UNIVERSITATEA NAŢIONALĂ DE ŞTIINŢĂ ŞI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREŞTI

ŞCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMAT EXTINS
TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții privind reutilizarea bateriilor vehiculelor electrice

Doctorand:

Ing. Violeta Georgiana DELIU (DOGARU)

Conducător ştiinţific:

Prof.Univ.Dr.-Ing.Habil. Valentin NĂVRĂPESCU

BUCUREŞTI
2025

Cuprins

1. Introducere 5
1.1. Prezentarea temei de doctorat 6
1.2. Scopul tezei de doctorat 6
1.3. Conţinutul tezei de doctorat 7
2. Baterii utilizate în aplicațiile auto 8
2.1. Noțiuni generale 8
2.2. Tipuri de baterii utilizate în vehiculele electrice 8
2.3. Durata de viață a bateriilor vehiculelor electrice. Praguri de înlocuire 8
2.4. Concluzii 9
3. Valoarea potențială a bateriilor second-life 10
3.1. Reciclarea bateriilor vehiculelor electrice 10
3.2. Reutilizarea bateriilor vehiculelor electrice 10
3.3. Concluzii 10
4. Sisteme fotovoltaice 11
4.1. Tipuri de sisteme fotovoltaice 11
4.2. Îmbunătățirea sistemelor fotovoltaice 11
4.3. Dezvoltarea sistemelor fotovoltaice on-grid pe piața rezidențială și comercială din România 11
4.4. Evoluția numărului de prosumatori din România 12
4.5. Sistemele fotovoltaice on-grid – provocare pentru rețeaua națională de joasă tensiune 12
5. Prezentarea sistemului fotovoltaic actual 13
5.1. Caracteristici tehnice generale 13
5.2. Schema electrică a sistemului existent 14
6. Prezentare baterie second-life utilizată 16
6.1. Caracteristici tehnice generale 16
6.2. Analiza procesului de achiziție a unui pachet de 19 module din bateria Hyundai Kona Electric 64 kWh 17
7. Extinderea și optimizarea sistemului fotovoltaic: integrarea unei configurații AC-coupled 19
7.1. Componentele nou adăugate și rolul acestora 19
7.2. Principiul de funcționare al configurației AC-coupled 20
7.3. Alegerea BMS-ului și optimizarea pachetului de baterii LG Chem 15s3p 23

7.3.1. Identificare BMS 23
7.3.2. Determinarea parametrilor optimi de încărcare/ descărcare și analiza datelor obținute 24
8. Determinarea gradului de uzură al bateriei second-life înainte și după integrarea în sistemul fotovoltaic 26
8.1. Principii generale privind evaluarea performanței electrice a bateriei second-life 26
8.2. Prezentare echipamente laborator „Testare baterii” 26
8.3. Test de capacitate statică 27
8.3.1. Test de capacitate statică la achiziționarea celulelor 28
8.3.2. Test de capacitate statică după utilizare în sistemul fotovoltaic 31
8.3.3. Analiză și concluzii 33
8.4. Test de caracterizare a puterii impulsurilor hibride - HPPC 34
8.4.1. Test HPPC la achiziționarea celulelor 35
8.4.2. Test HPPC după utilizare în sistemul fotovoltaic 37
8.4.3. Analiză și concluzii 39
8.5. Test pentru determinarea impedanței interne - EIS 41
8.5.1. Test EIS la achiziționarea celulelor 41
8.5.2. Test EIS după utilizare celulelor în sistemul fotovoltaic 43
8.5.3. Analiză și concluzii 44
9. Modelarea și simularea alternativă a funcționării hibride a sistemului fotovoltaic rezidențial 45
9.1. Obiectivul simulării 45
9.2. Configurația sistemului modelat 45
9.3. Modelarea și simularea sistemului hibrid în Matlab/ Simulink 46
9.4. Interpretarea rezultatelor simulării 47
9.5. Concluzii 48
10. Analiza comparativă a performanței sistemului fotovoltaic cu și fără stocare de energie: impact energetic și economic 49
10.1. Impact energetic 49
10.1.1. Analiza energetică a sistemului fotovoltaic în configurație on-grid (configurație de bază) 49
10.1.2. Analiza energetică a sistemului fotovoltaic în configurație hibridă (cu integrarea stocării de energie) 50
10.1.3. Analiză comparativă 50
10.2. Impact economic 52
10.2.1. Analiza economică a sistemului fotovoltaic în configurație on-grid (configurație de bază) 52

10.2.2. Analiza economică a sistemului fotovoltaic în configurație hibridă (cu integrarea stocării de energie) 53
10.3. Amortizarea investiției 55
10.3.1. Amortizarea investiției pentru sistemul fotovoltaic on-grid 55
10.3.2. Amortizarea investiției pentru sistemul fotovoltaic hibridizat 55
10.4. Concluzii 56
11. Concluzii 57
11.1. Rezultate obţinute 58
11.2. Contribuţii originale 60
11.3. Perspective de dezvoltare ulterioară 61

Capitolul 1

Introducere

Creșterea accelerată a pieței vehiculelor electrice reprezintă una dintre cele mai vizibile schimbări tehnologice ale ultimului deceniu, determinată de progresele în tehnologia bateriilor, de reglementările referitoare la limitarea emisiilor de gaze cu efect de seră și la diminuarea costurilor de producție. Această tendință are însă ca efect secundar acumularea unui volum tot mai mare de baterii care își încheie ciclul de viață în aplicațiile de mobilitate electrică. În general, după o perioadă de aproximativ 6 – 8 ani de funcționare, bateriile utilizate pentru propulsia vehiculelor nu mai respectă cerințele stricte privind densitatea energetică, puterea de descărcare și autonomia, fiind considerate neadecvate pentru aplicații auto, chiar dacă păstrează o capacitate funcțională semnificativă.

În acest context, bateriile scoase din uz, denumite convențional „second-life", reprezintă o categorie de resurse electrochimice care, deși nu mai satisfac specificațiile originale de performanță, pot fi reintroduse în circuitul economic prin reconfigurare și reutilizare în aplicații staționare mai puțin solicitante. În special, atunci când capacitatea acestora scade sub pragul de 70 – 80% din valoarea nominală inițială, performanțele nu mai corespund standardelor impuse de aplicațiile de tracțiune electrică, dar pot fi valorificate eficient în aplicații staționare, unde cerințele de densitate energetică și putere sunt considerabil mai reduse, contribuind astfel la reducerea deșeurilor, la creșterea eficienței utilizării resurselor și la susținerea unor sisteme energetice sustenabile.

Reciclarea acestor baterii rămâne în prezent o operațiune dificilă, complexă și costisitoare. În plus, la nivel global, capacitatea actuală de reciclare este insuficientă pentru a procesa volumele preconizate. Acest context creează premisele pentru dezvoltarea unor strategii alternative, iar posibilitățile de valorificare a bateriilor *second-life* sunt diverse, incluzând sisteme de back-up pentru infrastructuri critice, echipamente industriale, rețele de telecomunicații și, cu o relevanță tot mai mare, unități de stocare a energiei regenerabile. În acest din urmă domeniu, integrarea bateriilor în sisteme fotovoltaice prezintă avantaje semnificative: stocarea surplusului de energie produsă în perioadele de iradianță ridicată, disponibilizarea acesteia în momentele de consum crescut sau producție redusă și creșterea gradului de autoconsum.

În paralel, adoptarea sistemelor fotovoltaice cunoaște o creștere accelerată, atât în mediul rezidențial, cât și în cel comercial. Sistemele fotovoltaice on-grid, care constituie în prezent cea mai răspândită configurație rezidențială, sunt caracterizate prin conectarea directă la rețeaua electrică. Deși această arhitectură permite vânzarea surplusului de energie către operator, creșterea masivă a numărului de astfel de sisteme poate conduce la efecte nedorite asupra rețelei: supratensiuni locale, variații de frecvență și restricții impuse de operatori în perioadele de supraproducție. În aceste condiții, integrarea bateriilor *second-life* în configurații hibride (on-grid + stocare) reprezintă nu doar o soluție pentru optimizarea consumului local, ci și un mijloc de reducere a impactului negativ asupra rețelei electrice.

1.1. Prezentarea temei de doctorat

Prezenta teză de doctorat tratează în mod aprofundat o temă de actualitate, aflată la intersecția a două domenii de cercetare strategice: tranziția către surse regenerabile de energie și reutilizarea sustenabilă a tehnologiilor provenite din industria vehiculelor electrice. Concret, lucrarea analizează integrarea bateriilor second-life, recuperate din automobile electrice, într-un sistem fotovoltaic on-grid, propunând un model aplicativ și o evaluare detaliată a performanței în condiții reale de utilizare.

Prin abordarea sa aplicativă și interdisciplinară, teza aduce o contribuție relevantă la dezvoltarea cunoștințelor privind extinderea ciclului de viață al bateriilor, integrarea eficientă a surselor regenerabile în rețelele electrice și consolidarea sustenabilității în domeniul energetic.

Prin această lucrare se urmărește nu doar o demonstrație practică de integrare, ci și o contribuție la înțelegerea rolului pe care bateriile second-life îl pot juca în tranziția energetică durabilă, în special în contextul unei rețele electrice tot mai orientate spre surse regenerabile și prosumatori.

1.2. Scopul tezei de doctorat

Scopul acestui studiu îl reprezintă evaluarea potențialului de reutilizare a bateriilor *second-life* provenite din vehicule electrice în aplicații de actualitate precum unități de stocare a energiei pentru sisteme fotovoltaice rezidențiale. Integrarea acestor baterii este analizată în contextul problemelor asociate funcționării sistemelor fotovoltaice on-grid asupra rețelei electrice, precum apariția supratensiunilor locale, restricțiile privind injectarea energiei și pierderea unei părți din producția fotovoltaică în perioadele de consum redus.

Soluția investigată constă în hibridizarea sistemelor fotovoltaice existente prin adăugarea unei unități de stocare realizate din baterii *second-life*, configurată pentru a asigura compatibilitatea electrică și funcțională cu echipamentele deja instalate. Această abordare are ca scop creșterea gradului de autoconsum, reducerea dependenței de rețeaua publică și utilizarea eficientă a energiei produse local.

Analiza urmărește investigarea efectelor integrării bateriilor asupra indicatorilor energetici și economici ai sistemului, cu accent pe independența energetică, eficiența globală și rentabilitatea investiției. În paralel, este evaluat comportamentul electrochimic al bateriilor în aplicații staționare, luând în considerare avantajele și limitările practice ale soluției propuse.

Pe fondul tranziției energetice către surse regenerabile, care necesită metode eficiente de echilibrare a rețelelor electrice, și al creșterii continue a volumului de baterii scoase din uz din vehicule electrice, această cercetare își propune:

- să investigheze caracteristicile tehnice, performanțele și gradul de uzură al bateriilor second-life într-un ciclu de viață extins;
- să demonstreze fezabilitatea tehnică și economică a integrării acestora într-un sistem fotovoltaic funcțional de tip AC-coupled;
- să ofere o bază științifică solidă pentru valorificarea bateriilor second-life în aplicații staționare de stocare a energiei la nivel rezidențial sau comercial.

