arhitectura unui contor de tip *USM*, componenta de tip *Smart Metrology Meter* (*SMM*) este similară cu funcția unui contor inteligent clasic și implementează așa-numitele funcții în timp real, cu securizarea informațiilor de măsurare. Spre deosebire de contorul tradițional, componenta suplimentară numită *Smart Meter eXtension* (*SMX*), cu un grad ridicat de flexibilitate care aduce noi funcționalități părții clasice de tip *SMM* ceea ce contribuie la evoluția funcționării rețelelor inteligente și dezvoltarea de noi servicii în cadrul sistemului energetic.

#### 3.2 Agregare și pierdere de informație

Principalele caracteristici ale contoarelor inteligente de generație nouă utilizate pentru scopul acestui capitol sunt identificate pentru a putea extrage informații relevante pentru dinamica de

funcționare a nodurilor la joasa tensiune și pentru a utiliza metrice statistice adecvate în cadrul contorului [108].

Pentru campania de măsurare s-au folosit două tipuri de contoare USM. Contorul SLAM [120] este un contor inteligent digital multifuncțional, monofazat, cu rata mare de raportare (0.5 cadre/secunda), de clasa B pentru energie activă și Clasa 2 pentru energie reactivă, care respectă legislația europeană referitoare la contoarele de energie (MID) EN 50470-1 și EN 50470-3. Celălalt tip de contor este un echipament de măsurare cu rata mare de raportare (1 cadru/secundă), constând dintr-un SMX conectat la un contor numeric LandisGyr [97] care este un contor de energie trifazat (IEC 62053-21 clasa 1) și energie reactivă (IEC 62053-23 clasa 2).

### 3.3 Descrierea demonstratorului

Spațiul de experimentare ales pentru demonstrarea și implementarea unei infrastructuri de contorizare inteligentă a fost campusul studentesc (Regie) din cadrul Universității POLITEHNICA din București (UPB). Prin folosirea receptoarelor neliniare de tipul aparatelor electrocasnice, există un potențial de încărcare nesimetrică a fiecărei faze care ar putea da naștere la mai multe probleme de calitate a energiei, sau chiar întreruperea alimentării cu energie. O analiză amănunțită a rețelei necesită informații sincronizate (de la toate clădirile) cu granularitate temporală ridicată.

Pentru implementarea efectivă în campus, în 5 din cele 27 de clădiri studentești au fost instalate contoare inteligente care asigură o acoperire de aproape 20% din întreg profilul de putere. O topologie generală simplificată a demonstratorului poate fi văzută în imaginea de mai jos, în Figura 3-1.

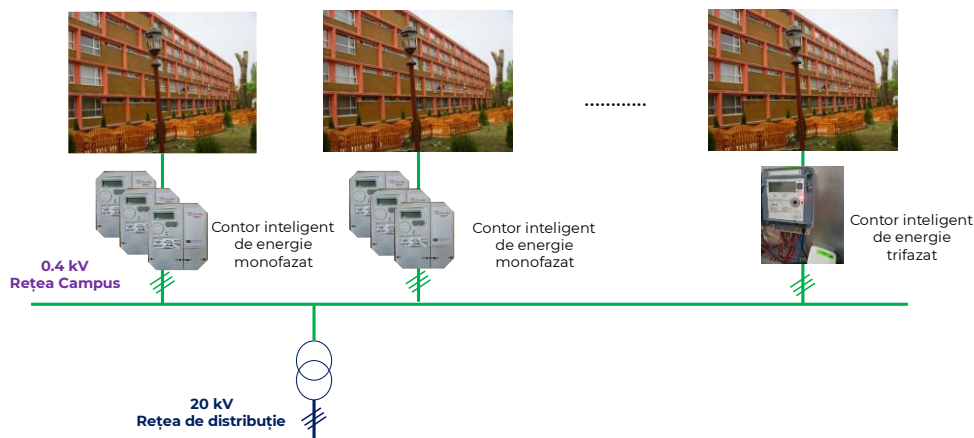


Figura 3-1. Topologia simplificată a rețelei electrice a campusului cu instalarea contoarelor de energie [49].

Infrastructura de contorizare include 39 de echipamente monofazate de tip SLAM și 12 echipamente trifazate USM. Aceste sisteme de măsurare acoperă alimentarea cu energie asociată unui număr de 1840 de studenți. Informația utilizată în acest capitol a fost extrasă din contoare de energie instalate într-una dintre clădirile studentești, având 150 de camere și 300 de studenți.

### 3.4 Metodologie pentru evaluarea cantitativă a pierderii de informație

Profilurile de putere mediate au fost calculate pentru agregare la 1 minut, 15 minute și 1 ora. A fost folosit un algoritm simplu de mediere a informației disponibilă la 2s provenind de la contoarele inteligente din teren. O reprezentare vizuală a procesului de agregare a informațiilor poate fi văzută în Figura 3-2.



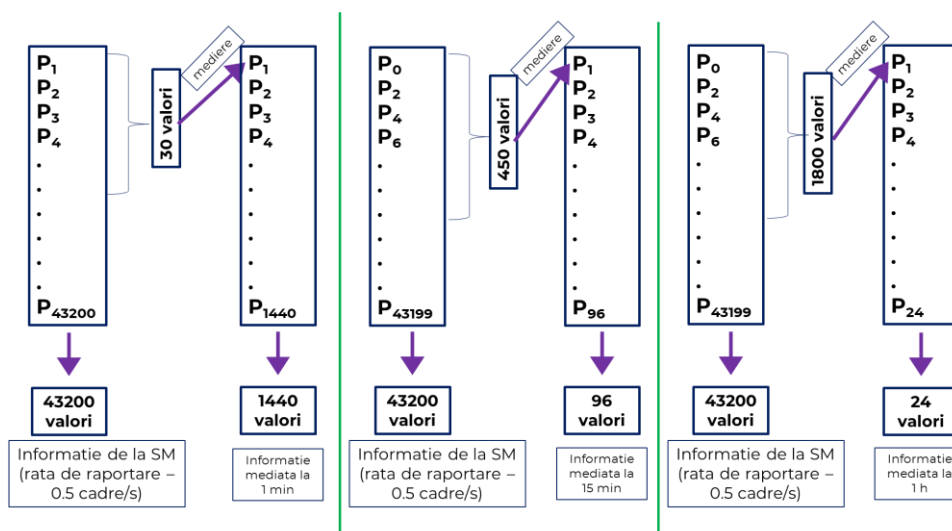


Figura 3-2. Agregarea informației provenind de la contoare cu rata de raportare 0.5 cadre/s

Se notează fiecare valoare măsurată a puterii active provenind de la contorul inteligent (având rezoluție temporală 2s) cu  $P_x$ , unde  $x$  ia valori între 1 și 43200. Astfel, valorile de putere activă raportate într-o zi sunt egale cu 43200 (de la  $P_1$  până la  $P_{43200}$ ).

Astfel, pentru agregare la 1 min, informația este obținută prin mediere aritmetică a seturilor conținând 30 de valori (numărul de valori raportate într-un minut cu rata de raportare 0.5 cadre/s). O generalizare a procesului de mediere pentru agregarea la 1 min este dată de ecuația (3.1)

$$\overline{P_i^{1min}}[t] = \frac{P_{i \cdot 30 + 1} + P_{i \cdot 30 + 2} + \dots + P_{i \cdot 30 + 30}}{30} \quad (3.1)$$

,unde  $i$  ia valori între 0 și 1439.

Pentru agregare la 15 min, informația este obținută prin mediere aritmetică a seturilor conținând 450 de valori (numărul de valori raportate în 15 minute cu rata de raportare 0.5 cadre/s). O generalizare a procesului de mediere pentru agregarea la 15 min este dată de ecuația (3.2)

$$\overline{P_i^{15min}}[t] = \frac{P_{i \cdot 450 + 1} + P_{i \cdot 450 + 2} + \dots + P_{i \cdot 450 + 450}}{450} \quad (3.2)$$

,unde  $i$  ia valori între 0 și 95.

Pentru agregare la 1 h, informația este obținută prin mediere aritmetică a seturilor conținând 1800 de valori (numărul de valori raportate într-o oră cu rata de raportare 0.5 cadre/s). O generalizare a procesului de mediere pentru agregarea la 1 h este dată de ecuația (3.3)

$$\overline{P_i^{60min}}[t] = \frac{P_{i \cdot 1800 + 1} + P_{i \cdot 1800 + 2} + \dots + P_{i \cdot 1800 + 1800}}{1800} \quad (3.3)$$

,unde  $i$  ia valori între 0 și 23.

Algoritmul pentru calculul pierderii de informație presupune utilizarea formulei clasice pentru abaterea medie pătratică (abaterea standard – în engleză *standard deviation*) între informația la 2s și informația mediata în fiecare dintre cazuri:

$$std\_agg_{interval} = \sqrt{\frac{\sum(P_x - \bar{P}_i)}{N}} \quad (3.4)$$

, unde  $P_x$  este puterea activa raportata (cu rezoluție 2s) iar  $\bar{P}_i$  este valoarea mediata (in functie de fiecare caz, 1 min, 15 min, 1h) corespunzătoare intervalului in care aparține  $P_x$ . *Interval* arata ca abaterea standard este calculata pentru toate cazurile analizate (1 min, 15 min, 1h).

Rezultatul este apoi împărțit la media in 24h pentru ziua respectiva - așa cum este indicat in ecuația (3.5) - rezultând valoarea finala asociata pierderii de informație, așa cum arata ecuația (3.6)

$$P_{mean}^{1\ day} = \frac{\sum_0^{N-1} P_{2\cdot i}}{N} \quad (3.5)$$

, unde  $N$  este numărul total de măsurări raportate într-o zi (in cazul de fata 43200)

$$info\_loss_{interval} = \frac{std\_agg_{interval}}{P_{mean}^{1\ day}} \quad (3.6)$$

, unde *Interval* arata ca pierderea de informație este calculata pentru toate cazurile analizate (1 min, 15 min, 1h).

Pierderea de informație este numărul final cu semnificație pentru studiul prezentat in acest capitol iar aceasta evaluare cantitativa este prezentat in graficele si comentariile care urmează.

### 3.5 Rezultate experimentale

Pentru a evidenția pierderea de informație atunci când se utilizează profiluri de putere mediata în locul celor obținute de la contoare inteligente cu rata de raportare mare (1 cadru/s sau 0.5 cadre/s), în cazul profilurilor zilnice de putere asociate clădirilor dintr-un campus studentesc, au fost studiate mai multe scenarii bazate pe alimentarea trifazata a clădirilor. Principalele aspecte luate în considerare la studierea profilurilor de putere au fost legate de considerente temporale, zile din timpul semestrului (in care studenții sunt in campus), tipuri de zile de funcționare normala, in funcție de zi, lucrătoare sau zi de weekend, considerente climatice, zile de iarna si zile de vara, când studenții utilizează sisteme de încălzire sau respectiv răcire si considerente electrice, alimentarea clădirilor este trifazata, astfel s-a realizat studii in funcționare monofazata si trifazata.

Următoarele paragrafe vor evidenția principalele cazuri analizate pentru zilele de iarnă și de vară, pentru zilele lucrătoare și de weekend, dar vor fi prezentate doar câteva exemple de profiluri de putere dintre toate cazurile studiate de mai jos:

#### 3.5.1 Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru unul dintre etajele căminului studentesc

Se vor prezenta rezultatele măsurărilor pentru funcționarea 24 de ore, iar profilul de putere prezentat în figura de mai sus este de tip monofazat asociat pentru 30 de camere si 60 de studenți. Se observă profilul de putere clasic cu utilizare mare a energiei în timpul serii și dimineții și cerere scăzută după-amiaza si in timpul nopții.