1.3. Conţinutul tezei de doctorat

Lucrarea de față analizează integrarea practică a unui pachet de baterii second-life provenite dintr-un vehicul electric (Hyundai Kona Electric 64 kWh) într-un sistem fotovoltaic on-grid existent, urmărind să evalueze fezabilitatea tehnică, performanța, uzura și impactul asupra rețelei. În prima parte, sunt prezentate fundamentele tehnologice ale bateriilor utilizate în aplicațiile auto, urmate de analiza potențialului bateriilor second-life, inclusiv dificultăți, inițiative industriale și proiecte de cercetare.

Ulterior, sunt detaliate tipurile de sisteme fotovoltaice, cu accent pe evoluția sistemelor on-grid în România, fiind evidențiate oportunitățile de dezvoltare și limitele actuale ale rețelei de joasă tensiune. În capitolele următoare, sunt prezentate detaliile sistemului fotovoltaic utilizat ca platformă de testare, precum și caracteristicile pachetului de baterii second-life selectat, provenit dintr-un vehicul Hyundai Kona Electric.

Partea aplicativă a lucrării vizează configurarea unei soluții AC-coupled pentru integrarea bateriei second-life, urmată de o evaluare experimentală detaliată a gradului de uzură al acesteia – înainte și după integrare – prin intermediul testelor standardizate: test de capacitate statică, caracterizarea puterii impulsurilor hibride și spectroscopie de impedanță electrochimică.

În continuare este descris un proces de modelare și simulare a funcționării hibride a sistemului fotovoltaic, propus ca variantă alternativă la soluțiile convenționale de hibridizare. Astfel, este evidențiată fezabilitatea extinderii unui sistem fotovoltaic rezidențial existent prin integrarea unei surse secundare de energie, sub forma unui acumulator, într-o arhitectură de tip DC-coupled, fără a fi necesară modificarea invertorului on-grid deja instalat.

În capitolul următor este prezentată o evaluare comparativă a performanței sistemului fotovoltaic în configurația inițială și după integrarea unui sistem de stocare a energiei, demonstrând astfel, pe baza datelor obținute, avantajele, limitările și potențialul tehnico-economic al hibridizării prin implementarea unei soluții de stocare locală.

Capitolul de concluzii sintetizează principalele rezultate și contribuții ale cercetării, evidențiind modul în care obiectivele stabilite au fost atinse și impactul soluțiilor propuse asupra domeniului studiat. În prima parte sunt prezentate rezultatele obținute, cu accent pe relevanța acestora în raport cu problematica abordată și pe validarea ipotezelor formulate. Ulterior, sunt prezentate contribuțiile originale ale autorului, subliniind elementele de noutate metodologică, tehnică și aplicativă.

O secțiune distinctă este dedicată enumerării lucrărilor publicate în cadrul și în conexiune cu tema cercetării, reflectând diseminarea rezultatelor către comunitatea științifică. În final, sunt discutate direcțiile viitoare de dezvoltare, având în vedere atât aprofundarea aspectelor investigate, cât și extinderea aplicabilității soluțiilor propuse în contexte practice și scenarii tehnologice în evoluție.

Capitolul 2

Baterii utilizate în aplicațiile auto

2.1. Noțiuni generale

Inițial utilizate strict pentru alimentarea sistemelor electrice auxiliare ale autovehiculelor convenționale cu motor cu ardere internă, bateriile au evoluat semnificativ atât din perspectivă tehnologică, cât și din perspectivă funcțională. În condițiile actuale, acestea constituie elemente centrale în arhitectura vehiculelor hibride și electrice, unde asigură sursa principală de energie pentru propulsie. Creșterea cererii pentru transport sustenabil a accelerat inovația, orientată spre baterii cu densitate energetică ridicată, durabilitate și siguranță sporită. În prezent, alegerea tehnologiilor de stocare este influențată atât de performanțele tehnice, cât și de costuri, reciclabilitate și impactul asupra mediului.

2.2. Tipuri de baterii utilizate în vehiculele electrice

Diversitatea aplicațiilor auto a condus la dezvoltarea unor tipuri avansate de baterii, capabile să răspundă cerințelor privind densitatea energetică, durabilitatea, siguranța și eficiența economică. Evoluția tehnologiilor electrochimice a debutat cu bateriile pe bază de nichel, dintre care Ni-Cd și Ni-MH sunt încă utilizate în aplicații actuale, fiind apreciate pentru robustețe și durată de viață extinsă, dar limitate de impactul asupra mediului și densitatea energetică redusă [1], [2], [3]. Progresul major a fost reprezentat de introducerea bateriilor pe bază de litiu, în special Li-ion și Li-polimer, care oferă densități energetice superioare, performanțe ridicate și întreținere minimă, fiind în prezent tehnologia dominantă în vehiculele electrice [4]. Diversele chimii Li-ion (LCO, LMO, NMC, NCA, LFP, LTO) permit un compromis variat între autonomie, siguranță, cost și durată de viață [5], [6], [7], în timp ce bateriile Li-polimer adaugă avantajul flexibilității constructive. În paralel, bateriile Li-aer se conturează ca o soluție promițătoare pentru viitor, datorită densității energetice potențial superioare, dar rămân în fază experimentală [8]. Integrarea acestor tehnologii este susținută de sisteme avansate de management termic, care optimizează performanța și siguranța în condiții variate de exploatare. Astfel, tranziția de la bateriile cu nichel la cele pe bază de litiu reflectă o evoluție continuă spre tehnologii mai eficiente, sigure și sustenabile, capabile să susțină adoptarea pe scară largă a mobilității electrice.

2.3. Durata de viață a bateriilor vehiculelor electrice. Praguri de înlocuire

Bateriile vehiculelor electrice constituie componente esențiale, influențând direct autonomia, performanța și costurile de exploatare ale unui vehicul electric. Cercetările arată

că, odată cu scăderea capacității sub pragul de 70–80% din valoarea inițială, fiabilitatea scade semnificativ, iar degradarea se manifestă atât prin reducerea capacității, cât și prin creșterea rezistenței interne [9], [10], ceea ce limitează eficiența energetică. Sub acest prag, bateriile devin mai sensibile la variații de curent și temperatură, necesitând cicluri suplimentare de încărcare și pierzând din eficiența energetică, ceea ce justifică înlocuirea lor în aplicații auto. Politicile producătorilor confirmă această limită prin garanții ce stabilesc praguri minime de 70–75% din capacitatea inițială și un număr maxim de kilometri parcurși.

În Tabelul 2.1 sunt sintetizate pragurile de înlocuire a bateriilor stabilite de principalii producători de vehicule electrice:

Tabelul 2.1 Praguri de înlocuire a bateriilor vehiculelor electrice

Nr. crt.	Producător	Model EV	Prag de capacitate garantat	Garanție baterie
1.	Tesla	S, X, Cybertruck	Sub 70% capacitate	8ani/ 160000km [11]
2.	Nissan	Leaf	Sub 75% capacitate	8ani/ 160000km [12]
3.	BMW	i3, i4, iX	Sub 70% capacitate	5ani/ 200000km [13]
4.	Volkswagen	ID.3, ID.4	Sub 70% capacitate	8ani/ 160000km [14]
5.	Hyundai	Kona Electric	Sub 70% capacitate	8ani/ 160000km [15]
6.	Kia	EV6	Sub 70% capacitate	7ani/ 150000km [16]
7.	Rivian	R1T, R1S	Sub 70% capacitate	8ani/ 200000km [17]

În aceste condiții, reorientarea acumulatorilor degradați către aplicații second-life, în special sisteme de stocare staționară a energiei regenerabile, reprezintă o opțiune sustenabilă, adaptată la cerințe mai puțin solicitante decât cele din domeniul auto.

2.4. Concluzii

Analiza tipurilor de baterii utilizate la vehiculele electrice evidențiază un domeniu în continuă dezvoltare, influențat de cerințe tehnice, economice și de mediu. În prezent, bateriile litiu-ion se află în poziție dominantă, oferind un compromis favorabil între densitate energetică, durată de viață și integrare în arhitecturile vehiculelor, dar sunt limitate de sensibilitatea la temperaturi extreme, procesele de degradare chimică și costurile materiilor prime. Alte tehnologii, precum Ni-MH sau bateriile experimentale Li-aer, conturează soluții alternative pentru cerințe specifice, însă nu oferă încă o aplicabilitate universală. Alegerea tipului de baterie este condiționată de autonomie, condițiile de exploatare, costuri și infrastructura de încărcare, ceea ce conduce la soluții bazate pe compromisuri funcționale. Direcțiile viitoare de cercetare se concentrează pe îmbunătățirea siguranței, extinderea duratei de viață și reducerea impactului asupra mediului, fără a compromite performanța funcțională a sistemelor energetice integrate în vehiculele electrice.

Capitolul 3

Valoarea potențială a bateriilor second-life

3.1. Reciclarea bateriilor vehiculelor electrice

Creșterea accelerată a numărului de vehicule electrice la nivel global amplifică cererea pentru baterii, ceea ce impune soluții sustenabile pentru gestionarea acestora la sfârșitul vieții utile. Cele mai eficiente opțiuni sunt reutilizarea și reciclarea, considerate procese complementare în cadrul economiei circulare. Reciclarea se concentrează pe recuperarea metalelor valoroase (cobalt, nichel, litiu) prin tehnologii hidrometalurgice și pirometalurgice [18], [19], [20], fiecare având avantaje și limitări în raport cu costurile, consumul energetic și impactul asupra mediului [21]. Astfel, reutilizarea urmată de reciclare apare ca strategie optimă pentru extinderea ciclului de viață al bateriilor și reducerea impactului asupra mediului.

3.2. Reutilizarea bateriilor vehiculelor electrice

După scăderea capacității sub pragul optim pentru performanțele vehiculului electric, bateriile devin ineficiente pentru mobilitate, dar rămân adecvate pentru utilizări staționare, sisteme de back-up sau aplicații de echilibrare a rețelei. Datorită densității energetice ridicate și ciclabilității superioare, tehnologiile NMC, LFP și NCA sunt cel mai frecvent utilizate. Integrarea în aplicații *second-life* presupune însă provocări legate de degradarea electrochimică, variațiile între module și cerințele de siguranță [22], dar acestea pot fi abordate prin sisteme avansate de management al bateriilor și metode precise de evaluare a stării de sănătate (SOH) [23], [24]. Astfel, bateriile second-life se conturează ca soluții viabile și sustenabile pentru stocarea energiei regenerabile și pentru creșterea flexibilității rețelelor electrice [25], [26].

3.3. Concluzii

Atunci când este posibil, reutilizarea întregului acumulator, fără demontare, reprezintă soluția preferată; în caz contrar, modulele și celulele pot fi testate și reconfigurate în noi pachete. Procesul de colectare, sortare și testare este esențial, dar ridică provocări tehnice și de siguranță, amplificate de diversitatea constructivă a pachetelor existente pe piață.

Acest cadru general subliniază potențialul aplicațiilor second-life și pregătește terenul pentru studii de caz specifice, în care acumulatorii reutilizați sunt integrați în sisteme precum cele fotovoltaice, rețele electrice locale sau aplicații staționare personalizate.

Capitolul 4

Sisteme fotovoltaice

4.1. Tipuri de sisteme fotovoltaice

Cele mai utilizate tipuri de celule solare sunt cele din siliciu monocristalin și policristalin, datorită echilibrului dintre eficiență, costuri și durabilitate. Acestea se regăsesc într-o varietate de sisteme fotovoltaice, adaptate diverselor aplicații și condiții de funcționare.

Sistemele rezidențiale și comerciale sunt proiectate pentru a acoperi nevoile energetice ale locuințelor și clădirilor de dimensiuni mari, fie prin conectarea la rețea (on-grid), fie prin soluții autonome (off-grid). În zonele izolate, sunt utilizate sisteme hibride sau autonome, iar pentru creșterea eficienței, unele instalații folosesc mecanisme de urmărire a soarelui sau sunt implementate sub formă flotantă, pe suprafețe acvatice. La scară extinsă, parcurile fotovoltaice acoperă suprafețe mari și sunt conectate direct la rețelele electrice, în timp ce sistemele portabile și cele integrate în infrastructură oferă soluții flexibile pentru aplicații mobile sau pentru reducerea amprentei de carbon în proiecte urbane. Alegerea unei configurații optime depinde de contextul tehnic, economic și de obiectivele energetice urmărite, fiecare categorie având atât avantaje, cât și limitări specifice.

4.2. Îmbunătățirea sistemelor fotovoltaice

Îmbunătățirea sistemelor fotovoltaice reprezintă un domeniu de cercetare și dezvoltare continuă, cu accent pe optimizarea performanței, reducerea costurilor și extinderea posibilităților de integrare. Printre inovațiile majore se regăsesc: evoluția celulelor fotovoltaice, tehnologiile pe film subțire care oferă aplicabilitate extinsă sau celulele tandem, capabile să atingă randamente superioare prin utilizarea mai multor straturi de absorbție.

Un alt domeniu cheie îl constituie dezvoltarea invertoarelor [27], unde progresele recente includ integrarea inteligenței artificiale și controlului fuzzy pentru optimizarea conversiei și gestionarea puterii reactive [28], [29]. Inovațiile în tehnologia invertoarelor, precum și adoptarea micro-invertoarelor și a sistemelor autonome de micro-rețea [30], contribuie la reducerea distorsiunilor armonice, la creșterea stabilității și la extinderea utilizării energiei fotovoltaice în zone fără infrastructură energetică.

4.3. Dezvoltarea sistemelor fotovoltaice on-grid pe piața rezidențială și comercială din România

În contextul actualei tranziții energetice, marcată de necesitatea reducerii dependenței de resurse fosile și de promovarea surselor regenerabile, sistemele fotovoltaice conectate la rețea (on-grid) s-au impus ca soluție predominantă. Alegerea acestora este susținută de mai

mulți factori: stabilitatea financiară conferită de o producție de energie previzibilă și independentă de volatilitatea pieței; sprijinul guvernamental și internațional prin politici de stimulare și facilități fiscale; posibilitatea valorificării surplusului de energie injectat în rețea, cu impact pozitiv asupra amortizării investiției; integrarea relativ facilă în infrastructura existentă; reducerea emisiilor de carbon și contribuția la protecția mediului; precum și avantajele la nivel comunitar prin crearea unei surse distribuite de energie. Totuși, adoptarea acestor sisteme depinde de cerințele specifice ale utilizatorilor și de particularitățile locale ale rețelei electrice.

4.4. Evoluția numărului de prosumatori din România

Conceptul de prosumator, rezultat din asocierea termenilor „producător” și „consumator”, desemnează o entitate capabilă să producă, să consume, să stocheze și să comercializeze energie din surse regenerabile [31]. În România, primul prosumator a fost conectat la rețeaua națională în anul 2012 [32], iar dezvoltarea ulterioară a fost sprijinită prin adaptări legislative și prin programe de finanțare precum *Casa Verde Fotovoltaice* și *Electric UP*. Evoluția cadrului normativ, corelată cu obiectivele europene prevăzute de Directiva (UE) 2018/2001 (RED II) [33], a determinat o creștere accelerată a numărului de prosumatori și a puterii instalate, în special după anul 2020. Datele raportate de ANRE indică o extindere rapidă a acestei comunități, de la câteva sute de prosumatori la începutul anului 2020 la peste 40000 la sfârșitul anului 2022 [34], consolidând astfel tranziția către un model energetic descentralizat. În lipsa unor soluții de stocare implementate la scară largă, tendința rămâne concentrată pe valorificarea energiei solare fotovoltaice, cu perspective de continuare a creșterii odată cu implementarea programelor de sprijin din anii următori.

4.5. Sistemele fotovoltaice on-grid – provocare pentru rețeaua națională de joasă tensiune

Implementarea sistemelor fotovoltaice generează beneficii considerabile [35], însă, odată cu creșterea gradului de integrare, apar provocări tehnice care influențează atât calitatea energiei, cât și siguranța rețelelor de distribuție. Printre acestea se numără apariția fluxului invers de putere, fluctuațiile de tensiune cauzate de caracterul intermitent al producției solare, dezechilibrele între faze în cazul invertoarelor monofazate și distorsiunile armonice induse de electronica de putere. Aceste fenomene pot conduce la supraîncărcări, nerespectarea standardelor de calitate a energiei [36] și la funcționarea defectuoasă a echipamentelor de protecție.

Posibile soluții includ modernizarea infrastructurii prin integrarea sistemelor de stocare, implementarea unor tehnologii avansate de monitorizare și control, adoptarea unor echipamente performante și respectarea normativelor privind calitatea energiei. În ansamblu, tranziția spre un grad ridicat de integrare a sistemelor fotovoltaice necesită o abordare echilibrată între beneficiile de sustenabilitate și provocările tehnice asociate.

Capitolul 5

Prezentarea sistemului fotovoltaic actual

5.1. Caracteristici tehnice generale

Sistemul fotovoltaic analizat este configurat ca un sistem on-grid, conectat la rețeaua electrică și dependent de aceasta pentru gestionarea fluxului energetic. Acesta este compus din panouri fotovoltaice, un invertor on-grid, un sistem de monitorizare și protecții adecvate pentru siguranța și funcționarea optimă a echipamentelor.

Generarea energiei electrice este realizată de un ansamblu de 12 panouri fotovoltaice Sharp NU-JD540W. Cu ajutorul aplicației *Solar.creator* [37] pusă la dispoziția utilizatorilor Fronius, acestea au fost organizate în două stringuri, unul format din 9 module, iar celălalt din 3 module (Figura 5.1). Panourile sunt conectate la tabloul DC utilizând conductori de 4 mm², dimensiune aleasă pentru a păstra aceeași secțiune conform specificației producătorului, iar ramele acestora sunt legate la priza de pământ.

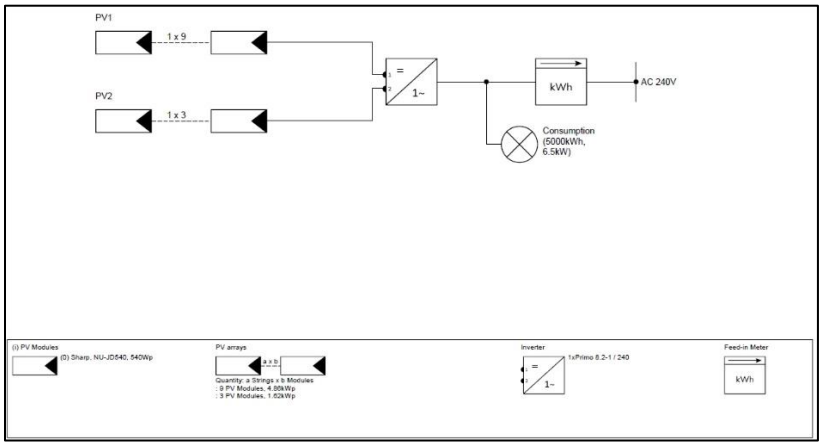


Figura 5.1 Schema conexiuni panouri fotovoltaice conform site-ului de specialitate

Sistemul fotovoltaic a fost dimensionat pentru a asigura compatibilitatea optimă cu invertorul monofazat Fronius Primo 8.2-1, cu o putere nominală de 8,2 kW și o eficiență maximă de 98,1%. Configurația include două stringuri: unul format din 9 panouri Sharp NU-JD540W (V_{mpp} = 374,76V, I_{mpp} = 12,97A, V_{oc} = 453,06V) și un al doilea de 3 panouri (V_{mpp} = 124,92V, I_{mpp} = 12,97A, V_{oc} = 151,02V), însumând 6,48kWp. Parametrii stringurilor se încadrează în plaja de lucru a celor două trackere MPPT ale invertorului (80 – 800V, max. 1000V DC), optimizați prin tehnologia Dynamic Peak Manager. Configurația este completată de 6 panouri de rezervă pentru extindere sau înlocuire. Monitorizarea fluxurilor energetice este realizată cu Fronius Smart Meter TS 100A-1, contor bidirecțional conectat prin Modbus RTU/RS485 la invertor și la sistemul Fronius Datamanager 2.0. Acesta asigură transmiterea și analiza datelor în timp real prin platforma Solar.web, cu conectivitate WLAN, Ethernet și USB.

5.2. Schema electrică a sistemului existent

Pagina de nomenclator (Figura 5.2) din schema electrică oferă o listă detaliată a componentelor utilizate în sistemul fotovoltaic, incluzând dispozitivele de protecție, cablurile de conexiune, siguranțele și echipamentele principale. Această secțiune ajută la înțelegerea configurației sistemului și la diagnosticarea sau întreținerea acestuia.

Printre componentele principale regăsite în nomenclator se numără:

- tabloul electric AC (Figura 5.3) și DC (Figura 5.4), care distribuie energia și asigură protecția circuitelor;
- invertorul Fronius Primo 8.2-1;
- Fronius Smart Meter TS 100A-1, utilizat pentru monitorizarea fluxului energetic;
- descărcătoarele de supratensiune pentru protecția echipamentelor împotriva fluctuațiilor de tensiune;
- siguranțele diferențiale și automate, care previn suprasarcinile și scurtcircuitele;
- cablurile de conexiune, cu specificații precise pentru curent continuu și alternativ.