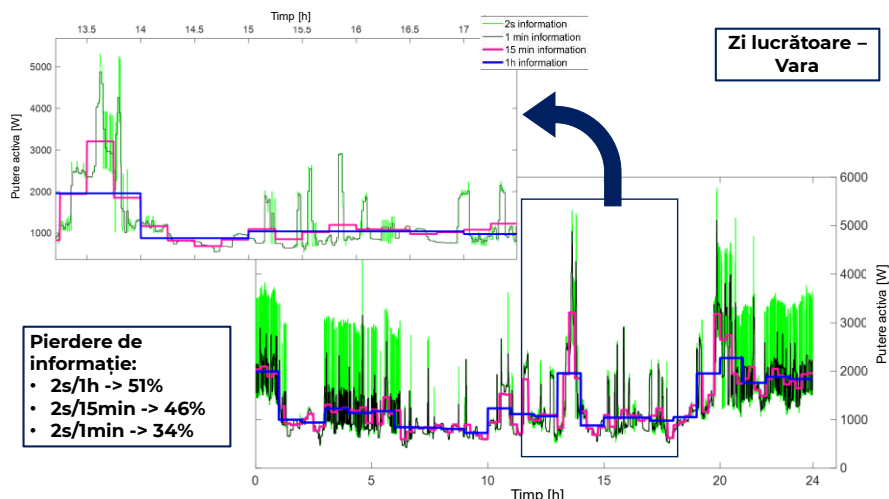


Figura 3-3. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți – zi lucrătoare, vara

### 3.5.2 Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru întreg căminul studențesc

Se vor prezenta rezultatele măsurărilor pentru funcționarea 24 de ore în scenariul de iarnă iar profilul de putere este corespunzător unui număr de 150 de camere și 300 de studenți (alimentare monofazată)

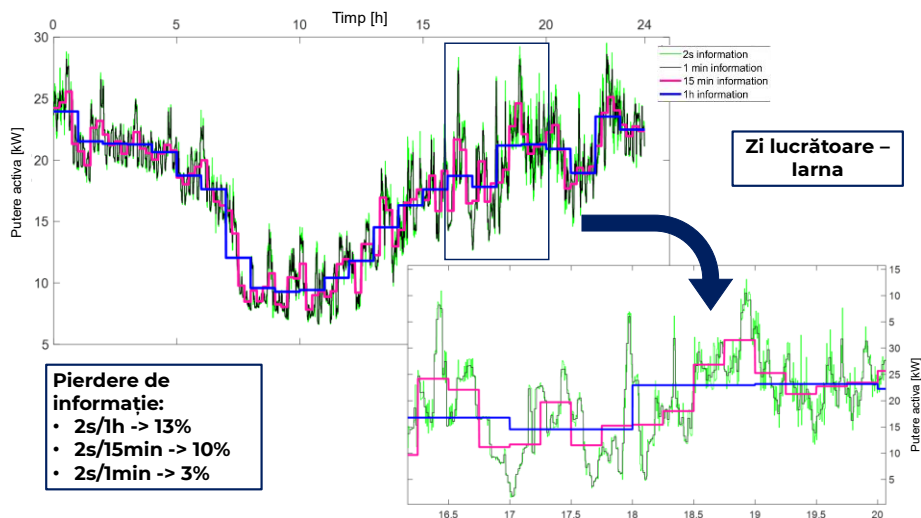


Figura 3-4. Profilul de putere (monofazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – zi lucrătoare, iarna

Profilul de putere prezentat mai sus a fost obținut prin însumarea valorilor de instrumentație de putere activă extrase de la fiecare contor conectat pe faza 1 (așa cum este prezentat în ecuația (3.7)).

$$P_1[t] = P_1^{et\ 0}[t] + P_1^{et\ 1}[t] + P_1^{et\ 2}[t] + P_1^{et\ 3}[t] + P_1^{et\ 4}[t] \quad (3.7)$$

### 3.5.3 Scenariu pentru un profil de putere trifazat pentru întreg căminul studențesc

Se vor prezenta rezultatele măsurărilor pentru funcționarea 24 de ore în scenariul de iarnă în zi de weekend. Informația este asociată puterii active totale trifazate corespunzătoare a 150 de camere și 300 de studenți.

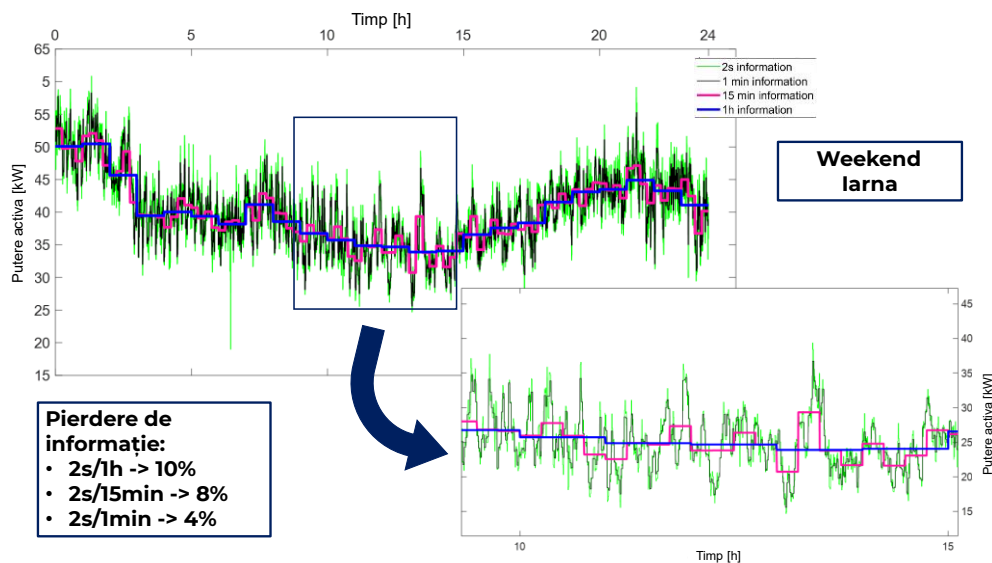


Figura 3-5. Profilul de putere (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în weekend, iarna  
 Profilul de putere prezentat mai sus a fost obținut prin aplicarea ecuației (3.11), prin însumarea valorilor de instrumentație de putere activă extrase de la fiecare contor conectat pe fiecare fază (așa cum este prezentat în ecuațiile (3.8) – (3.10)).

$$P_1[t] = P_1^{et\ 0}[t] + P_1^{et\ 1}[t] + P_1^{et\ 2}[t] + P_1^{et\ 3}[t] + P_1^{et\ 4}[t] \quad (3.8)$$

$$P_2[t] = P_2^{et\ 0}[t] + P_2^{et\ 1}[t] + P_2^{et\ 2}[t] + P_2^{et\ 3}[t] + P_2^{et\ 4}[t] \quad (3.9)$$

$$P_3[t] = P_3^{et\ 0}[t] + P_3^{et\ 1}[t] + P_3^{et\ 2}[t] + P_3^{et\ 3}[t] + P_3^{et\ 4}[t] \quad (3.10)$$

$$P_t[t] = P_1[t] + P_2[t] + P_3[t] \quad (3.11)$$

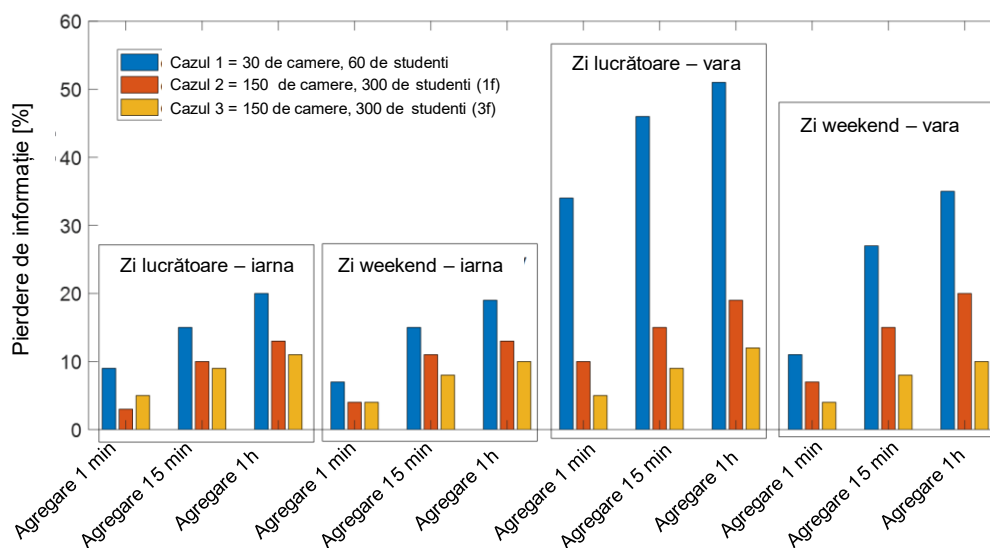


Figura 3-6. Pierderea de informație (*info\_loss* în (3.6)) pentru toate cazurile studiate.

### 3.6 Comentarii legate de pierderea de informație asociată profilurilor de putere

În Figura 3-6 de mai sus, se poate observa variația pierderii de informație pentru toate cazurile studiate și descrise în această lucrare. În această figură au fost sintetizate toate cazurile pe baza datelor reprezentate mai sus, studiu realizat pentru iarnă și vară, zi lucrătoare și ziua de weekend.

Concluziile sunt în concordanță cu ipoteza că agregarea spațială (utilizatori pe fiecare etaj) acționează favorabil în ceea ce privește profilul de putere agregat (agregare temporală) și, prin urmare, nevoia unei rate de raportare ridicată (1 cadru/s sau 0.5 cadre/s) este limitată la aplicații specifice fiecărui utilizator.

### 3.7 Creșterea gradului de observabilitate în operare și servicii pentru comunitățile de energie pe baza informație cu rata mare de raportare a contoarelor de energie

#### 3.7.1 Context și metodologie

În continuare se va prezenta modalitatea de a atinge anumite particularități de funcționare și operare a rețelelor electrice la joasă tensiune folosind contoarele inteligente cu rată mare de raportare, în plus față de informația agregată temporal (folosită în scopuri de facturare a energiei electrice), păstrând în același timp informațiile private, individuale, ale fiecărui utilizator de energie. Prin particularități de funcționare, se face referire la schimbări în condițiile de operare ale sistemului între două raportări consecutive ale contoarelor inteligente clasice (mărimi agregate). Pentru rețelele la joasă tensiune, estimarea stărilor sistemului (pentru de exemplu, a se putea lua decizii de operare și control) se face estimând profiluri de putere pe baza informației agregate, prin mediere a puterii active din consumul de energie pe intervale mari de timp (30 sau 60 de minute). Medierea informației pe intervale mari de timp nu este adecvată pentru modelarea transferului de energie în ambele sensuri pentru rețele de distribuție cu pondere mare a generării din surse regenerabile și impredictibile de energie [92].

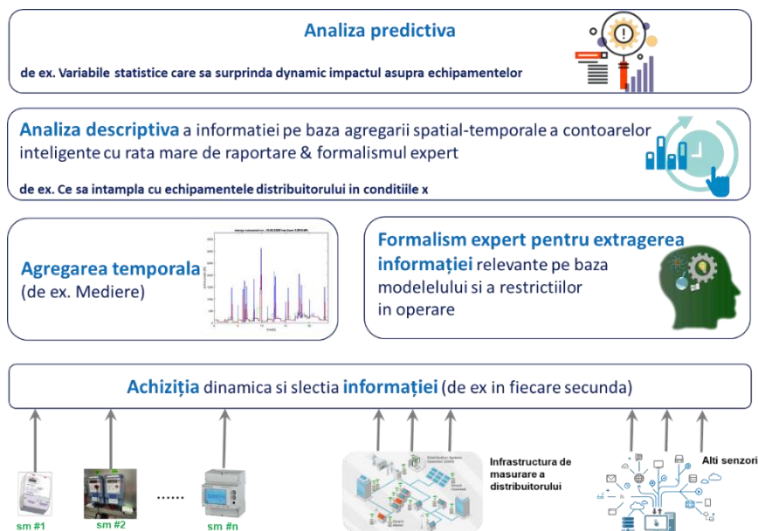


Figura 3-7. Arhitectura pentru extragerea informației relevante pe baza datelor achiziționate cu rezoluție mare de la contoarele inteligente

Metodologia folosită ține seama de comparația între cazul ideal când operatorul de rețea are acces la informație cu rată mare de raportare (1s) și două cazuri de practică uzuală, adică informația agregată la 15 minute (cazul A) și 1h (cazul B). Mai mult un al treilea caz este studiat, cu informația mediată și cu rată de raportare 1 minut (cazul C). Pentru a evalua cantitativ contextul propus, se prezintă în Figura 3-7 cadrul general pentru extragerea informațiilor de la nivelul procesului.

Arhitectura propusă este compusă din 4 niveluri de procesare a datelor:

- a) **(N1)** nivelul achiziția informației din diverse surse la nivelul rețelei la JT.
- b) **(N2)** nivelul pentru agregarea temporală a informației de la nivelul procesului.
- c) **(N3)** nivelul pentru analiza descriptivă a informațiilor provenind de la N1 și N2.
- d) **(N4)** Nivelul pentru extragerea fenomenelor relevante din proces. În acest nivel sunt implementate funcții pentru care datele măsurate sunt transformate în parametrii de model și folosiți pentru aplicații specifice.

Pentru nivelul de proces (N1), datele sunt achiziționate de la un set de contoare inteligente cu rata mare de raportare (1s) a mărimilor de interes (cum ar fi puterea activă, tensiune, intensitatea curentului). Nivelul al doilea (N2) conține atât procesorul pentru agregarea în timp (medierea valorilor) pentru ferestre de timp de 1, 15, și 60 de minute, cât și formalismul expert care va fi aplicat pe diferitele ferestre în funcție de aplicație.

În cadrul analizei ce va fi prezentată, studiul se concentrează pe comportamentul rețelei pentru o zi întreagă, adică analiza unui colecții conținând  $24h \times 3600s = 86400$  de seturi de mărimi măsurate. În funcție de aplicație, doar o parte a mărimilor măsurate poate fi de interes.

Se definește și un parametru statistic al frecvenței de apariție și severitate pe durata ferestrei de agregare, parametru care este de interes și poate furniza informații relevante. Acest parametru se numește funcție de distribuție cumulativă (fdc), În cazul puterii active, pentru operarea în condiții ridicate de fiabilitate și securitate în funcționare se impune ca valorile acestora pe ferestrele (standardizate) de analiză să se încadreze în limitele stabilite în mai mult de 95% din cazuri. Deoarece unele dintre limite nu sunt simetrice în ceea ce privește valorile standardizate de operare (nominal sau optim), se va aplica mai întâi o descompunere a semnalului (disponibil cu rata de raportare 1 cadru/s) pentru a evalua cantitativ depășirile pozitive și depășirile negative față de valoarea mediata care va fi raportată de contorul inteligent. Acest tip de agregare poate să cuprindă și variațiile asimetrice ale semnalelor. Acest lucru este important deoarece în unele aplicații limita superioară de încadrare poate fi diferită de limita inferioară. Aceasta abordare este diferită de cea folosită pentru analize de calitate a energiei, în care se folosește media pătratică (insensibilă la variațiile asimetrice ale semnalului). Se definește funcția de descompunere, care va împărți semnalul original raportat cu 1 cadru/secunda în două componente, componenta pozitivă, și componenta negativă. Un exemplu de astfel de descompunere se poate observa în Figura 3-8 de mai jos pentru valori mediate la 15min și 1h.

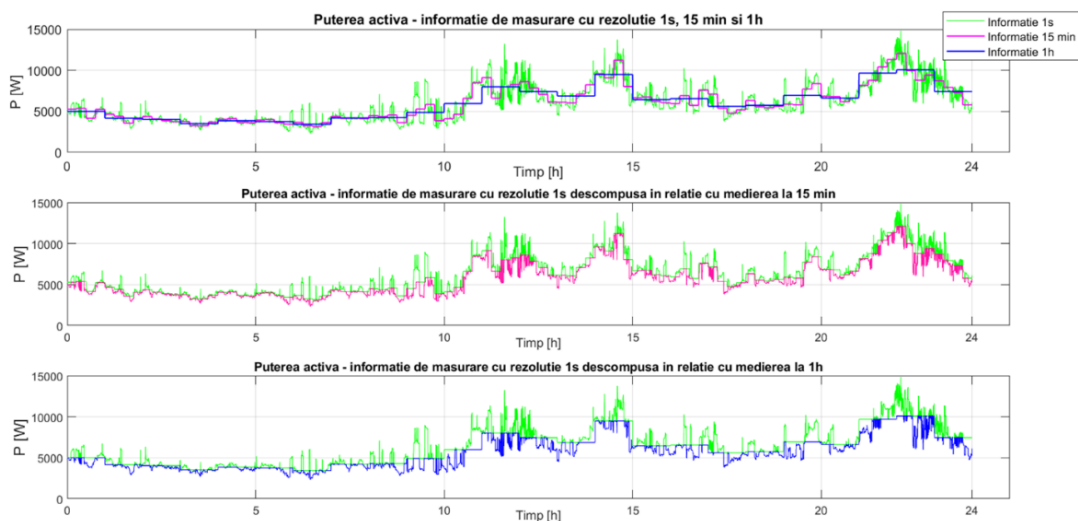


Figura 3-8. Descompunerea unui profil de putere activă (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți, cu rezoluție 1s, în funcție de medierea pe intervale de 15 min respectiv 1h

Mai departe, pentru fiecare fereastră de agregare (mediere), se vor calcula recursiv centilele relevante pentru puterea activă măsurată.

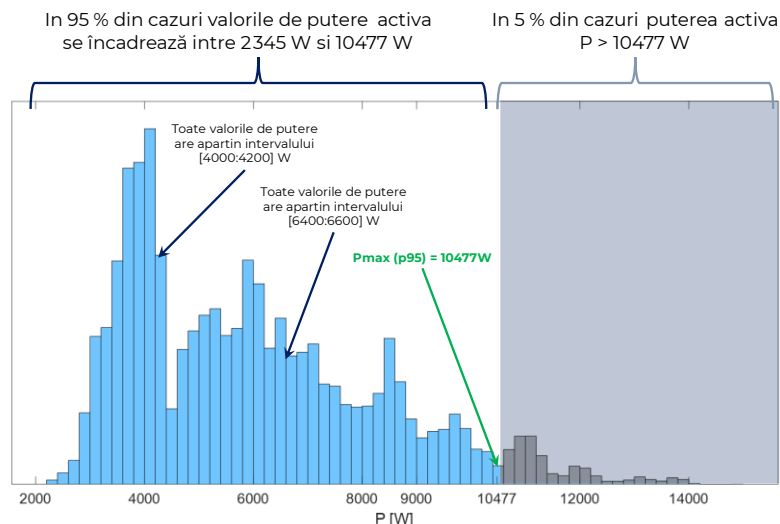


Figura 3-9. Un exemplu ilustrativ pentru calculul centilei 95 pentru puterea activă cu rezoluție 1s ( $P_{max}(p95) = 10477$ W, iar valorile de putere activă sunt încadrate în intervale de 200 W

Un astfel de exemplu este dat în Figura 3-9. Se pot crea și defini mai multe limite pentru astfel de centile, pentru fiecare fereastră de agregare ce pot fi folosite ca reguli în cadrul nivelului N4 de analiză.

### 3.8 Scenarii de simulare și evaluarea rezultatelor

Pentru a demonstra abordarea și metodologia propuse, a fost analizată informația de măsurare asociată căminului studentesc descris în paragrafele de mai sus. Au fost analizate cele patru scenarii asociate profilurilor zilnice de putere, pe baza criteriilor de agregare spațială și temporală. Aceste cazuri au fost selectate ca cele mai reprezentative și din considerente climatice și au fost analizate în operarea rețelei test pentru puterea activă asociată întregului cămin studentesc (150 de camere și 300 de studenți). Se va prezenta doar unul dintre cazuri.

#### a) Cazul 1, zi lucrătoare de vară. (Figura 3-10)

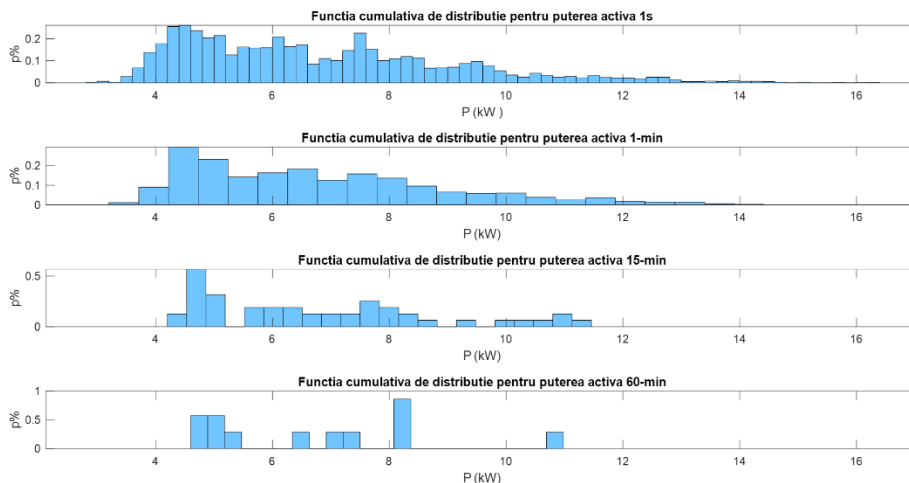


Figura 3-10. Funcția cumulativă de distribuție pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi lucrătoare de vară

Rezoluție temporală	p95 [kW]	p99 [kW]	maxP [kW]	1-p99 raportat la informația la 1s	1-maxP raportat la informația la 1s
<b>Cazul 1, zi lucrătoare de vara</b>					
1 secunda	10,477	12,140	14,856	0%	0%
1 minut	10,319	12,008	13,984	1,09%	5,87%
15 minute	9,985	12,077	12,077	0,52%	18,71%
60 minute	9,675	10,071	10,071	17,04%	32,21%
<b>Cazul 2, zi de weekend de vara</b>					
1 secunda	11,342	13,427	16,232	0%	0%
1 minut	11,112	13,137	14,902	2,16%	8,19%
15 minute	10,634	12,219	12,219	8,99	24,72
60 minute	10,737	10,980	10,980	18,22%	32,35%
<b>Cazul 3, zi lucrătoare de iarna</b>					
1 secunda	24,727	27,143	29,523	0%	0%
1 minut	24,633	27,046	28,607	0,35%	3,1%
15 minute	24,24	25,57	25,57	5,81%	13,4%
60 minute	23,541	23,953	23,953	11,75%	18,87%
<b>Cazul 4, zi de weekend de iarna</b>					
1 secunda	25,442	27,761	30,095	0%	0%
1 minut	25,349	27,498	29,39	0,95%	2,34%
15 minute	24,731	26,412	26,412	4,86%	12,24%
60 minute	24,239	25,072	25,072	9,69%	16,69%

Profilurile de putere cu agregare temporală de 15 și 60 de minute prezintă valori mai mici pentru p95 și p99, deoarece aceste profiluri nu surprind caracterul dinamic al transferului de putere caracterizat de vârfuri de putere extrase, ascunzând astfel problemele de calitate energiei, precum și condițiile „anormale” de utilizare a puterii la joasă tensiune.

## 4 Funcționare flexibilă a microrețelelor cu flux de putere cu variabilitate ridicată

### 4.1 Context

Conceptul de comunități care utilizează energia generată proprie provenind din surse regenerabile de energie (*Self-RES consumption communities – SCC*), cunoscute și sub denumirea de comunități de energie din surse regenerabile (*Renewable Energy Communities – REC*), este o tendință emergentă în Europa, care urmărește îndeplinirea obiectivelor celui mai recent pachet „Energie curată pentru toți europenii”. Obiectivul operațional al unei comunități de tip SCC, așa cum este definită [44], este de a crește ponderea generării la nivel local pe baza surselor regenerabile de energie (în engleză *Renewable Energy Sources – RES*) într-o pondere mai decât cea a profilului de putere al fiecărui prosumator din comunitate. Cu toate acestea, potențialul său real este mai degrabă subestimat trebuie propuse soluții tehnologice și de operare pentru noile modele de funcționare în timp real pentru rețele cu inerție mică.

### 4.2 Definierea problemei analizate

Comunitatea de tip SCC analizată este compusă din 2 structuri de tip UniRCon interconectate cu o legătură la tensiune continuă, acționând ca o microrețea hibridă la joasă tensiune (AC+DC). Microrețeaua hibridă funcționează ca parte integrată în cadrul campusului Universității Politehnice



din București (UPB), care este văzut ca o singură entitate în relație cu rețeaua de distribuție având un singur punct comun de conexiune (PCC) cu aceasta [73]. Structura micronețelei analizate este compusă din 2 clădiri: Clădirea Facultății de Inginerie Electrică, laboratorul de cercetare MicroDERLab (în cele ce urmează denumit FEE, adică clădirea FEE, partea FEE etc.) și Clădirea Facultății de Energetica, laboratorul EG120 (în cele ce urmează denumit ENG, adică clădirea ENG, partea ENG etc.).

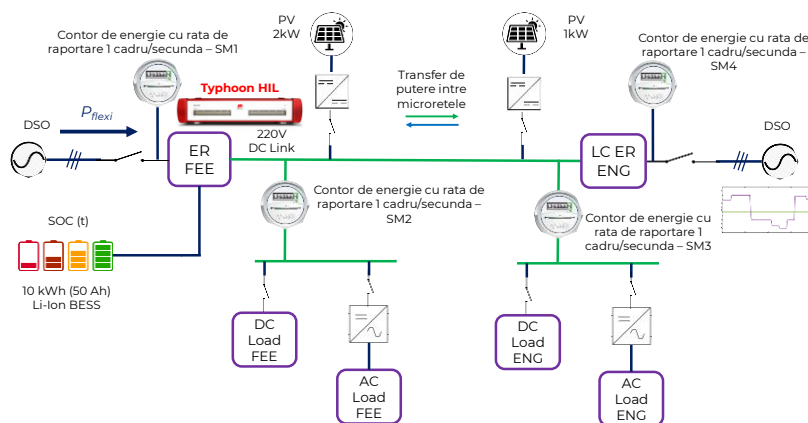


Figura 4-1. Schema electrică monofilara simplificată a Flexi-MLAB

În acest capitol se prezintă scenarii de funcționare pentru o infrastructura reală, având structura de bază compusă din două microrețele legate între ele printr-o legătură la tensiune continuă, acționând ca două unități de tip UniRCon (autoconsum și fără injecție de energie în rețea). În continuare vom numi această comunitate de utilizare a energiei generată local din surse regenerabile (proprie) de tip micronețea cu legătură la DC, **Flexi-MLAB**. Schema monofilara simplificată a acestei arhitecturi se poate observa în Figura 4-1. Arhitectura include receptoare cu profiluri de putere variabile (utilizatori de tip birou), informație disponibilă cu o granularitate ridicată (rata de raportare fiind 1 cadru/s), panouri solare (PV) și un sistem de stocare a energiei de tip baterie (BESS) pentru rol în echilibrarea transferului de energie, (atunci când este necesar), dar și cu rol de menținere a nivelului de tensiune într-o bandă îngustă de variație permisă  $\pm 10\%$ .