Elemente electrice

Nr. Crt.	Descriere	Cod schema	Cantitate (buc/ metri)
1	FDCP -> Firida de distribuție, contorizare și protecție	SE-4 RED 0.4 kV	N/A
2	Bară de egalizare potențial pentru exterior	PEN	1
3	Bloc masura si protectie monofazat	BMPM 50A	1
4	Contor electric dublu sens	C 01	1
5	Siguranta cu protectie diferentiala 50A	ID 50A	1
6	Cablu alimentare tablou AC	Cablu CYABY	1
7	Tablou electric AC	Tablou AC	1
8	Contor inteligent Fronius TS 100A-1	C 02	1
9	Descarcator supratensiune 275V AC	D AC1	1
10	Siguranta cu protectie diferentiala 40A	F 0 40A	1
11	Siguranta priza 16A	F 1 16A	1
12	Siguranta priza 16A	F 2 16A	1
13	Siguranta lumina 10A	F 3 10A	1
14	Siguranta lumina 10A	F 4 10A	1
15	Siguranta cu protectie diferentiala 40A	F 5 40A	1
16	Cablu alimentare Invertor Fronius	Cablu1 CYABY	1
17	Invertor Fronius 8.2-1 monofazat	I01	1
18	Conductor monofilar DC rosu 4mmp	N/A	1
19	Conductor monofilar DC negru 4mmp	N/A	1
20	Serie 9 panouri X 540W Sharp NU-JD540W	String 1	1
21	Serie 3 panouri X 540W Sharp NU-JD540W	String 2	1
22	Soclu conductor + fuzibil 20A	F1 01	1
23	Soclu conductor + fuzibil 20A	F1 02	1
24	Tablou electric DC	Tablou DC	1
25	Separator 0-1	Q1 01	1
26	Separator 0-1	Q1 02	1
27	Separator bipolar + 2Xfuzibil 15A	F2 01	1
28	Separator bipolar + 2Xfuzibil 15A	F2 02	1
29	Descarcator supratensiune 500V DC	D DC1	1
30	Descarcator supratensiune 500V DC	D DC2	1

Date 23-03-2025 | Ed. DANI2 | Appr. | SISTEM FOTOVOLTAIC ON-GRID | INGINERIE ELECTRICA | NOMENCLATOR | Page 5 | Page 5/5

Figura 5.2 Nomenclator elemente electrice



Figura 5.3 Tablou electric AC



Figura 5.4 Tablou electric DC și invertor Fronius Primo 8.2-1

Sistemul electric este organizat în două circuite principale: circuitul de curent continuu (DC) și circuitul de curent alternativ (AC). Acestea asigură fluxul de energie de la panourile solare către consumatorii finali și rețeaua electrică. Circuitul DC (Figura 5.5) este compus din două stringuri de panouri fotovoltaice, conectate la tabloul DC prin conductori de 4mm². Acesta include descărcătoare de supratensiune de 500V DC, instalate pentru protejarea echipamentelor împotriva variațiilor bruște de tensiune. Energia generată de panouri este transmisă către invertorul Fronius Primo 8.2-1, unde are loc conversia în curent alternativ.

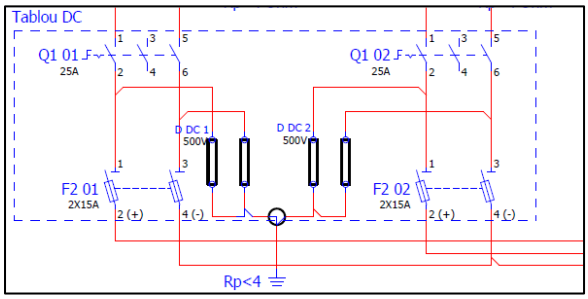


Figura 5.5 Componentele electrice din tabloul DC

Circuitul AC include invertorul, tabloul AC (Figura 5.6) și sistemul de monitorizare. Invertorul Fronius Primo 8.2-1, alături de elementul de protecție "*F 5*", transformă curentul continuu în curent alternativ și gestionează fluxul energetic către consumatori și rețeaua electrică. Energia este distribuită prin tabloul AC echipat cu siguranțe diferențiale și descărcătoare de supratensiune de 275V AC.

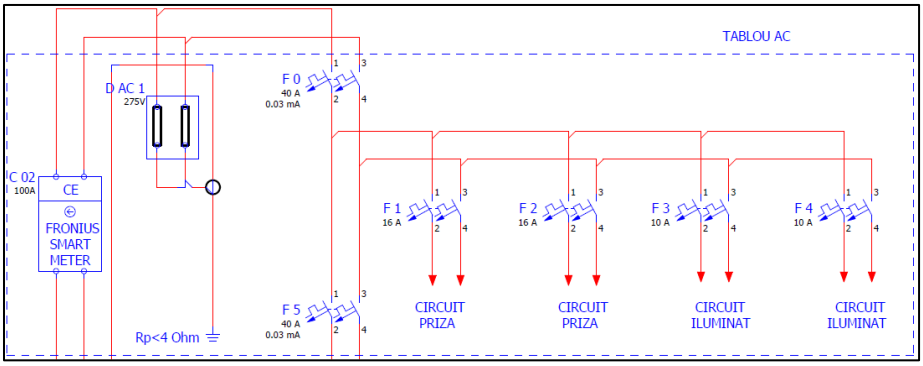


Figura 5.6 Componentele electrice din tabloul AC

Fronius Smart Meter TS 100A-1 monitorizează consumul și energia injectată în rețea, optimizând gestionarea resurselor energetice prin intermediul platformei Fronius Solar.web.

Capitolul 6

Prezentare baterie second-life utilizată

6.1. Caracteristici tehnice generale

Bateria instalată pe Hyundai Kona Electric (2019–2021) reprezintă un element esențial al arhitecturii vehiculului, fiind optimizată pentru densitate energetică și performanțe operaționale ridicate. Cu o capacitate nominală de 64 kWh, aceasta asigură o autonomie certificată WLTP de până la 449 km, poziționând modelul ca un concurent notabil în segmentul vehiculelor electrice.

Bateria este de tip Li-ion și utilizează celule fabricate de LG Chem, aranjate într-o configurație modulară de 98s3p. Structura modulară oferă posibilitatea adaptării și creșterii capacității sistemului în funcție de cerințele aplicației, facilitând în același timp operațiile de întreținere și reducând complexitatea intervențiilor. Este organizată într-o structură modulară complexă, compusă din două tipuri de pachete (Figura 6.1):

- trei pachete de 20 de module fiecare: acestea furnizează o tensiune nominală de 72V fiecare (20 × 3,6V).
- două pachete de 19 module fiecare: acestea furnizează o tensiune nominală de 68,4V fiecare (19 × 3,6V).



Figura 6.1 Vedere ansamblu baterie autovehicul Hyundai Kona 64 kwh

Cele cinci pachete sunt conectate în serie pentru a obține tensiunea nominală totală a bateriei de aproximativ 352,8V. Această organizare modulară permite o utilizare optimă a spațiului din șasiul vehiculului și simplifică întreținerea sau înlocuirea componentelor defecte. Integrarea pachetelor se face într-un ansamblu compact, proiectat să optimizeze disiparea

termică și să asigure siguranța mecanică. BMS-ul monitorizează parametrii operaționali ai fiecărei componente, inclusiv tensiunea, curentul și temperatura, prevenind dezechilibrele și maximizând durabilitatea ciclurilor de încărcare-descărcare.

6.2. Analiza procesului de achiziție a unui pachet de 19 module din bateria Hyundai Kona Electric 64 kWh

În cadrul acestui studiu, un pachet de 19 module, parte integrantă a bateriei originale Hyundai Kona Electric 64kWh, a fost achiziționat de la un furnizor de componente reutilizabile pentru vehicule electrice. Alegerea acestui ansamblu a avut drept scop integrarea în aplicații de stocare a energiei evaluarea detaliată a stării celulelor, având în vedere uzura acumulată în timpul exploatării anterioare a vehiculului.

Fiecare modul, alcătuit din trei celule Li-ion conectate în paralel, are o capacitate nominală de 175,2Ah (58,4Ah x 3), respectând arhitectura originală 98s3p a bateriei (Figura 6.2).



Figura 6.2 Celula Lg Chem

Toate componentele utilizate în asamblarea pachetului de acumulatori (Figura 6.3) sunt inscripționate cu marcaje standardizate care indică anul de fabricație 2019. Aceste inscripționări conțin informații despre lotul de producție, linia de fabricație și data exactă a realizării fiecărei componente. Această constatare este în concordanță cu utilizarea inițială a bateriei într-un vehicul Hyundai Kona Electric produs între 2019 și 2021.



Figura 6.3 Vedere pachet 19 module

Marcajele sunt prezente atât pe module individuale cât și pe elementele mecanice și electrice ale pachetului, inclusiv cablajele și materialele izolatoare. Analiza acestor inscripționări a evidențiat uniformitatea componentelor, sugerând că întregul pachet provine din aceeași linie de producție, fără înlocuiri ulterioare. Aceasta este o caracteristică importantă pentru evaluarea fiabilității sistemului, deoarece garantează că toate componentele au fost fabricate și testate conform acelorași standarde.

Pentru a evalua comportamentul electrochimic al celulelor în starea inițială și după utilizare în sistemul fotovoltaic, este necesară selectarea unui eșantion reprezentativ din pachetul configurat, format din 15 module (45 celule). Selectarea celulelor se realizată pe baza unei metodologii conforme cu standardul ISO 2859-1 – *Sampling procedures for inspection by attributes* [38], care oferă un cadru pentru eșantionarea loturilor în scopul inspecției și testării.

Lotul de 45 de celule disponibile este organizat sub forma a 15 module individuale, fiecare conținând 3 celule în paralel, denumite convențional cu literele A, B și C (Figura 6.4).

În vederea asigurării unei dispersii reprezentative și a evitării concentrării selecției într-o zonă limitată a pachetului, a fost adoptată o strategie de selecție, cu păstrarea unui interval regulat de 9 celule între alegeri succesive. Astfel, au fost selectate pentru analiză următoarele celule: 1A, 4B, 7C, 11A, 14B. Această alegere a urmărit respectarea distanțării în cadrul lotului și o variație internă a pozițiilor în module, selectând în mod echilibrat celule de tip A, B și C.