### 4.3 Profiluri de putere variabilă achiziționate cu rată mare de raportare pentru utilizatorii de energie

Pentru a studia comportamentul și funcționarea Flexi-MLAB, pentru partea de utilizare a energiei, au fost folosite profiluri de putere cu rezoluție în timp foarte mare (1s) provenind din informația de măsurare achiziționată cu rată mare de raportare (1 cadru/s) folosind așa-numitul concept de contor inteligent cu funcții separate (USM) [107], necesar în realizarea transferului optim de energie pentru sistemul emergent descris [3]. Profilul de putere este compus din profiluri specifice pentru utilizatorii casnici precum calculatoare personale (PC), TV, frigider, aer condiționat și servere. Exemple de profiluri de putere de funcționare pentru unii dintre acești utilizatori pot fi observate în Figura 4-2.

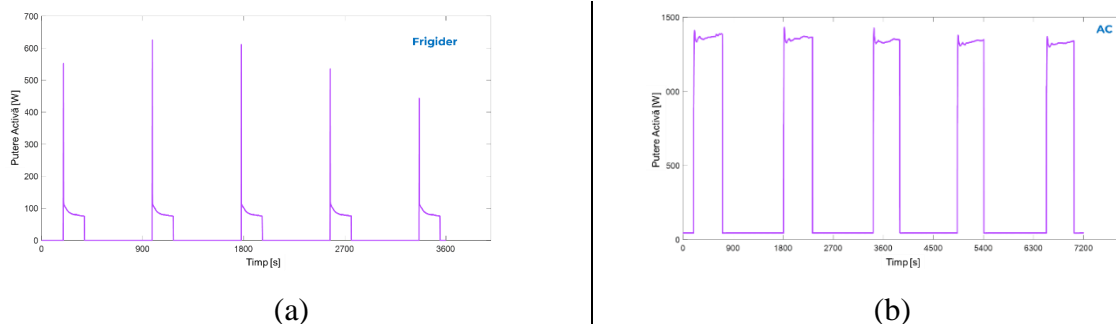


Figura 4-2. Profiluri de putere pentru funcționarea unui frigider (a) și a unui aparat de aer condiționat (b).  
Rata de raportare a fost 1 cadru/secunda

#### 4.4 Profiluri de putere variabile achiziționate cu rata mare de raportare pentru generarea de energie folosind panouri solare

Profilul de putere specific pentru generarea de energie din surse locale de tip PV este obținut din informație de măsurare reală zilnică achiziționată de la echipamente în configurație USM. Profilurile au fost puse la dispoziție cu rata mare de raportare 1 cadru/s și corespund locației microrețelei Flexi-MLAB din București.

#### 4.5 Profiluri de putere predefinite cu distribuitorul/furnizorul de energie

Pentru a obține un anumit grad de predictibilitate și flexibilitate în transferul de energie, luând în considerare multiplele surse de incertitudini la nivel de distribuție în rețelele emergente de energie, în această lucrare **se propune o soluție pentru profiluri de putere predefinite de 1h (pre-agreate) între client și furnizorul de energie**. Abordarea inovativă este legată de demonstrarea impactului contractelor de putere bazate pe profiluri de putere predefinite și nu pe puterea maximă nominală/aprobată. Un exemplu de soluție propusă cu profiluri de putere prestabilite agregate pe intervale de timp constante este prezentată în Figura 4-3.

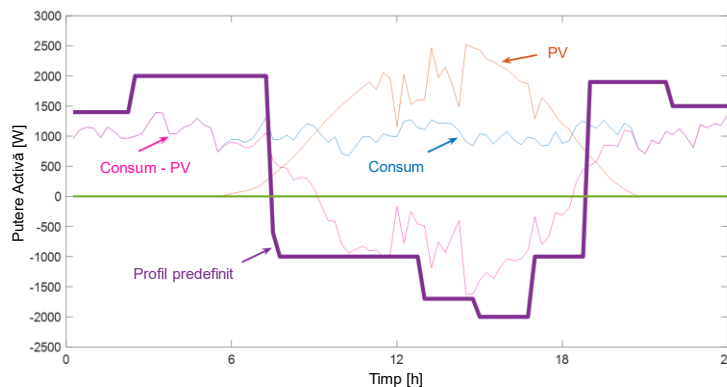


Figura 4-3. Ilustrarea grafică a conceptului de profil de putere orară predefinit (pre-agreat)

#### 4.6 Sistem de stocare a energiei folosind baterii

Pentru ca microrețeaua Flexi-MLAB să funcționeze în paradigma autoconsumului (pe baza condițiilor acceptate prin reglementare) și, de asemenea, pentru a maximiza generarea PV, se va folosi un sistem de stocare a energiei pe baza de baterii (BESS) care este compus din mai multe baterii de 12V și 3Ah de tip Li-Ion, cu o putere instalată de 10 kW. Formulând restricțiile impuse de reglementare cât și cele de natură tehnică pentru funcționare Flexi-MLAB în ceea ce privește interacțiunea cu rețeaua de distribuție (și anume fără injecției de energie în rețea, adică

autoconsum), *router*-ul de energie (în engleza *energy router*) pe partea FEE care integrează BESS trebuie să rezolve o problemă simplă de optimizare pentru a echilibra consumul local cu generarea PV. În acest capitol algoritmul se bazează pe controlul exclusiv al puterii schimbate cu operatorul rețelei publice de distribuție. ( $P_{flexi}$ ). Sistemul nu injectează energie în rețeaua de distribuție, deoarece puterea totală utilizată este întotdeauna strict pozitivă. Această putere este reprezentată de diferența dintre generare (generare PV și baterie când se descarcă) și puterea utilizată (suma puterilor utilizate la DC și AC pe partea FEE și partea ENG și baterie atunci când este în modul încărcare).

#### 4.7 Condițiile inițiale de simulare pentru comunitatea de energie cu legătura la tensiune continuă

Pentru cazul specific prezentat în acest capitol, scenariul folosit pentru prosumatorul analizat nu ia în considerare injectarea de putere în rețeaua de distribuție. Strategia de funcționare a microrețelei analizată în acest capitol (și descrisă în secțiunea următoare), în principiu, se bazează pe utilizarea energiei generate de panourile PV de către sarcinile conectate la DC și AC. Atunci când nu există suficientă radiație solară, este necesară și extragerea puterii din rețeaua de distribuție. Se vor avea în vedere pentru studiul transferului de energie în cadrul Flexi-MLAB, două scenarii de simulare asociate cazurilor în care există generare locală din PV (Zi lucrătoare normală în timpul verii, Zi de weekend normală în timpul verii). Mai jos se va prezenta doar scenariul de analiză a unei zile de weekend normală în timpul verii.

##### 4.7.1 Standard pentru funcționarea rețelelor DC la joasa tensiune (LVDC)

Sunt necesare eforturi în partea de standardizare pentru a asigura disponibilitatea și siguranța în exploatare pentru tehnologiile asociate tensiunii continue pentru la joasa tensiune iar recent comitetul internațional de standardizare (IEC) a publicat un nou raport tehnic, IEC TR 63282 – Sisteme LVDC - Evaluarea tensiunilor standard și cerințele de calitate a energiei care oferă recomandări pentru standardizarea nivelurilor de tensiune și alte aspecte conexe pentru sistemele de tensiune continuă la joasa tensiune [66].

##### 4.7.2 Utilizatorii Flexi-MLAB

###### 4.7.2.1 Utilizatorii la tensiune continuă și tensiune alternativă conectate în Flexi-MLAB – în weekend

Variația în timp a profilului de putere pentru sarcina totală pe partea FEE poate fi analizată în Figura 4-4 (derivată din măsurările provenind de la SM2 din Figura 4-1).

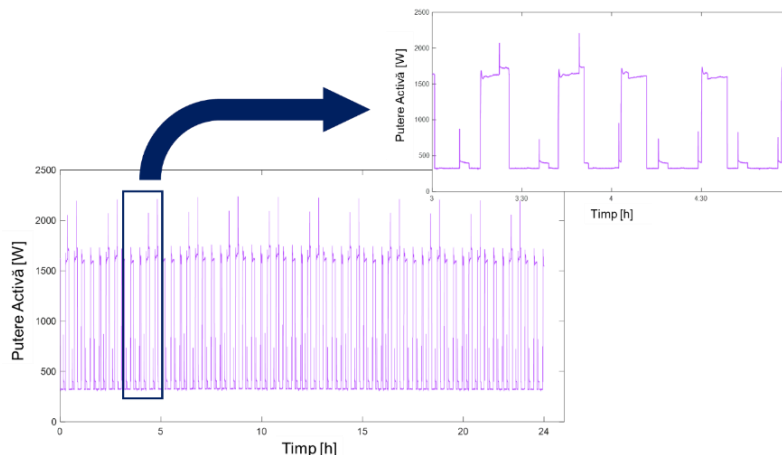


Figura 4-4. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) al sarcinii totale pe partea FEE – în weekend

Variația în timp a profilului de putere totală pe partea ENG în weekend poate fi analizată în Figura 4-5 pentru care informația de măsurare a fost achiziționată cu rata de raportare 1 cadru/s de la un contor de generație următoare (SM3 din Figura 4-1).

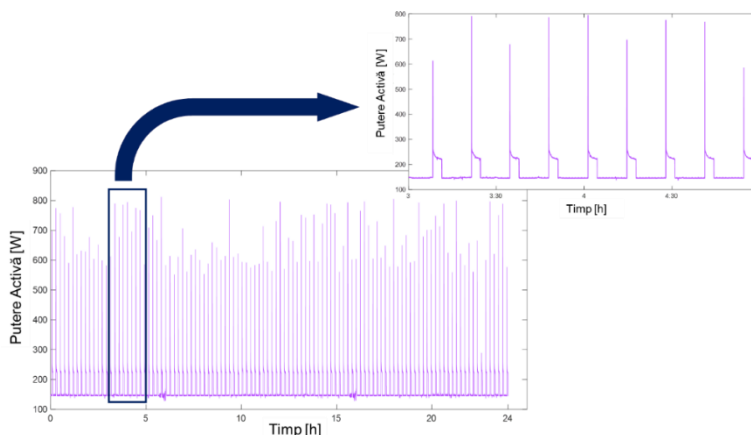


Figura 4-5. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) al sarcinii totale pe partea ENG – în weekend

### 4.7.3 Generarea PV în cadrul Flexi-MLAB

Sistemul aflat în analiză dispune de un sistem PV cu puterea nominală 2kW instalat pe acoperișul clădirii FEE și un sistem PV cu puterea nominală 1 kW instalat pe acoperișul clădirii ENG (distanța între clădiri fiind 200m). Profilul de putere agregat pe 24 de ore pentru generarea PV este prezentat în Figura 4-6.

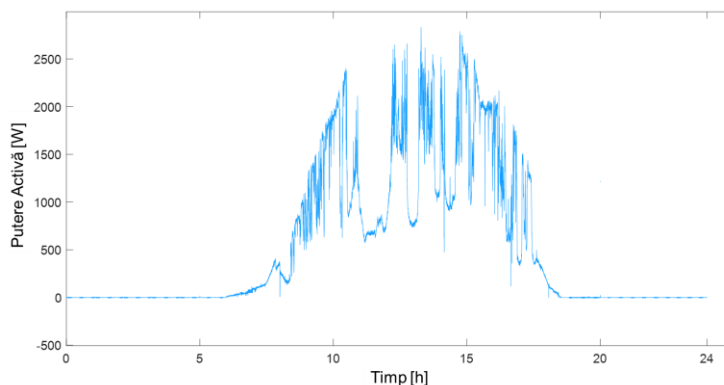


Figura 4-6. Profilul de putere generată PV, agregată FEE și ENG, 24h cu granularitate 1s

Simulările au fost realizate pentru cele mai nefavorabile scenarii de funcționare, așa cum au fost definite mai sus, prin păstrarea întotdeauna  $P_{flexi} > 0$ , ceea ce se traduce prin generarea maximă de PV în timpul sarcinii minime.

### 4.7.4 Alimentarea cu energie dinspre rețeaua publică de distribuție

După cum a fost menționat în secțiunea anterioară, pentru a depăși incertitudinea legată de condițiile de generare și utilizare a energiei electrice, sunt implementate profiluri de putere pre-agreate cu furnizorul de energie electrică (predefinite) având caracteristici diferite pentru ziua lucrătoare și weekend.

#### 4.7.4.1 Profiluri de putere pre-agreate contractual pe partea ENG – în weekend

În Figura 4-7 poate fi analizat profilul de putere propus în weekend – vara.

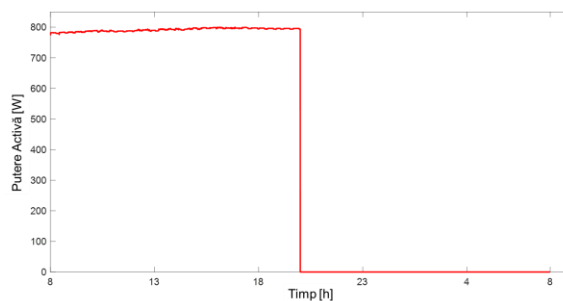


Figura 4-7. Profil de putere predefinit contractual cu distribuitorul de energie, 24h, weekend de vara

#### 4.8 Mediul de simulare in timp real Typhoon HIL

Pentru a studia și demonstra transferul de energie caracteristic funcționării sistemului test de tip SCC propus, un sistem Typhoon HIL (seria HIL402) [159] a fost folosit pentru a simula părțile componente ale sistemului, inclusiv partea de alimentare dinspre rețeaua publică de distribuție, generarea distribuită (panouri solare PV), sistemul de tip BESS, sarcinile conectate atât la DC cât și la AC, legătura de interconexiune la DC cât și partea centrală a sistemului, routerul de energie ER, iar simularea a fost de tipul *software-in-the-loop* (simularea și testarea algoritmilor de control pentru Flexi-MLAB). Modelul este construit pe baza informației de măsurare achiziționată cu rata mare de raportare asociată profilurilor de putere cu variabilitate mare (rata de raportare 1cadru/s).

#### 4.9 Rezultatele simulării in timp real

Folosind simulatorul de tip Typhoon HIL 402, toate componentele și codurile asociate algoritmilor au fost integrate și compilate (folosind *Schematic Editor*), iar simularea a fost efectuată în HIL SCADA pentru o zi a săptămânii și o zi de weekend (în total 48 de ore de simulare) pentru a analiza în timp real transferul de energie în Flexi-MLAB. S-a realizat o simulare în timp real de tip *software-in-the-loop* pentru a monitoriza comportamentul microrețelei în cazurile descrise mai sus

##### 4.9.1 Scenariul asociat unei zile de weekend de vara

Pentru cazul unei zile de weekend, când utilizarea energiei electrice este scăzută, se poate observa folosirea mai bună a capacității totale a bateriei (Figura 4-8 și **Error! Reference source not found.**) în aceleași condiții de flexibilitate ( $P_{flexi}$  în Figura 4-9) date de energia schimbată pe linia DC (Figura 4-10).

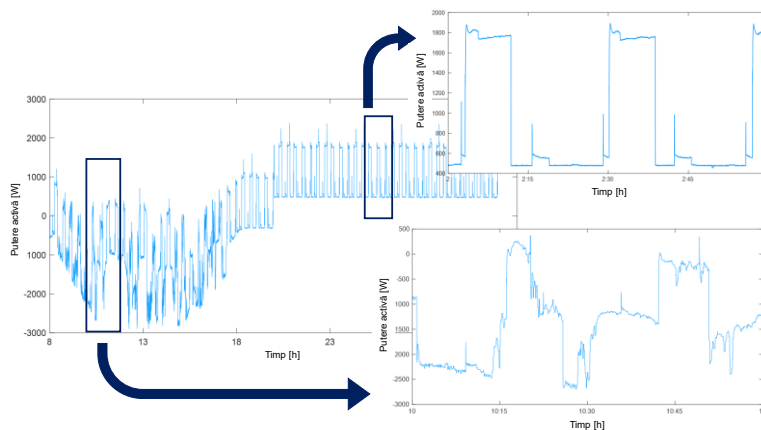


Figura 4-8. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s) pentru sistemul de tip BESS pentru o zi de weekend de vara.

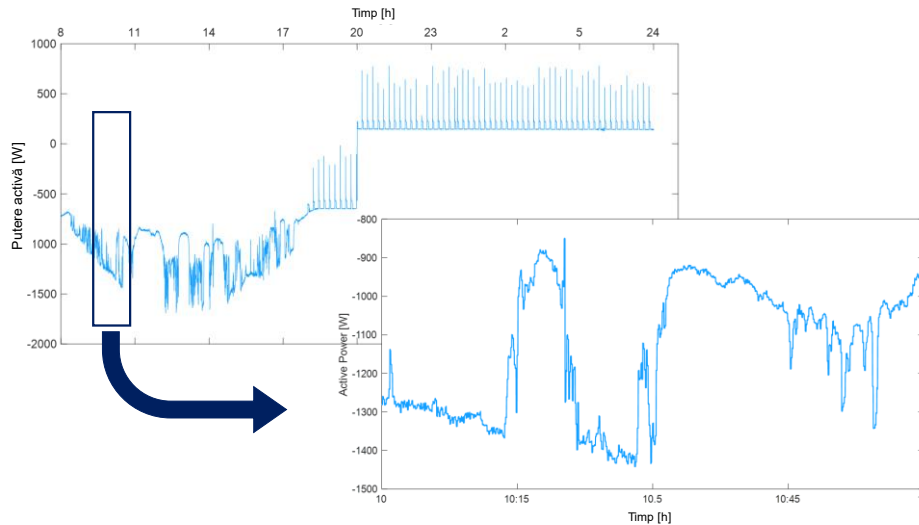


Figura 4-9. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru schimbul de putere pe linia internă la DC, pentru o zi de weekend de vară

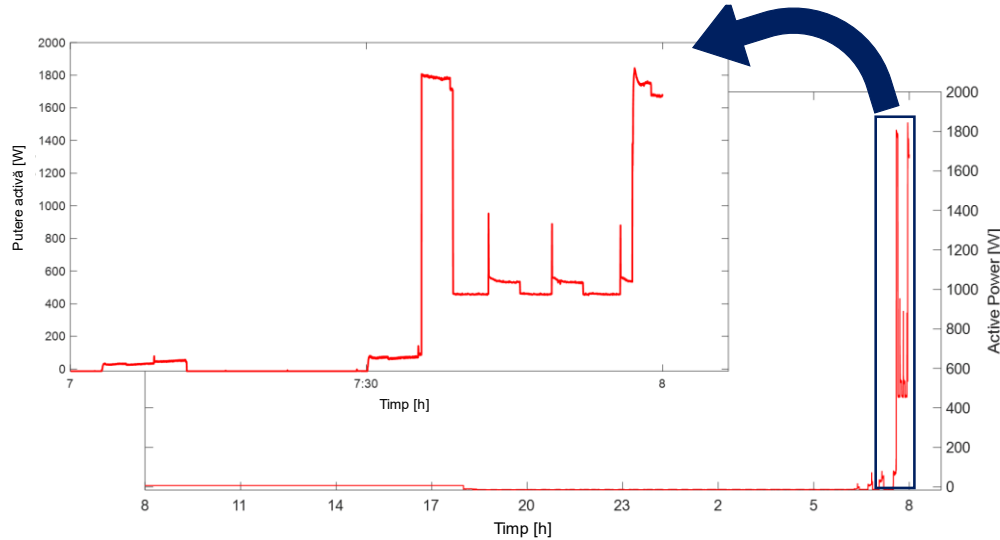


Figura 4-10. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru alimentarea cu energie de la rețeaua publică de distribuție pe partea FEE, zi lucrătoare normală de vară

#### 4.10 Introducere în domeniul simulării digitale în timp real și mediul Typhoon HIL

Typhoon HIL este un simulator în timp real (cu experimente de tip *hardware-in-the-loop* și *software in the loop*), conceput pentru a testa și valida mecanisme de control pentru diverse aplicații în domeniul sistemelor energetice. Acesta utilizează un procesor FPGA și un microcontroller pentru a simula condițiile de operare și pentru a genera semnale de intrare în timp real, oferind astfel o simulare precisă și detaliată a sistemelor analizate. Astfel simularea în timp real implică execuția unui model matematic sau fizic în timpul procesării datelor astfel încât să reproducă cu pas mic de timp comportamentul sistemului real analizat (simulat). Aceasta permite utilizatorilor să analizeze comportamentul sistemului simulat într-un mod aproape identic cu cel al sistemului real. Simulatorul Typhoon HIL are o interfață cu utilizatorul care permite crearea și implementarea modelului sistemului analizat și execuția (simularea) scenariilor de testare. În figura de mai jos se

prezintă Typhoon HIL Control Center cu principalele componente software accesibile, precum și instrumente suplimentare care pot fi lansate direct din interfața sa.

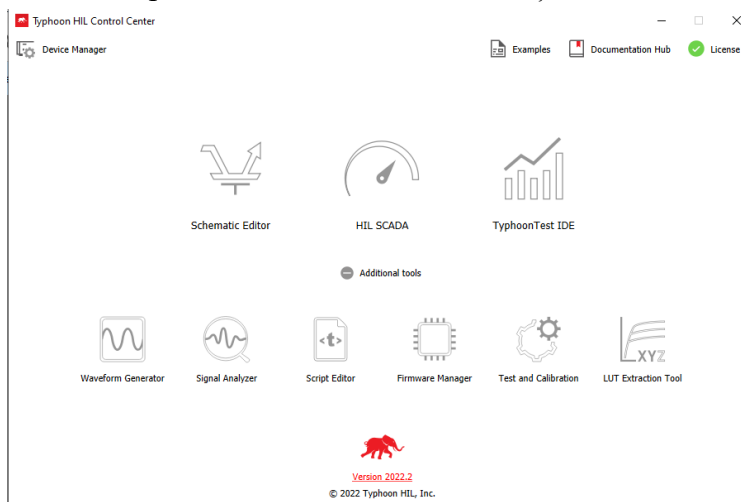


Figura 4-11. Panoul de control (Typhoon HIL Control Center)

## 5 Concluzii și contribuții personale

### 5.1 Concluzii

Lucrarea abordează un subiect asociat domeniului sistemelor energetice emergente, caracterizate de utilizarea pe scară largă a convertoarelor statice de putere pentru medierea transferului de energie între elemente conectate la diverse tipuri (AC, DC) și niveluri de tensiune, controlabile sau nu. Astfel de sisteme includ și arhitecturi diverse ale infrastructurii energetice, de exemplu, prosumatori, micrețele la tensiune continuă sau hibride, rețele active de distribuție în regiuni izolate etc. și sunt caracterizate de inerție mecanică mică, cu implicații dramatice asupra sistemelor de măsurare și control.

În lucrare se evidențiază importanța utilizării unor noi modele pentru simularea și studiul transferului de energie electrică și pentru a evalua performanța sistemelor energetice cu inerție mică în diferite condiții de funcționare. Aceste modele necesită metode avansate de analiză a transferului de energie electrică, în contextul informației de măsurare utilizând rezoluție temporală diferită.

O primă metodă de analiză prezentată se bazează pe două procedee diferite care au fost adaptate și îmbunătățite: Metoda Hilbert-Huang bazată pe semnale de tip mască pentru identificarea modurilor de oscilație existente în semnalele distorsionate variabile în timp și sinteza unui semnal de tip staționar folosind algoritmul QSSI. Metoda Hilbert-Huang a fost modificată prin aplicarea descompunerii în mod empiric împreună cu semnale de tip mască construite pe baza rezultatelor aplicării Transformatei Fourier Discrete, analiza spectrală Hilbert și o metodă de post-procesare pentru separarea componentelor variabile și calculul amplitudinilor și frecvențelor acestora în cazul unui semnalului distorsionat caracteristic pentru operarea unui prosumator la joasă tensiune.

Performanțele metodei Hilbert-Huang originale și ale versiunilor îmbunătățite au fost demonstrate pentru localizarea timp-frecvență și timp-amplitudine și importanța semnalelor de tip mască pentru a îmbunătăți descompunerea în mod empiric (EMD) pentru aplicațiile de calitate a energiei, iar algoritmul hibrid Hilbert-Huang propus a arătat eficiență în separarea modurilor de oscilație care evoluează doar în anumite intervale de timp în interiorul ferestrei de analiză. Avantajele metodei au fost subliniate și explicate în lucrare, iar ilustrarea optimă a fost realizată folosind semnale

pentru care identificarea schimbării stării de regim staționar este greu de realizat. Pentru aceste tipuri de semnale, au fost adăugate componente neobișnuite (cum ar fi componenta având frecvența de variație de 430 Hz și 494 Hz) cu amplitudini care variază în timp, iar metoda le-a identificat cu succes.

Scopul împărțirii semnalului inițial în intervale de timp cvasi-staționare a fost atins cu succes ca ultimă etapă a metodei hibride, oferind posibilitatea realizării unei descrieri detaliate timp-frecvență a semnalului și, ca atare, a identificării fenomenelor care urmează să fie abordate în elaborarea schemelor de control în micrețele. Mai mult decât atât, rezultatele QSSI pot fi utile mai ales în aplicațiile în care ipoteza de regim staționar este importantă (de exemplu, estimatori de stare). O altă direcție importantă pentru QSSI este data de profilurile specifice de încărcare și generare prin studierea semnalelor distorsionate variabile în timp de putere în punctul comun de conexiune pentru rețelele active de distribuție la joasă tensiune. Metoda a fost testată pentru două cazuri, un semnal sintetic și un semnal real pentru semnalul de curent specifice pentru funcționarea unui cuptor cu microunde.

Aplicațiile potențiale ale metodei hibride Hilbert-Huang includ modele ale profilurilor specifice (cu semnătură de frecvență) pentru utilizare și generare a energiei electrice și localizare timp-frecvență-amplitudine, eliminarea componentelor de frecvențe înalte (armonice), detectarea evenimentelor anormale în mediul de funcționare al unui prosumator și planificarea transferului de energie în micrețele dinspre punctul comun de conexiune.