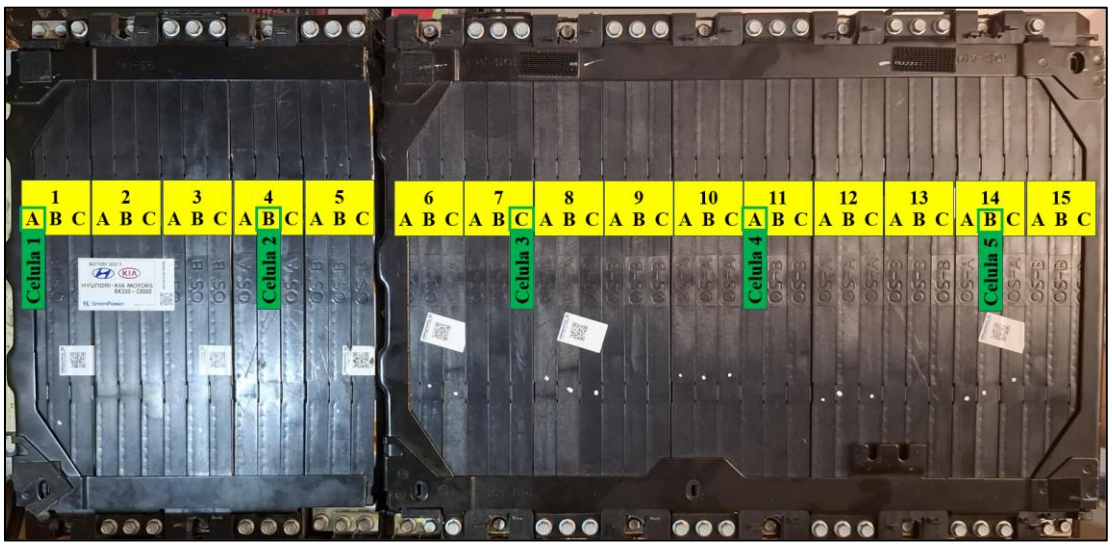


Figura 6.4 Schema de selecție a celor 5 celule

Prin această metodă de selecție s-a urmărit atât o distribuție uniformă a punctelor de prelevare în cadrul lotului, cât și o diversificare a poziționării interne a celulelor în module, cu scopul de a reduce influențele potențiale ale poziției fizice asupra rezultatelor experimentale, precum variațiile locale de temperatură sau rezistențele de contact.

Configurarea acestor 15 module în serie a condus la un sistem cu următoarele caracteristici: tensiune nominală – 54V, capacitate totală – 175,2Ah și energie totală disponibilă – aproximativ 9,46 kWh. Aceste caracteristici fac ca sistemul să fie optim pentru aplicații de stocare staționare, oferind suficientă energie pentru a alimenta sarcini electrice în perioadele de consum ridicat sau în lipsa generării fotovoltaice. Alegerea celor 15 module a fost bazată pe evaluarea inițială a uniformității tensiunilor și capacităților, criterii esențiale pentru menținerea echilibrului și a performanțelor sistemului final.

Capitolul 7

Extinderea și optimizarea sistemului fotovoltaic: integrarea unei configurații AC-coupled

Sistemele fotovoltaice moderne necesită soluții flexibile pentru integrarea și gestionarea eficientă a energiei produse. Configurația inițială, bazată pe invertorul Fronius Primo 8.2-1, urmează să fie extinsă printr-o arhitectură AC-coupled, care include echipamente suplimentare pentru crearea unui microgrid. Această soluție permite o gestionare optimizată a consumului și o adaptabilitate mai mare la variațiile cererii de energie.

Prin integrarea invertorului Fronius Primo pe ieșirea Multiplus II, sistemul devine un microgrid, gestionat independent de rețeaua electrică principală. În această configurație, energia produsă de panouri este injectată în circuitul AC gestionat de Multiplus II. Consumul este acoperit din producția fotovoltaică sau, în lipsa acesteia, dintr-un sistem de stocare care urmează să fie selectat ulterior. Echipamentele de control permit ajustarea automată a distribuției energiei, optimizând utilizarea resurselor disponibile.

7.1. Componentele nou adăugate și rolul acestora

Performanța sistemului este consolidată de componente auxiliare (Figura 7.1): invertor/ încărcător de 10kVA *Victron MultiPlus-II 48/10000/140-100*, *Energy Meter ET112* pentru măsurarea fluxurilor de energie din rețea, *Victron Cerbo GX* pentru coordonarea echipamentelor, *Victron Smart Shunt 500A* pentru monitorizarea bateriei, *Victron Lynx Distributor* pentru distribuția sigură a curentului continuu, *interfața grafică GX Touch 50* pentru monitorizarea și configurarea parametrilor sistemului, precum și bateria Li-ion gestionată de BMS-ul *JK-PB2A16S-20P*. Datele obținute sunt centralizate și analizate prin platforma VRM, asigurând control, optimizare și mentenanță predictivă.

O funcție importantă a VRM Portal este accesul de la distanță la configurațiile echipamentelor. Utilizatorii pot modifica parametri ai invertorului, controlerului de încărcare sau ai altor dispozitive compatibile, fără a fi necesară o intervenție fizică asupra sistemului.

Interfața VRM Portal permite vizualizarea graficelor de consum, generare și stocare a energiei, utilizatorii având opțiunea de a selecta intervalele de timp pentru analiza datelor. De asemenea, portalul suportă integrarea cu sisteme externe și exportul datelor pentru analize avansate.

Astfel, configurația propusă oferă un model de microgrid hibrid, sigur și flexibil, capabil să răspundă cerințelor energetice moderne prin integrarea eficientă a producției fotovoltaice, stocării și distribuției inteligente.



Figura 7.1 Montajul componentelor adăugate pentru hibridizarea sistemului

7.2. Principiul de funcționare al configurației AC-coupled

Se bazează pe integrarea unui invertor fotovoltaic on-grid cu un invertor/ încărcător hibrid, utilizând o legătură comună în rețeaua de curent alternativ (AC) [39]. În această arhitectură, invertorul on-grid injectează energia produsă de panourile fotovoltaice în rețeaua AC locală, de unde este preluată și gestionată de invertorul hibrid, care asigură alimentarea consumatorilor și încărcarea bateriilor. Controlul fluxului energetic se realizează indirect, printr-un mecanism denumit „frequency shifting”, prin care invertorul Victron ajustează frecvența rețelei AC locale (de exemplu, de la 50Hz la 51–53Hz), determinând invertorul Fronius, configurat în mod micro-grid, să își reducă automat producția atunci când bateriile sunt aproape încărcate complet. Această interacțiune permite o optimizare dinamică a autoconsumului și previne supraproducția. Sistemul asigură, astfel, compatibilitate funcțională în ambele regimuri de funcționare (on-grid și off-grid) fără a necesita o comunicare directă între invertoare, utilizând exclusiv parametrii rețelei AC pentru sincronizare și control. Deoarece Multiplus II nu conține componenta de conversie a energiei DC în AC pe partea de panouri fotovoltaice, invertorul on-grid are două roluri în această arhitectură:

– convertește energia de la panourile fotovoltaice (DC) în energie AC sincronizată cu rețeaua (cu cea a distribuitorului de energie electrică sau cu rețeaua simulată de Victron în mod backup/ off-grid);

– conține și sistemul său propriu de Maximum Power Point Tracking (MPPT). Astfel, el gestionează curentul continuu provenit de la panouri, optimizând producția solară independent de Victron.

Integrarea invertorului Fronius Primo pe ieșirea Multiplus II în modul AC-coupled (Figura 7.2) permite crearea unui microgrid, unde gestionarea energiei se face local, independent de fluctuațiile din rețeaua electrică, inclusiv întreruperea energiei electrice. În această configurație, energia generată de panourile fotovoltaice este injectată în circuitul AC.

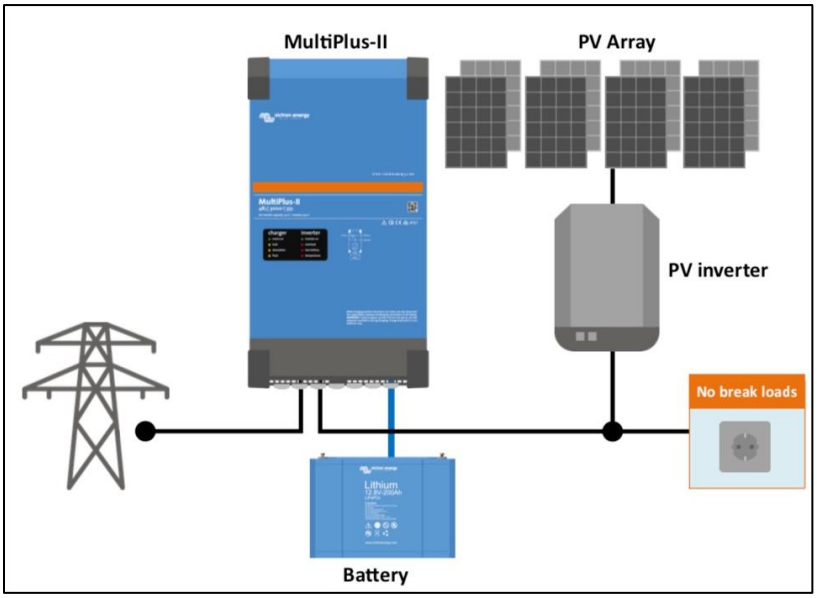


Figura 7.2 Schema conexiunii AC conform [40]

În schema electrică a sistemului fotovoltaic hibrid, invertorul Multiplus II *I02* este introdus între rețeaua electrică și invertorul Fronius *I01*. Față de schema electrică din configurația on-grid, elementele au fost separate în două pagini: SCHEMA HIBRID (A) (Figura 7.3) și SCHEMA HIBRID (B) (Figura 7.4).

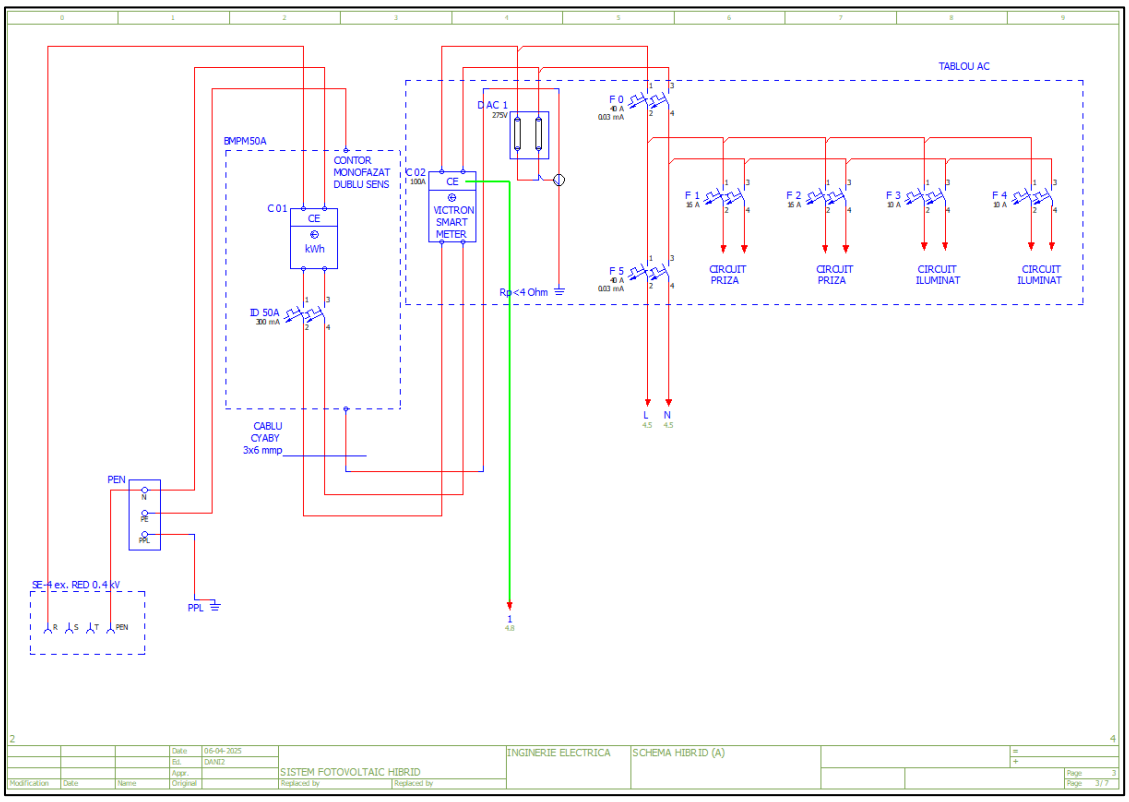


Figura 7.3 Schema hibrid (A)

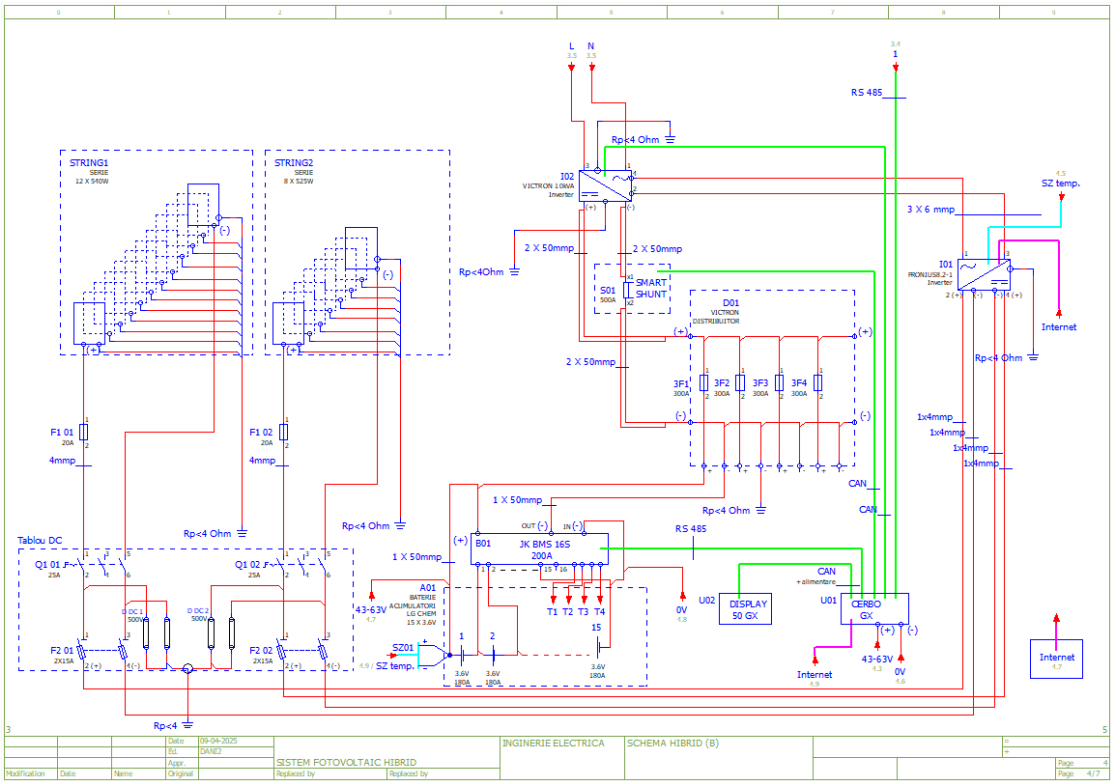


Figura 7.4 Schema hibrid (B)

Circuitele consumatorilor beneficiază de protecție prin intermediul întrerupătoarelor automate (*F01 ... F04*), iar în amonte de acestea sunt utilizate alte două întrerupătoare automate, *F0* și *F5*, pentru asigurarea protecției suplimentare către cele două surse de energie electrică.

Prin utilizarea Cerbo GX *U1*, a ecranului GX Touch *U2*, a elementului de monitorizare încărcare/ descărcare baterie *S01*, contorului de energie *C02* și a celorlalte componente de monitorizare integrate în invertoare, sistemul poate ajusta automat distribuția energiei, optimizând consumul și reducând dependența de rețea

Dacă în cazul sistemului fotovoltaic on-grid, modulul de conversie a energiei solare în energie de tip DC era reprezentat, pe lângă elementele de protecție, de două stringuri de 12 panouri fotovoltaice (*String 1* – 9 buc, *String 2* – 3 buc), în cazul celui hibrid sunt utilizate două stringuri configurate astfel:

– String 1 constituit din 12 panouri fotovoltaice Sharp NU-JD540W (Figura 7.5);
– String 2 constituit din 8 panouri fotovoltaice Longi LR5-66HTH-525M (Figura 7.6).



Figura 7.5 String 12 panouri Sharp NU-JD540W



Figura 7.6 String 8 panouri Longi LR5-66HTH-525M

În total, puterea totală a sistemului fotovoltaic este de 10,68kWp. Configurația implementată asigură control al tensiunii injectate în rețeaua de curent alternativ, contribuind la prevenirea apariției supratensiunilor în rețeaua locală și la menținerea stabilității parametrilor electrici în contextul variațiilor de sarcină și producție.

7.3. Alegerea BMS-ului și optimizarea pachetului de baterii LG Chem 15s3p

7.3.1. Identificare BMS

Pentru asigurarea funcționării sigure și eficiente a pachetului de baterii, a fost selectat sistemul de management JK PB2A16S20P produs de JIKONG Electronics, datorită compatibilității ridicate cu configurații de până la 16 celule în serie și funcțiilor avansate de protecție și monitorizare. Acesta supraveghează tensiunile și temperaturile celulelor, previne dezechilibrele în timpul ciclurilor de încărcare–descărcare și oferă protecții multiple împotriva supratensiunii, descărcării excesive, scurtcircuitului sau supraîncălzirii. Alegerea acestui BMS pentru ansamblul 15 celule este justificată de capacitatea sa de a gestiona curenți mari și de flexibilitatea oferită prin configurare și integrare. Integrarea BMS-ului împreună cu bateria de celule în schema electrică a sistemului fotovoltaic a fost realizată prin blocurile *A01* și *B01*.

Experimental, s-a urmărit conectarea firelor de echilibrare ale BMS-ului. Acestea se atașează la fiecare punct de conexiune dintre grupurile de celule, respectând numerotarea indicată: B0 va fi conectat la terminalul negativ al bateriei, B1 la prima conexiune serie, și așa mai departe, până la B15, care se leagă la terminalul pozitiv al ultimului grup. În final, au fost conectate și terminalele principale:

- terminalul negativ al bateriei (marcat *B*-) se conectează direct la BMS;
- terminalul *P*-, care iese din BMS, este cel care se va lega la invertorul hibrid;
- terminalul pozitiv al bateriei (marcat *B*+) se va conecta la același invertor, fără a trece prin BMS.

De asemenea, monitorizarea temperaturii se face cu ajutorul senzorilor T1 ... T4 ai BMS-ului împreună cu senzorul *SZ01* al invertorului hibrid conectat la terminalul *B*+ a bateriei. Figura 7.7 prezintă interconectarea dintre BMS și configurația bateriei de acumulatori 15s3p. Totodată, montajul secțiunii elementelor electrice adăugate este identificat in Figura 7.8.

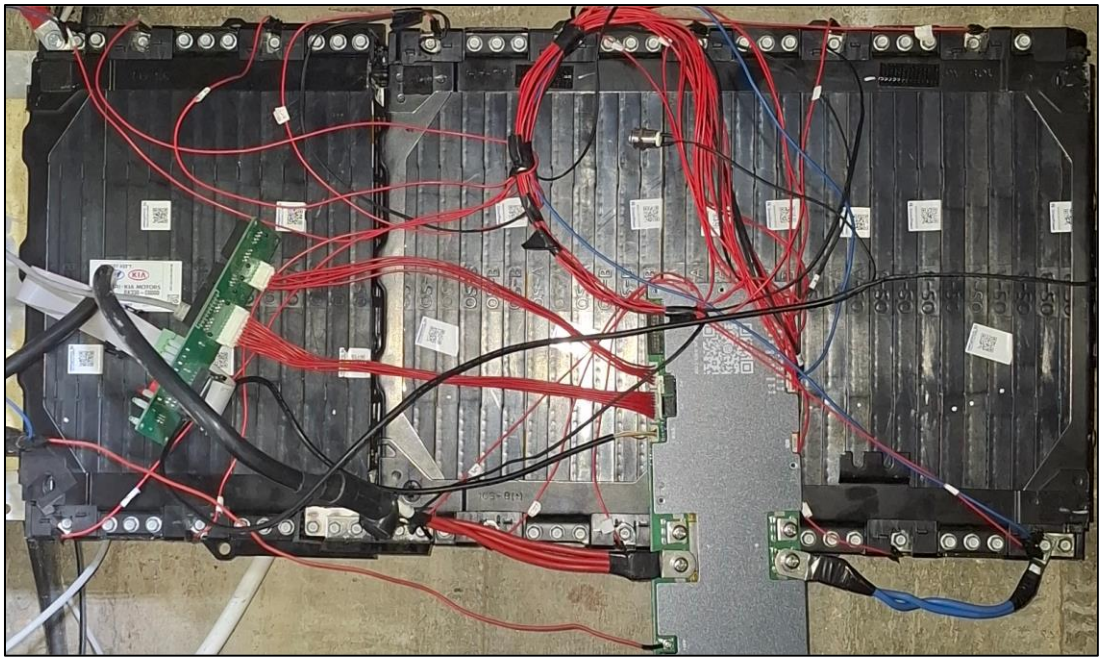


Figura 7.7 Interconectarea BMS - baterie



Figura 7.8 Montajul secțiunii elementelor electrice adiționale

7.3.2. Determinarea parametrilor optimi de încărcare/ descărcare și analiza datelor obținute

Testul static aplicat celulei LG Chem 58,4Ah are ca obiectiv determinarea pragurilor optime de încărcare și descărcare, utilizând echipamentul EBC-A40L și algoritmii standard CC-CV pentru încărcare și CC pentru descărcare. Procedura presupune cicluri controlate de curent constant, cu limite de tensiune stabilite la 4,2 pentru încărcare și 2,5V pentru descărcare, respectând metodologia *USABC Test Procedures Manual* (rev. 3.1, 2020).

Celula este supusă unui ciclu de pregătire preliminară destinat stabilizării electrochimice și eliminării influenței istoricului de utilizare. Acest ciclu constă în descărcarea completă a celulei până la tensiunea de 2,5V urmată de o pauză de o oră pentru stabilizarea electrochimică. Ulterior, celula este încărcată complet până la 4,2V cu un curent constant de

19,4A și o limitare a curentului absorbit în etapa CV la 2,9A. După atingerea tensiunii de 4,2V și finalizarea absorbției de curent, se aplică o nouă pauză de o oră, tot pentru atingerea echilibrului termic și electrochimic.