Pe un alt palier de studiu, teza a abordat (capitolul 3) pierderea de informație asociată contoarelor de energie cu rata mare de raportare (1 cadru/secunda sau 0.5 cadre/secunda), pentru diferite scenarii de analiză în zile lucrătoare și de weekend, în anotimp de primăvară/vară sau iarnă pentru diferite tipuri de agregare temporală (1 minut, 15 minute, 1h) și spațială (30 de camere și 60 de studenți, 150 de camere și 300 de studenți utilizatori de energie electrică dintr-un cămin studentesc). Au fost prezentate avantajele extragerii unor informații relevante folosind date de măsurare furnizate de contoarele de energie electrică cu rată mare de raportare, cu ajutorul unor variabile (metrici) statistice simple de calculat, capabile să păstreze confidențialitatea utilizatorilor, observând în același timp, comportamentul sistemului folosind rate de raportare uzuale în exploatarea rețelelor de distribuție. A fost prezentat și un cadru general de extragere a informațiilor relevante, cu accent pe o metodologie bazată pe date statistice, care urmărește să atingă anumite particularități de funcționare și operare a rețelelor la joasă tensiune ținând cont atât de constrângerile utilizatorilor care sunt și proprietarii datelor de măsurare furnizate de contoare (care țin de confidențialitate și securitatea cibernetică) cât și de nevoile operatorului de distribuție în îmbunătățirea evaluării situației de funcționare și operare a sistemului analizat. Abordarea a presupus putere de calcul și comunicație a datelor minimă dar și evitarea raportării (în timp în afara rețelei locale a utilizatorului și proprietarului datelor de măsurare) unor volume uriașe de informație cu rezoluție mare în timp. Variabilele statistice propuse a fi implementate sunt centile (de exemplu, p95 și p99) și funcția de probabilitate cumulativă. Ele sunt suficient de simple a fi procesate și criptate la nivelul de proces al contorului de energie folosind același echipament de procesare, captând în același timp dinamica sistemului analizat în intervalul de timp dintre două momente consecutive de raportare. (uzual, conform practicii actuală – 15 min, sau 1h).

Utilitatea modelelor și algoritmilor dezvoltați au fost demonstrate pentru cazul funcționării flexibile a unei micrețele cu flux de putere cu variabilitate ridicată, o micrețea hibridă ca parte integrată în cadrul campusului Universității Politehnice din București. Se prezintă scenarii de funcționare pentru infrastructura reală, având structura de bază compusă din două micrețele legate între ele printr-o legătură la tensiune continuă, acționând ca două unități restricționate (autoconsum și fără injecție de energie în rețea). A fost studiată fezabilitatea unei comunități de



energie construite pe baza a doi prosumatori interconectați printr-o legătură la tensiune continuă. Ambele microrețele au utilizatori caracterizați de o varietate de echipamente, dintre care unele fiind conectate direct la tensiune continuă (220 V), generarea fotoelectrică și o unitate de stocare. Structura rezultată presupune mai multe restricții printre care: (i) comportament de autoconsum; (ii) profiluri de putere cu rezoluție mare agreate și garantate contractual cu furnizorul de energie electrică; (iii) generare locală de tip fotoelectric (PV) fără restricții. Pentru a asigura această funcționare restrictivă, profilurile de putere schimbate cu furnizorul sunt estimate cu incertitudine scăzută și rezoluție bună în timp. Acest lucru poate fi realizat prin măsurări cu rată mare de raportare și modele detaliate ale transferului de energie. În această lucrare, am folosit modele de utilizare și generare a energiei electrice derivate din măsurări locale utilizând contoare de energie cu funcții separate (USM), utilizând rată de raportare de 1 cadru/secunda. Accentul este pus pe flexibilitatea oferită de interacțiunea elementelor active din microrețeaua cu legătura la tensiune continuă. Schimbul de energie electrică cu furnizorul a fost stabilit folosind un concept nou, profiluri de putere stabilite contractual, ca un potențial răspuns la impredictibilitatea viitoarelor piețe de energie. Pentru a studia și demonstra transferul de energie caracteristic funcționării sistemului test pe baza informației de măsurare achiziționată cu rată mare de raportare asociată profilurilor de putere cu variabilitate mare, sistemul este implementat în mediul de simulare digitală în timp real TyphoonHIL.

## 5.2 Contribuții personale

- **Sisteme energetice cu inerție mică.** Prin studiul bibliografiei și literaturii de specialitate și prin analiza diferitelor sisteme de clasificare și definiții propuse de alți cercetători, în această teză au fost identificate și evaluate provocările care trebuie abordate pentru o înțelegere completă asupra operării și funcționării microrețelelor mai ales din perspectiva reglementărilor și standardelor asociate. Au fost identificate și studiate mai multe direcții de cercetare care pot contribui la dezvoltarea contextului și exploatarea microrețelelor, cum ar fi dezvoltarea de noi metode de analiză a transferului de putere și noi variabile pentru evaluarea vizibilității și dezvoltării microrețelelor, explorarea potențialului noilor tehnologii și evaluarea impactului microrețelelor asupra rețelei publice de distribuție dar și asupra societății. Un alt aspect important discutat este legat de necesitatea măsurărilor cu rată mare de raportare în studiul și monitorizarea transferului de energie în microrețele, unde generarea distribuită la nivel local are un caracter ridicat de impredictibilitate, utilizarea energiei are un caracter puternic variabil iar controlul funcționării microrețelelor presupune implementarea și coordonarea unor strategii de flexibilitate în operare.
- **Analiza timp-frecvență a semnalelor de tensiune și curent.** Studiul semnalelor care caracterizează transferul de energie într-o microrețea sau în mediul unui prosumator a fost realizat printr-o metodă de reprezentare în domeniul timp-frecvență-amplitudine cu posibilități ridicate de localizare în timp și spațiu a unor caracteristici ducând la creșterea eficienței observabilității și operării sistemelor emergente de energie. Flexibilitatea în funcționarea unui prosumator sau în operarea unei microrețele poate fi îmbunătățită prin analiza timp-frecvență a semnalelor distorsionate variabile în timp care caracterizează transferul de energie (atât pentru generare cât și pentru utilizarea energiei electrice) și discriminarea intervalelor de regim cvasi-staționar. Această direcție a fost abordată prin adaptarea și asocierea a două metode diferite: metoda Hilbert-Huang îmbunătățită pe baza semnalelor de tip mască pentru identificarea modurilor de oscilație existente în semnale distorsionate variabile în timp, și metoda de post-procesare semnalul în stare staționară, așa cum este prezentat în algoritmul RVC. Performanțele metodei originale Hilbert-Huang și ale versiunilor îmbunătățite au fost demonstrate pentru localizarea timp-frecvență și timp-

amplitudine cât și importanța utilizării semnalelor de tip mască pentru a îmbunătăți descompunerea în mod empiric pentru aplicațiile de calitate a energiei, în studiul semnalelor nestaționare variabile în timp. Metoda hibridă Hilbert-Huang propusă și demonstrată în această teză a arătat eficiență în separarea modurilor de oscilație care variază doar pe anumite intervale de timp în interiorul ferestrei de analiză. Obiectivul de a împărți semnalul distorsionat în intervale de timp cvasi-staționar a fost atins cu succes ca ultimă etapă a metodei hibride propuse, oferind posibilitatea realizării unei descrieri detaliate timp-frecvență a semnalului. Metoda hibridă Hilbert-Huang a fost aplicată unor semnale distorsionate variabile în timp specifice funcționării unui prosumator achiziționate cu rată mare de eșantionare folosind analizorul de calitate a energiei ELSPEC G440.

- **Pierderea de informație la rate mici de raportare a datelor măsurate.** Extragerea de cunoștințe și pierderea de informații, în cazul profilurilor zilnice de putere asociate clădirilor campusului studențesc UPB, au fost realizate folosind măsurări cu rată mare de raportare și modele derivate ale transferului de energie. Au fost folosite profiluri medii de putere în locul celor obținute de la contoare inteligente de energie cu rată de raportare 1 sau 0.5 cadre/secunda derivate din măsurări locale folosind conceptul de contor de energie cu funcții separate (USM). Analiza pierderii de informație a fost realizată folosind date de măsurare furnizate de contoarele de energie cu rată mare de raportare (1 cadru/secunda sau 0.5 cadre/secunda), în diverse scenarii, utilizând diferite niveluri de agregare temporală și spațială.
- **Infrastructura de achiziție informației de măsurare caracteristica sisteme energetice cu inerție mică.** A fost prezentat și dezvoltat un cadru general pentru extragerea informațiilor relevante, care se concentrează pe o metodologie bazată pe date statistice, având ca scop abordarea particularităților funcționării și operării rețelelor la joasă tensiune. Această metodologie constă în abordarea integrată a multiplelor aspecte tehnice și de securitate, astfel încât să fie atins un echilibru între confidențialitatea datelor și necesitatea de a îmbunătăți evaluarea și operarea rețelelor la joasă tensiune. În plus, această abordare poate fi implementată fără a fi necesară o putere de calcul sau comunicație foarte mare, ceea ce o face mai accesibilă și mai eficientă în practică.
- **Simulări numerice în timp real utilizând tehnologia Typhoon HIL.** Pentru a studia și demonstra transferul de energie caracteristic funcționării unui sistem test de tip microrețea, reducând costurile atât pentru utilizatori, cât și pentru operatorul rețelei publice de distribuție prin eliminarea fluxului bidirecțional și creșterea generării din surse regenerabile de energie, asigurând balanța energetică, cunoașterea profilurilor de putere, sunt necesare echipamente care permit accesul la informație de măsurare în timp real cât și la deciziile privind operarea microrețelei. În acest sens, simularea numerică în timp real a fost utilizată pentru a testa comportamentul real al sistemului analizat. Un sistem Typhoon HIL (seria HIL402) a fost folosit pentru a simula părțile componente ale sistemului, inclusiv partea de alimentare dinspre rețeaua publică de distribuție, generarea distribuită (panouri solare PV), sistemul de tip BESS, sarcinile conectate atât la DC cât și la AC, legătura de interconexiune la DC cât și partea centrală a sistemului, *router*-ul de energie ER, iar simularea a fost de tipul *software-in-the-loop* (simularea și testarea algoritmilor de control pentru microrețeaua analizată). Modelul este construit pe baza informației de măsurare achiziționate cu rată mare de raportare asociată profilurilor de putere cu variabilitate mare (rată de raportare 1cadru/s), sistemul fiind implementat în mediul TyphoonHIL care permite obținerea rezultatelor simulării în timp real și acces pentru analiza informației pentru validare. Fișierele cu informația de măsurare (cu rezoluție 1s) (utilizare și generare) au fost importate

în Typhoon HIL și au importate ca date de intrare pentru simulare. Blocurile dedicate pentru achiziția informației de simulare au fost implementate în HIL SCADA (mediu special Typhoon HIL pentru rularea simulării) cu scopul de a prelua rezultatele cu rezoluție 1s.

- **Profilurilor de putere pre-agreate contractual.** Operarea microrețelei analizate a presupus restricții în funcționare iar propunerea impunerii unor profiluri agreate contractual cu furnizorul de energie reprezintă o contribuție importantă în îmbunătățirea previzibilității și fiabilității sistemelor de alimentare cu energie electrică. Prin stabilirea acestor profiluri, se poate asigura un schimb de energie eficient și rentabil între furnizor și utilizator, în ciuda unei imprevizibilități viitoarelor piețe de energie. Acest lucru poate duce la o utilizare mai eficientă și mai sustenabilă a resurselor de energie și la o reducere a costurilor pentru utilizatori. Pentru validarea acestei metode, am utilizat modele de utilizare și generare a energiei electrice derivate din măsurări locale cu rată de raportare de 1 cadru/secundă. Accentul a fost pus pe flexibilitatea oferită de interacțiunea elementelor active din microrețeaua cu legătură la tensiune continuă.

## Bibliografie

- [1]. A. Correa-Florez, A. Michiorri and G. Kariniotakis, "Optimal Participation of Residential Aggregators in Energy and Local Flexibility Markets," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1644-1656, March 2020.
- [2]. A.N. Zomers, "The Electrification Challenge", Cape Town CIGRE/IEC Symposium, October 2015.
- [3]. Albu, E. Kyriakides, G. Chicco, M. Popa and A. Nechifor, "Online Monitoring of the Power Transfer in a DC Test Grid," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 5, pp. 1104-1118, May 2010.
- [4]. Amoud, H.; Snoussi, H.; Hewson, D.J.; Duchene, J. Hilbert-Huang Transformation: Application to Postural Stability Analy-sis. In *Proceedings of the 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Lyon, France, 22–26 August 2007, pp. 1562–1565.
- [5]. An ICT platform for Sustainable Energy Ecosystem in Smart Cities, ERANET-LAC-ITCITY, NR. 23/2017, <http://itcity.microderlab.pub.ro/>
- [6]. Andres Felipe Martinez Palomino – Study of Acceptability Curve of in use appliances directly supplied by DC Microgrid, Master Thesis - Politecnico din Torino, 2016.
- [7]. Anxu, "On quantitative identification of explosion earthquake based on cepstrum computation of HHT and statistical simulation of sub-cluster," in *Chinese Control Conference*, Hefei, 2012.
- [8]. Assessment of standard voltages and power quality requirements, en
- [9]. Ayon, J.K. Gruber, B.P. Hayes, J. Usaola, M. Prodanovic, "An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands", *Appl. Energy*. 198 (2017) pp.1-11.
- [10]. Baayeh, A.G.; Bayati, N. Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform. *Energies* 2020, 13, 5416.
- [11]. Backhaus, G. W. Swift, S. Chatzivasileiadis, W. Tschudi, S. Glover, M. Starke et al., *DC Microgrids Scoping Study—Estimate of Technical and Economic Benefits*, Los Alamos National Laboratory, March 2015.
- [12]. Baringo, R. Sanchez-Amaro, "A stochastic robust optimization approach for the bidding strategy of an electric vehicle aggregator", *Electr. Power Syst. Res.* 146 (2017) 362–370.
- [13]. Bayer, P. Matschoss, et al., 'The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids', *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 129–141, Apr. 2018.
- [14]. BeagleBone Black low-cost, community-supported development platform for developers and hobbyists. [Online] disponibil: <https://beagleboard.org/black>
- [15]. Belanger, P. Venne, J.-N. Paquin, "The What, Where and Why of Real-Time Simulation, *IEEE* 2003.
- [16]. C. Sharpley and V. Vatchev, "Analysis of intrinsic mode functions," *Industrial Mathematics Institute Research Report* 2004, Dept. Math., Univ. South Carolina, 2004.
- [17]. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: a comprehensive view, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (3) (2009), pp. 535-551
- [18]. Chilukuri, M.V.; Dash, P.K. Multiresolution S-Transform-Based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004, 19, 323–330.
- [19]. Christoforidis, Georgios C. and Panapakidis, Ioannis P. and Papadopoulos, Theofilos A. and Papagiannis, Grigoris K. and Koumparou, Ioannis and Hadjipanayi, Maria and Georghiou, George E. – A Model for the Assessment of Different Net-Metering Policies, *Energies*, 2016, <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/262>
- [20]. CIGRE Technical Brochure 635 (2015) Microgrids 1: Engineering, Economics & Experiences, WG C6.22, [www.e-cigre.org/](http://www.e-cigre.org/); ISBN 978-2-85873-338-5