Rezultatele experimentale au arătat o suprapunere stabilă a curbelor de încărcare și descărcare, ceea ce confirmă reproductibilitatea testelor. Din datele înregistrate, se observă următoarele (Figura 7.9):

– după valoarea de 3,30V spre pragul minim de descărcare propus de producătorul celulei LG Chem (2,50V), curba devine foarte abruptă, ceea ce demonstrează un stres al bateriei în intervalul 2,50 – 3,30V;

– peste valoarea de 4,10V, către valoarea maximă de încărcare indicată de producător (4,20V), curba de încărcare încearcă o ascensiune mai pronunțată într-un interval de timp scurt, ceea ce dovedește un alt stres la care celula este supusă în timpul descărcării.

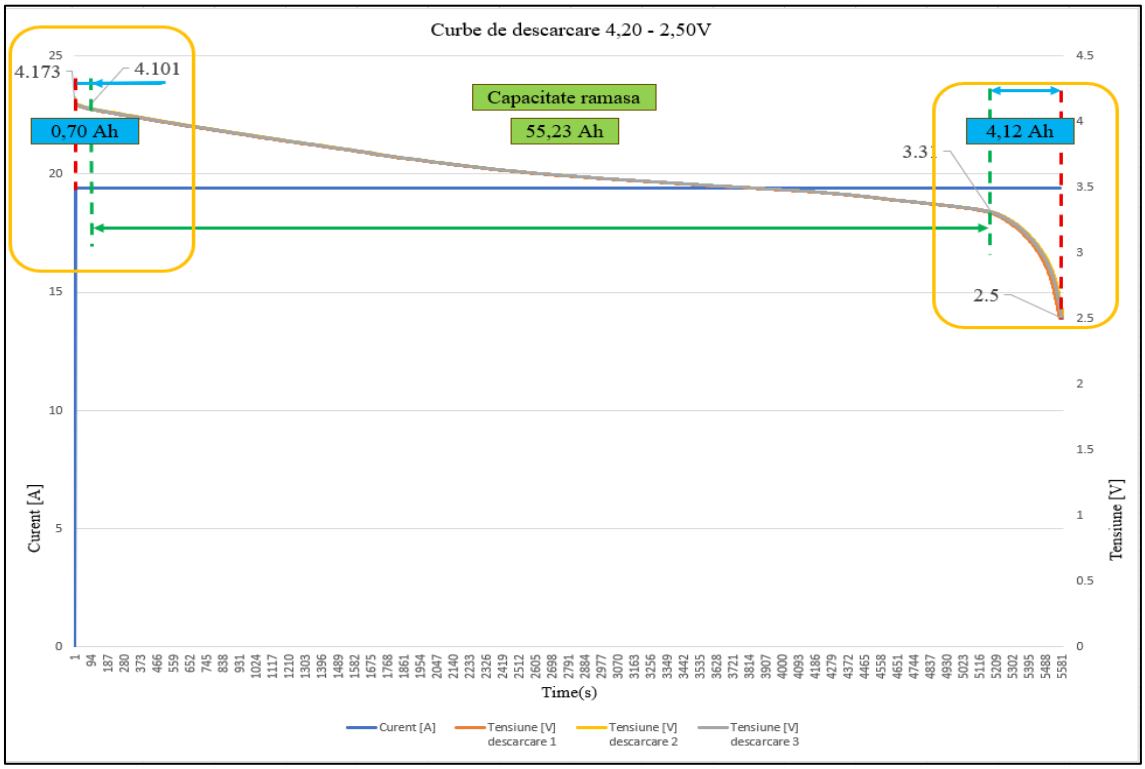


Figura 7.9 Calculul capacităților pentru praguri propuse

Tabelul 7.1 evidențiază valorile capacității calculate pe intervalele alese:

Tabelul 7.1 Valorile capacității pe intervalele de descărcare alese

Interval tensiune electrica [V]	2,50 - 4,20	2,50 - 3,30	3,30 - 4,10	4,10 - 4,20
Capacitate [Ah]	60,02	4,12	55,23	0,70

.

Prin urmare, utilizarea pragurilor 3,30V la descărcare și 4,10V la încărcare se recomandă în aplicații care pun accent pe durabilitatea celulelor în regimuri ciclice repetate, în special în contextul reutilizării acestora pentru stocarea energiei regenerabile. Se realizează astfel un compromis justificat între performanță și uzură, pierzând aproximativ 9,34Ah (15,7%) din capacitate, dar protejând semnificativ integritatea chimică a electrozilor.

Capitolul 8

Determinarea gradului de uzură al bateriei second-life înainte și după integrarea în sistemul fotovoltaic

8.1. Principii generale privind evaluarea performanței electrice a bateriei second-life

Evaluarea performanței electrice este necesară în cazul bateriilor second-life, deoarece acestea sunt destinate utilizărilor diferite față de aplicațiile inițiale. După utilizarea în vehicule electrice, bateriile pot fi reconfigurate pentru diferite aplicații, unde cerințele de putere și ciclicitate sunt mai puțin solicitante. Manualele de referință, precum USABC Test Procedures Manual [41], cuprind procedurile necesare evaluării performanțelor bateriilor, care se aplică pentru toate tipurile de baterii și din această cauză nu specifică aparatura necesară folosită în cadrul testelor, ci doar mărimile fizice care trebuie urmărite și înregistrate: tensiunea, curentul, puterea și temperatura. Cele mai frecvente metode de testare includ:

- test de capacitate statică
- test de caracterizare a puterii impulsurilor hibride (Hybrid Pulse Power Characterization - HPPC)
- test pentru determinarea impedanței interne (Spectroscopia de impedanță electrochimică – EIS)

8.2. Prezentare echipamente laborator „Testare baterii”

Laboratorul „Testare baterii” a fost realizat în cadrul Programului Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice, axa prioritară 2: Competitivitatea prin cercetare – dezvoltare și inovare, D2.2: Investiții în infrastructura de CDI și dezvoltarea capacității administrative, prin proiectul cu titlul “CENTRUL REGIONAL DE CERCETARE–DEZVOLTARE PENTRU MATERIALE, PROCESE și PRODUSE INOVATIVE DESTINATE INDUSTRIEI DE AUTOMOBILE (CRC&D-Auto)” 2015.

Pentru evaluarea performanței electrice a bateriei second-life utilizate, în cadrul laboratorului „Testare baterii” s-au utilizat următoarele echipamente:

- camera termică model MRC
- tester pentru baterii BK Precision BA6010
- impedanțmetru pentru baterii Hioki Battery Impedance Meter BT4560 1050Hz
- software de testare a încărcării si descărcării bateriei (Chroma Battery)
- sistem multifuncțional de testare EBC A40L

8.3. Test de capacitate statică

Din lotul selectat pentru integrarea în sistemul fotovoltaic, format din 15 module, fiecare alcătuit din câte 3 celule de același tip, au fost selectate 5 celule pentru evaluarea performanțelor bateriilor cu ajutorul testelor prezentate în secțiunea 8.1. Aceste teste au fost realizate atât la achiziționarea celulelor cât și după utilizarea acestora în sistemul fotovoltaic timp de 12 luni. Selecția a avut ca scop obținerea unui eșantion reprezentativ, adecvat pentru o analiză preliminară a comportamentului electrochimic în condiții controlate. Această alegere contribuie la obiectivitatea testării și permite evaluarea variațiilor de performanță între celulele provenite din același lot de fabricație.

Pentru realizarea acestui test a fost utilizat sistemul multifuncțional de testare EBC A40L împreună cu software-ul dedicat EB Tester Software (Figura 8.1).



Figura 8.1 Echipamente utilizate pentru realizarea testului de capacitate statică

- *Condiții de testare*

Testele experimentale au fost efectuate respectând următoarele condiții standardizate, în acord cu specificațiile producătorului:

- temperatura ambiantă: 25°C ± 2°C, asigurată de sistemul de climatizare local;
- încărcarea celulei a fost realizată conform algoritmului specificat de producător;
- după fiecare ciclu de încărcare/ descărcare a fost introdusă o perioadă de repaus de minim 60 de minute pentru stabilizarea termică și electrochimică a celulei;
- pe durata testelor au fost monitorizate continuu curentul, tensiunea și timpul prin intermediul sistemul de achiziție de date.

- *Procedura de testare*

Procedura de testare a fost precedată de un proces de pregătire a celulelor, constând într-un ciclu preliminar de stabilizare, realizat astfel:

- descărcare completă a celulei până la tensiunea de 2,50V;
- pauză de stabilizare de 60 de minute;
- încărcare completă a celulei până la tensiunea maximă de 4,20V;

– pauză de stabilizare de 60 de minute.

După etapa de pregatire, testul static propriu-zis s-a desfășurat pe durata a trei cicluri complete, fiecare compus dintr-o fază de descărcare urmată de o faza de încărcare, astfel:

– descărcarea s-a efectuat imediat după pauză, la un curent constant de 19,40A (corespunzător unui regim C/3 raportat la capacitatea nominală);

– descarcarea s-a efectuat până la atingerea tensiunii minime de 2,50V;

– după fiecare descărcare s-a realizat o pauză de 60 de minute pentru stabilizare termică și electrochimică;

– încărcarea celulei s-a realizat până la tensiunea maximă operațională de 4,20V;

– încărcarea s-a realizat cu un regim de curent constant de 19,40A urmat de tensiune constanta (CC-CV), respectand profilul de încărcare specific;

– procesul a fost repetat de trei ori și rezultatele comparate pentru verificarea stabilității.

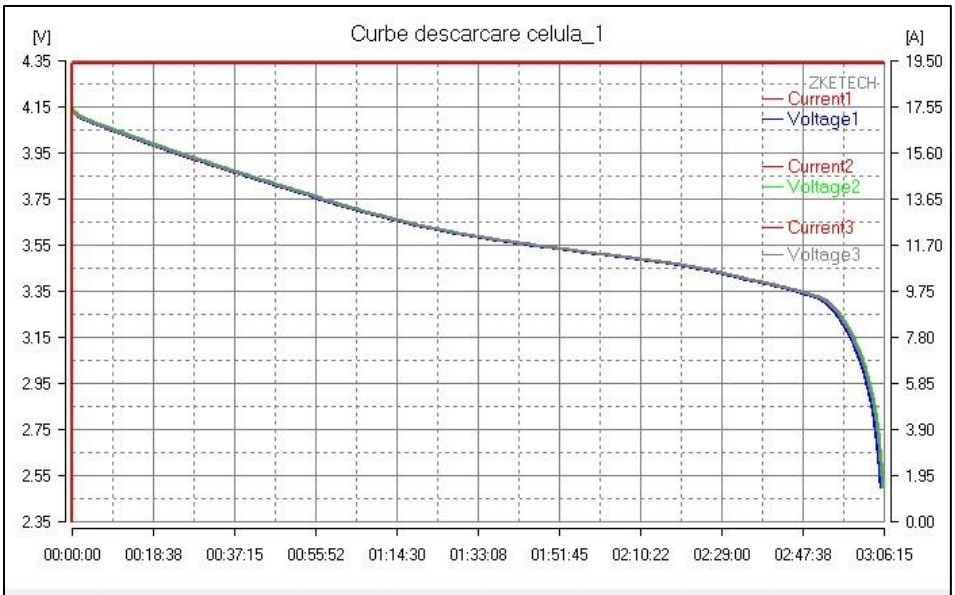
➢ *Analiza și interpretarea rezultatelor*

Valorile capacității obținute în urma fiecărui ciclu de test au fost extrase din curbele de descărcare pentru fiecare celulă.