- [21]. CIGRE Working Group C.22). Microgrids 1, Engineering, Economics, & Experience. Paris, France. Ref. 635, October; 2015 <http://www.e-cigre.org/publication/635-microgrids-1-engineering-economics-experience>.
- [22]. Çimen, Halil, Çetinkaya, Nurettin and Vasquez, Juan C. and Guerrero, Josep M. – A Microgrid Energy Management System Based on Non-Intrusive Load Monitoring via Multitask Learning, IEEE Transactions on Smart Grid, 2021.
- [23]. Ciornei, Irina and Albu, Mihaela and Sanduleac, Mihai and Rodriguez-Diaz, Enrique and Guerrero, Josep and Vásquez, Juan C. – {Real-time optimal scheduling for prosumers resilient to regulatory changes, 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON).
- [24]. Ciornei, Irina and Albu, Mihaela and Sănduleac, Mihai and Rodriguez-Diaz, Enrique and Teodorescu, Remus and Guerrero, Josep – Adaptive Distributed EMS for Small Clusters of Resilient LVDC Microgrids, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe).
- [25]. Ciornei, L. Hadjidemetriou, M. Albu, M. Sanduleac, E.Kyriakides, “Analytical derivation of PQ indicators compatible with control strategies for DC microgrids,” IEEE PowerTech, Manchester, UK, 18-22 June 2017.
- [26]. Cohen, L. Time frequency distributions—A review. Proc. IEEE 1989, 77, 941–981.
- [27]. Cui, Zhicheng, Wenlin Chen, and Yixin Chen. "Multi-scale convolutional neural networks for time series classification." arXiv preprint arXiv:1603.06995 (2016).
- [28]. Dash, P.K.; Panigrahi, B.K.; Panda, G. Power quality analysis using s-transform. IEEE Trans. Power Deliv. 2003, 18, 406–411.
- [29]. Deering and J. F. Kaiser, “The use of masking signal to improve empirical mode decomposition,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP’05), 2005, vol. 4, pp. 485–488.
- [30]. Deering, R.; Kaiser, J.F. The use of masking signal to improve empirical mode decomposition. In Proceedings of the IEEE International Conference Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP’05), Philadelphia, PL, USA, 22–23 Mach 2005, vol. 4, pp. 485–488.
- [31]. Denholm, M. O’Connell, et al. – Overgeneration from Solar Energy in California. A Field Guide to the Duck Chart, NREL, Denver USA, Technical Report NREL/TP-6A20-65023, Nov. 2015.
- [32]. Dowling, Alexander W., Ranjeet Kumar, and Victor M. Zavala. "A multi-scale optimization framework for electricity market participation." Applied Energy 190 (2017): 147-164.
- [33]. Dreidy M, Mokhlis H, Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review. Renew Sustain Energy Rev 2017;69:144–55.
- [34]. Driesen, J., Craenenbroeck, T.V., Reekmans, R., Dommelen, D.V. Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform. In Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Belgium, 4–6 June 1996.
- [35]. E Huang, N.; Shen, S.S.P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications; World Scientific: Singapore, 2005.
- [36]. E. Huang and S. S. P. Shen, Eds., Hilbert-Huang Transform and Its Applications. Singapore: World Scientific, 2005.
- [37]. ELSPEC—Where Power meets Quality. Available online: <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4400-power-quality-analyzer/> (accessed on 17 March 2021).
- [38]. EPRI (Electric Power Research Institute). 2019. Meeting the Challenges of Declining System Inertia, 3002015131 April 2019
- [39]. Eremia, M., & Shahidehpour, M. (Eds.). (2013). Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control. John Wiley & Sons.

- [40]. Eto, Joseph H., John Undrill, Ciaran Roberts, Peter Mackin, and Jeffrey Ellis. 2018. Control Requirements for Reliable Interconnection Frequency Response. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-2001103. Disponibil online: [https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/frequency\\_control\\_requirements\\_lbnl-2001103.pdf](https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/frequency_control_requirements_lbnl-2001103.pdf)
- [41]. F. Locment and M. Sechilariu, "Modeling and Simulation of DC Microgrids for Electric Vehicle Charging Stations," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 4335, May 2015.
- [42]. Faraji, Jamal and Ketabi, Abbas and Hashemi-Dezaki, Hamed – Optimization of the scheduling and operation of prosumers considering the loss of life costs of battery storage systems, *The Journal of Energy Storage*.
- [43]. Fawaz, Hassan Ismail, et al. "InceptionTime: Finding AlexNet for Time Series Classification." arXiv preprint arXiv:1909.04939 (2019).
- [44]. Frieden, Dorian and Tuerk, Andreas and Neumann, Camilla and d'Herbement, Stanislas and Roberts, Joshua, Collective self-consumption and energy communities: Trends and challenges in the transposition of the EU framework, December 2022.
- [45]. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 10-15, Apr. 1993.
- [46]. G. Phadke, J. S. Thorp and M. G. Adamiak, "A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 5, pp. 1025 - 1038, 1983.
- [47]. G. Rilling, P. Flandrin and P. Goncalves, "On empirical decomposition and its algorithms," in *IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process*, Grado, Italy, 2003.
- [48]. G. Stamatescu, R. Entezari, K. Römer and O. Saukh, "Deep and Efficient Impact Models for Edge Characterization and Control of Energy Events," 2019 IEEE 25th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Tianjin, China, 2019, pp. 639-646.
- [49]. G. Stamatescu, **R. Plamanescu**, I. Ciornei and M. Albu, "Detection of Anomalies in Power Profiles using Data Analytics," 2022 IEEE 12th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Cagliari, Italy, 2022, pp. 1-6.
- [50]. G. T. Heydt, P. S. Field, C. C. Liu, D. Pierce, L. Tu, and G. Hensley, "Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 4, pp. 1411–1416, Oct.1999.
- [51]. G. Van den Broeck, T. D. Mai, and J. Driesen, "MatLVDC: A New Open Source Matlab Toolbox to Simulate DC Networks including Power Electronic Converters and Distributed Energy Resources," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Denver, USA, pp. 1-4, 26-31 July 2015.
- [52]. Galli, A.; Heydt, G.; Ribeiro, P. Exploring the power of wavelet analysis. *IEEE Comput. Appl. Power* 1996, 9, 37–41.
- [53]. Ghosal et al., "Key management systems for smart grid advanced metering infrastructure: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2831-2848, 2019.
- [54]. Green, M. Prodanovic Control of inverter-based micro-grids *Electric Power Systems Research*, 77 (9) (2007), pp. 1204-1213
- [55]. Griffel, B.; Calvano, S.E.; Coyle, S.M.; Macor, M.A.; Jan, B.U.; Reddell, M.; Semmlow, J.L.; Corbett, S.; Lowry, S.F. Instantaneous frequency analysis shows greater sensitivity to parasympathetic components of heart rate than spectral analysis. In *Proceedings of the 2013 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB)*, Brooklyn, NY, USA, 7 December 2013, pp. 1–5.
- [56]. H. Kirkham and M. Albu, "Measurement, Nyquist and Shannon: A view of PMU metrology," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2017, pp. 23-27.

- [57]. H. Kirkham and R. White, "The Modern Measurement Challenge," 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1-6.
- [58]. H. Liang, Q. H. Lin and J. D. Z. Chen, "Application of the empirical mode decomposition to the analysis of esophageal manometric data in gastro-esophageal reflux disease," IEEE Trans. Biomed. Eng, vol. 52, no. 10, p. 1692–1701, 2005.
- [59]. Hatzigiorgianni, Nikos, Microgrids: architectures and control, ed. John Wiley & Sons, 2014.
- [60]. <https://www.typhoon-hil.com/>
- [61]. Huang, B. Kaszteny, V. Madani, K. Martin, S. Meliopoulos, D. Novosel and J. Stenbakken, "Performance evaluation of phasor measurement systems," in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA, pp. 1-7, July 2008.
- [62]. Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In Proceedings of the Royal Society of London, Royal Society, London, UK. ; volume 454, no. 1971, pp. 903—995, March 1998.
- [63]. IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods
- [64]. IEC 62056-1-0:2014, "Electricity metering data exchange – the dlms/cosem suite - part 1-0: Smart metering standardisation framework,"2014
- [65]. IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1:2016). In Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4–30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.
- [66]. IEC TR 63282:2020 – Technical Report – LVDC systems - Assessment of standard voltages and power quality requirements, TC8 – 2020.
- [67]. IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring, IEEE Standard C37.244-2013
- [68]. IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control, IEEE Standard C37.242-2013
- [69]. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers', IEEE Std C57.104-2019, Piscataway, NJ, USA, 2019, pp. 1–98.
- [70]. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems -- Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements," in IEEE Std C37.118.1a-2014 (Amendment to IEEE Std C37.118.1-2011) , vol., no., pp.1-25, 30 April 2014.
- [71]. IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard 1344-1995.
- [72]. IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard C37.118-2005.
- [73]. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers 2018, IEEE Std 2030.7-2017.
- [74]. IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements," in IEC/IEEE 60255-118-1:2018, vol., no., pp.1-78, 19 Dec. 2018.
- [75]. Intelligent FIWARE-based Generic Energy Storage Services for Environmentally Responsible Communities and Cities, joint programming initiative MiCall19, project number 176 - ERANET-REGSYS-I-GRETA, <http://i-greta.microderlab.upb.ro/>
- [76]. International Electrotechnical Commission, "CISPR 16/TR 16-3: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 3: CISPR technical reports,"
- [77]. International Electrotechnical Commission, "CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements,"

- [78]. International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-7: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto," 2021.
- [79]. Irina Ciornei, Mihaela Albu, Mihai Sanduleac, Enrique Rodriguez-Diaz, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, 2018, Real-time optimal scheduling for prosumers resilient to regulatory changes, Proc. of the 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, CYPRUS, Jun 03-07, 2018.
- [80]. J. C. Nunes, Y. Bouaoune, E. Delechelle, N. Oumar and P. Bunel, "Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition," *Image Vis. Comput.*, vol. 21, p. 1019–1026, 2003.
- [81]. J. Driesen, T. V. Craenenbroeck, R. Reekmans, and D. V. Dommelen, "Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform," in Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., 1996.
- [82]. J. Guerrero, J. Vasquez, R. Teodorescu Hierarchical control of droop-controlled dc and ac microgrids: a general approach towards standardization IEEE Industrial Electronics (IECON) (2009), pp. 4305-4310
- [83]. J. Jimeno, J. Anduaga, J. Oyarzabal, A. de Muro Architecture of a microgrid energy management system European Transactions on Electrical Power, 21 (2) (2011), pp. 1142-1158
- [84]. J. Li, C. Zhao and H. Su, "A mode mixing elimination method of HHT in fault detection," in 2016 2nd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIoT), Dalian, 2016.
- [85]. J. von Appen, T. Stetz, M. Braun and A. Schmiegel, "Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distribution Grids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 1002-1009, March 2014.
- [86]. Jiao, S. Yang, Y. Chang, G. Yan and J. Hu, "Detecting a cracked rotor with HHT-based time-frequency representation," in 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, 2008.
- [87]. Joint Committee for Guides in Metrology, WG 1, "GUM: Guide to the expression of uncertainty in measurement," 2008.
- [88]. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, "Power quality analysis using S-transform," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 406–411, Apr. 2003.
- [89]. Kamala Sarojini Ratnam, K. Palanisamy, Guangya Yang, Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 124, 2020, 109773.
- [90]. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas Microgrids management IEEE Power and Energy Magazine, 9 (5) (2011), pp. 54-65
- [91]. Kirkham and A. Rieplieks, "Dealing with non-stationary signals: Definitions, considerations and practical implications," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016, pp. 1-5.
- [92]. Kotsonias, M. Asprou, et. al., 'State Estimation for Distribution Grids With a Single-Point Grounded Neutral Conductor', IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 10, pp. 8167–8177, Oct. 2020.
- [93]. L. Cohen, "Time frequency distributions—A review," Proc. IEEE, vol. 77, no. 7, pp. 941–981, Jul. 1989.
- [94]. L. Lijun, S. Yi and W. Yan, "Radar signal filter design base on HHT method," in 31st Chinese Control Conference, Hefei, 2012.
- [95]. L. Shengqing, Z. Huanyue, X. Wenxiang and L. Weizhou, "A Harmonic Current Forecasting Method for Microgrid HAPF Based on the EMD-SVR Theory," in 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Hong Kong, 2013.



- [96]. L. Zhang, J. Zhang, and Y. H. Hu, 'A Privacy-Preserving Distributed Smart Metering Temporal and Spatial Aggregation Scheme', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28372–28382, 2019.
- [97]. Landis+Gyr E550, "Transformer connected commercial electricity meter suitable for low and medium voltage applications," 2022. [Online] Disponibil: <https://www.landisgyr.eu/product/landisgyr-e550/>
- [98]. Li, D.; Ukil, A.; Satpathi, K.; Yeap, Y.M. Hilbert-Huang Transform Based Transient Analysis in VSC Interfaced DC System. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020.
- [99]. Li, P.; Fei, L.; Qian, J.; Chen, J.; Li, X. Based on the improved HHT and its application in the power quality detection of microgrid. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 20–23 August 2011.
- [100]. Li, P.; Fei, L.; Xi, P.; Jie, J.; Zhang, J. HHT based on the LS-SVM and its application in the voltage flicker and harmonic detection of microgrid. In *Proceedings of the 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Re-structuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, Shandong, 6 July 2011.
- [101]. M. Albu, M. Sânduleac, and C. Stănescu, 'Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks', *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 485–492, Jan. 2017.
- [102]. M. Asprou, E. Kyriakides, Mihaela Albu, 2012, The Effect of Parameter and Measurement Uncertainties on Hybrid State Estimation, *Proc. of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Diego, CA, U.S.A., 22-26 July 2012, pp. 1-8.
- [103]. M. Di Somma, G. Graditi and P. Siano, "Optimal Bidding Strategy for a DER Aggregator in the Day-Ahead Market in the Presence of Demand Flexibility," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1509-1519, Feb. 2019.
- [104]. M. Dong; P. C. M. Meira, et. al., "Non-Intrusive Signature Extraction for Major Residential Loads," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1421 - 1430, Sept. 2013.
- [105]. M. H. J. Bollen and I. Y. H. Guo, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. New York: Wiley, 2006, p. 314.
- [106]. M. Pau et al., 'Design and Accuracy Analysis of Multilevel State Estimation Based on Smart Metering Infrastructure', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 11, pp. 4300–4312, Nov. 2019.
- [107]. M. Sanduleac, L. Pons, G. Fiorentino, R. Pop and M. Albu, "The unbundled smart meter concept in a synchro-SCADA framework," 2016 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Taipei, Taiwan, 2016, pp. 1-5.
- [108]. M. Sânduleac, I. Ciornei, L. Toma, **R. Plamanescu**, A. -M. Dumitrescu and M. M. Albu, "High Reporting Rate Smart Metering Data for Enhanced Grid Monitoring and Services for Energy Communities," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 6, pp. 4039-4048, June 2022.
- [109]. M. Stewart et al., "Integrated multi-scale data analytics and machine learning for the distribution grid," 2017 *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Dresden, 2017, pp. 423-429.
- [110]. M. V. Chilukuri and P. K. Dash, "Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 323–330, Feb. 2004.
- [111]. Mahmud, et. al., 'The Impact of Prediction Errors in the Domestic Peak Power Demand Management', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4567–4579, Jul. 2020.
- [112]. Markos Asprou, Ana-Maria Dumitrescu, Elias Kyriakides, Mihaela Albu, 2016, The Impact of PMU Measurement Delays and a Heterogenous Communication Network on a Linear State Estimator, *Proc. of the 18th Mediterranean Electrotechnical Conference – MELECON 2016*, Limassol, 18-20 April 2016

- [113]. N. E. Huang, Z. Shen and S. R. Long, "A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 31, p. 417–457, 1999.
- [114]. N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 454, pp. 903–995, 1998.
- [115]. N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.
- [116]. N. Uribe-Pérez, L. Hernández, et al., 'State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids', *Applied Sciences*, vol. 6, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2016.
- [117]. Nechifor, Mihaela Albu, R. Hair, V. Terzija, 2015, A flexible platform for synchronized measurements, data aggregation and information retrieval, *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Vol. 120, March 2015, Page(s): 20-31.
- [118]. Network Code on Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators, ENTSO-E, Brussels, Belgium, NC RfG/2016, Jul. 2016
- [119]. NOBEL GRID project, "D3.4 smart meters architecture and data model analysis v2," 2017. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5af5403d3&appId=PPGMS>
- [120]. NOBEL GRID Project, "D4.1 specification of the unbundled smart meter concept based on commercially existing smart meters," 2015. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a5d135e9&appId=PPGMS>
- [121]. NREL, *Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin*, May 2020.
- [122]. Oppenheim, R. Schafer, and J. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1999.
- [123]. ORDIN nr. 69 din 15.04.2020, ANRE - Romanian National Regulatory Authority
- [124]. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Cutsem and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, pp. 1387–1401, May 2004.
- [125]. P. Li, L. Fei, J. Qian, J. Chen and X. Li, "Based on the improved HHT and its application in the power quality detection of microgrid," in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, 2011.
- [126]. P. Li, L. Fei, P. Xi, J. Jie and J. Zhang, "HHT based on the LS-SVM and its application in the voltage flicker and harmonic detection of microgrid," in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, Shandong, 2011.
- [127]. P. Li, W. Li, C. Liu, X. Xiao and C. Guo, "The new method of harmonic detection in microgrid electric vehicle charging stations based on the improved HHT," in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Auckland, 2012.
- [128]. Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D. et al. (2005) Distributed generation: definition, benefits and issues. *Int. J. Energy Policy*, 33 (6), 787–798.
- [129]. PeScas Lopes, J.A., Hatziargyriou, N., Mutale, J. et al. (2007) Integrated distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Elsevier Electr. Pow. Syst. Res.*, 77 (9).
- [130]. **Plamanescu, R.**, Dumitrescu, A.-M., Albu, M., Suryanarayanan, S. Monitoring LV Prosumers Operation Using Hil-bert—Huang Method. In *Proceedings of the 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Torino, Italy, 1–4 September 2020, pp. 1–6.

- [131]. Planas, A. Gil-de-Muro, J. Andreu, I. Kortabarria, and I. Martínez de Alegría, “General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 147-159, Jan. 2013.
- [132]. R. Deng, Z. Yang, et al., ‘A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches’, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 570–582, Jun. 2015.
- [133]. R. Godina, E. M. G. Rodrigues, et al., ‘Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges’, *Energies*, vol. 8, no. 10, Oct. 2019.
- [134]. R. Messina, V. Vittal, D. Ruiz-Vega and G. Enriquez-Harper, "Interpretation and visualization of wide area PMU measurements using Hilbert analysis," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 4, p. 1760–1771, 2006.
- [135]. R. Tomasi et al., "Fostering innovation cooperative energy storage systems: The Storage4Grid project," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2017, pp. 1-6.
- [136]. Rachel Golden and Bentham Paulos – Curtailment of Renewable Energy in California and Beyond, *The Electricity Journal*, 2015, {<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619015001372>}
- [137]. Raphaël Rinaldi, Ilaria Losa, Michel De Nigris, Ricardo Prata, Mihaela Albu, et al., 2019, ETIP-SNET Vision 2050 – Integrating Smart Networks For The Energy Transition, *CIREC 2019 - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2019, paper 175.
- [138]. Raspberry Pi 3 Model B, de tip computer single-board având placa de rețea și conectivitate bluetooth. [Online] disponibil <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [139]. Riaz, Shariq and Marzooghi, Hesamoddin and Verbič, Gregor and Chapman, Archie C. and Hill, David J. – Generic Demand Model Considering the Impact of Prosumers for Future Grid Scenario Analysis, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019.
- [140]. Rick Kuffel and Paul Forsyth and Cyprian Peters, The Role and Importance of Real Time Digital Simulation in the Development and Testing of Power System Control and Protection Equipment, *IFAC-PapersOnLine*, IFAC Workshop on Control of Transmission and Distribution Smart Grids CTDSG 2016.
- [141]. Rilling, G., Flandrin, P.; Goncalves, P. On empirical decomposition and its algorithms. In *Proceedings of the IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process*, Grado, Italy, 1 January 2003.
- [142]. Ruiz-Cortés, Mercedes and González-Romera, Eva and Amaral-Lopes, Rui and Romero-Cadaval, Enrique and Martins, João and Milanés-Montero, María Isabel and Barrero-González, Fermín – Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019.
- [143]. Ruiz-Cortés, Mercedes and González-Romera, Eva and Amaral-Lopes, Rui and Romero-Cadaval, Enrique and Martins, João and Milanés-Montero, María Isabel and Barrero-González, Fermín – Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019.
- [144]. S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, “Power quality assessment via wavelet transform,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 2, pp. 924–930, Apr. 1996.
- [145]. S.I. Vagropoulos, A.G. Bakirtzis, “Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets”, *IEEE Trans. Power Syst.* 28 (2013) 4031–4041.
- [146]. Sanduleac, G. Lipari, et al, 'Next Generation Real-Time Smart Meters for ICT Based Assessment of Grid Data Inconsistencies', *Energies*, vol. 10(7), pp. 857-, June. 2017.
- [147]. Sanduleac, Mihai and Albu, Mihaela and Toma, Lucian and Martins, João and Pronto, Anabela Gonçalves and Delgado-Gomes, Vasco – Hybrid AC and DC smart home resilient architecture

- Transforming prosumers in UniRCons, 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC).
- [148]. Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Hofmann, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1996, 11, 924–930.
- [149]. Seneviratne C, Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation - a literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016.
- [150]. Senroy, N., Suryanarayanan, S., Ribeiro, P.F. An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality. *IEEE Trans. Power Syst.* 2007, 22, 1843–1850.
- [151]. Shengqing, L., Huanyue, Z., Wenxiang, X., Weizhou, L. A Harmonic Current Forecasting Method for Microgrid HAPF Based on the EMD-SVR Theory. In *Proceedings of the 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Hong Kong, 16–18 January 2013.
- [152]. Sidorov et al., ‘A Dynamic Analysis of Energy Storage With Renewable and Diesel Generation Using Volterra Equations’, *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 16, pp. 3451–3459, May 2020.
- [153]. Soni N, Doolla S, Chandorkar MC. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia. *IEEE Trans Power Deliv* 2013.
- [154]. Stockwell, R.G.; Mansinha, L.; Lowe, R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 1996, 44, 998–1001.
- [155]. T. Logenthiran, et.al., “Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator,” *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 925-933, 2012.
- [156]. Terzija, G. Valverde, D. Cai, P. Regulski, V. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. M Begovic, A. Phadke, “Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks”, *Proc. of the IEEE*, Vol. 99(1), 2011, pp. 80-93.
- [157]. Testa, A.; Gallo, D.; Langella, R. On the Processing of Harmonics and Interharmonics: Using Hanning Window in Standard Framework. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004, 19, 28–34.
- [158]. Tielens P, Van Hertem D, Hertem D Van. The relevance of inertia in power systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;55:999–1009.
- [159]. TyphoonHIL, About Real-time simulation in Typhoon HIL, url = "<https://www.typhoon-hil.com>", accessed: 01.09.2021
- [160]. W. Galli, G. T. Heydt, and P. F. Ribeiro, “Exploring the power of wavelet analysis,” *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 9, no. 4, pp. 37–41, Oct. 1996.
- [161]. W. Luan, J. Peng, et. al., "Smart Meter Data Analytics for Distribution Network Connectivity Verification," in *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1964-1971, July 2015.
- [162]. Wang, Q. Chen, et al., ‘Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges’, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3125–3148, May 2019.
- [163]. Working Group C6, CIGRE – Active distribution systems and distributed energy resources – technical brochure, “hybrid systems for off-grid power supply Reference 826, March 2021
- [164]. Y. Wang, X. Zeng and J. Hu, "HHT energy spectrum based identification method for lightning fault," in *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Beijing, 2011.
- [165]. Y. Yang, W. Li, et al., ‘Bayesian Deep Learning-Based Probabilistic Load Forecasting in Smart Grids’, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4703–4713, Jul. 2020.
- [166]. Y. Zhu, et al. "Matrix Profile XI: SCRIMP++: Time Series Motif Discovery at Interactive Speeds," *ICDM 2018*
- [167]. Yuan, Yuxuan, Wang, Zhaoyu – Mining Smart Meter Data to Enhance Distribution Grid Observability for Behind-the-Meter Load Control: Significantly improving system situational awareness and providing valuable insights, *IEEE Electrification Magazine*, 2021.

- [168]. Zhang, Y.; Su, N.; Li, Z.; Gou, Z.; Chen, Q.; Zhang, Y. Assessment of arterial distension based on continuous wave Doppler ultrasound with an improved Hilbert-Huang processing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2009, *57*, 203–213.