8.3.1. Test de capacitate statică la achiziționarea celulelor

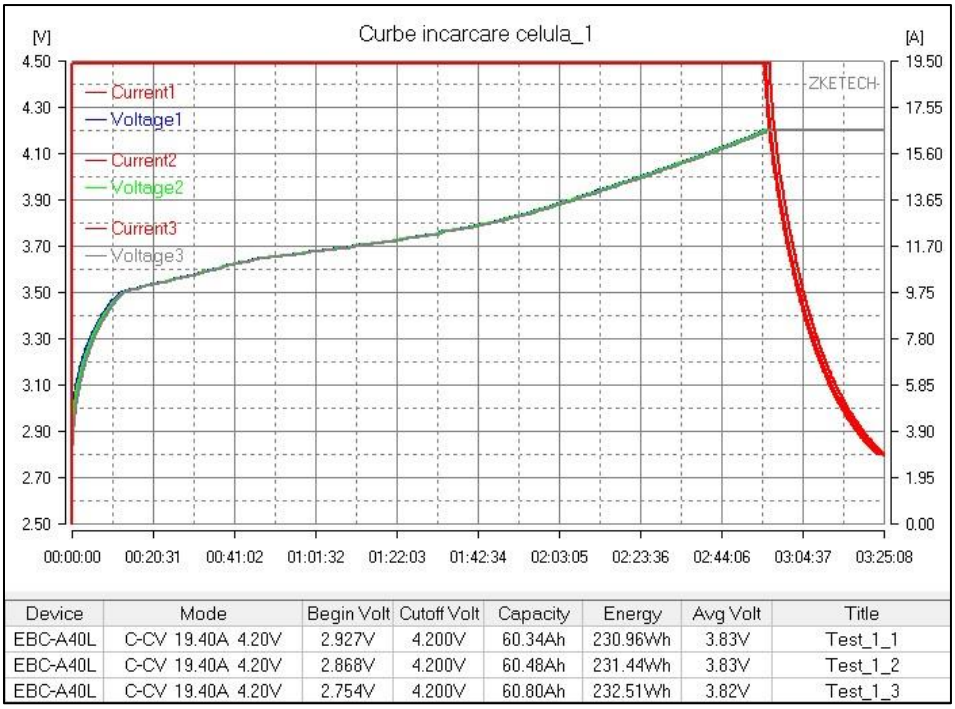
S-au obținut câte trei curbe de descărcare și trei curbe de încărcare pentru fiecare dintre cele cinci celule selectate, în urma testelor realizate la momentul achiziției, înainte de integrarea în sistemul fotovoltaic:

– Celula 1 – curbe descărcare (Figura 8.2) și curbe încărcare (Figura 8.3)



Device	Mode	Begin Volt	Cutoff Volt	Capacity	Energy	Avg Volt	Title
EBC-A40L	D-CC 19.40A 2.50V	4.173V	2.500V	60.00Ah	217.01Wh	3.62V	Test_1_1
EBC-A40L	D-CC 19.40A 2.50V	4.177V	2.500V	60.23Ah	218.01Wh	3.62V	Test_1_2
EBC-A40L	D-CC 19.40A 2.50V	4.173V	2.500V	60.14Ah	217.65Wh	3.62V	Test_1_3

Figura 8.2 Curbe descărcare celula 1



Device	Mode	Begin Volt	Cutoff Volt	Capacity	Energy	Avg Volt	Title
EBC-A40L	C-CV 19.40A 4.20V	2.927V	4.200V	60.34Ah	230.96Wh	3.83V	Test_1_1
EBC-A40L	C-CV 19.40A 4.20V	2.868V	4.200V	60.48Ah	231.44Wh	3.83V	Test_1_2
EBC-A40L	C-CV 19.40A 4.20V	2.754V	4.200V	60.80Ah	232.51Wh	3.82V	Test_1_3

Figura 8.3 Curbe încărcare celula 1

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 60,12Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 58,92Ah – 61,32Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului (Tabelul 8.1).

Tabelul 8.1 Celula 1 – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	60,00	-0,12	0,20%
2	60,23	+0,11	0,18%
3	60,14	+0,02	0,03%

– Celula 2 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.2:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 59,99Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 58,79Ah – 61,19Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.2 Celula 2 – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	59,72	-0,27	0,45%
2	60,05	+0,06	0,10%
3	60,20	+0,21	0,35%

– Celula 3 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.3:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 60,11Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 58,91Ah – 61,31Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.3 Celula 3 – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	59,95	-0,16	0,27%
2	60,06	-0,05	0,08%
3	60,33	+0,22	0,37%

– Celula 4 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.4:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 59,64Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 58,45Ah – 60,83Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.4 Celula 4 – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	59,67	+0,03	0,05%
2	59,65	+0,01	0,01%
3	59,60	-0,04	0,06%

– Celula 5 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.5:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 59,88Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 58,68Ah – 61,08Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.5 Celula 5 – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	59,76	-0,12	0,20%
2	59,85	-0,03	0,05%
3	60,02	+0,14	0,23%

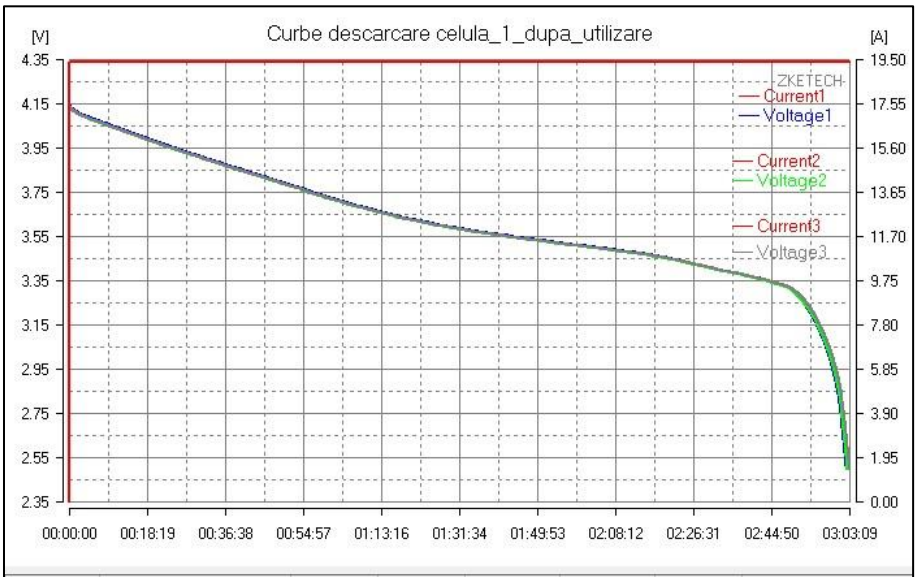
Rezultatele obținute în urma testelor de capacitate statică pentru cele cinci celule analizate indică stabilitatea electrochimică a acestora și o uniformitate a procesului de încărcare-descărcare. Valorile capacității descărcate se încadrează în intervalul de validare de ±2% față de media aritmetică, cu abateri maxime relative de 0,20% – 0,45%. De asemenea, capacitatea încărcată a fost constant mai mare decât cea descărcată, fapt explicabil prin

pierderile inerente din procesele electrochimice și rezistive. Având în vedere uniformitatea valorilor și abaterea redusă față de medie, testele pot fi considerate valide, iar datele obținute pot fi utilizate ca valori de referință în evaluarea ulterioară a performanței celulelor.

8.3.2. Test de capacitate statică după utilizare în sistemul fotovoltaic

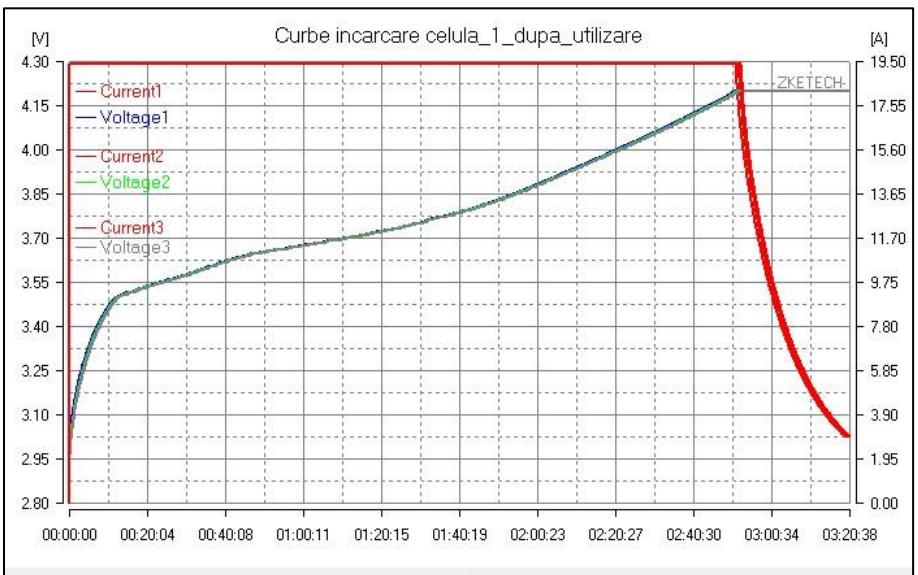
După 12 luni de funcționare în cadrul sistemului fotovoltaic, aceleași cinci celule au fost supuse testului de capacitate statică, obținându-se următoarele curbe:

– Celula 1 – curbe descărcare (Figura 8.4) și curbe încărcare (Figura 8.5)



Device	Mode	Begin Volt	Cutoff Volt	Capacity	Energy	Avg Volt	Title
EBC-A40L	D-CC 19.40A 2.50V	4.177V	2.500V	58.99Ah	213.61Wh	3.62V	Test_1_1
EBC-A40L	D-CC 19.40A 2.50V	4.174V	2.500V	59.06Ah	213.60Wh	3.62V	Test_1_2
EBC-A40L	D-CC 19.40A 2.50V	4.174V	2.499V	59.22Ah	214.25Wh	3.62V	Test_1_3

Figura 8.4 Curbe descărcare celula 1 după utilizare



Device	Mode	Begin Volt	Cutoff Volt	Capacity	Energy	Avg Volt	Title
EBC-A40L	C-CV 19.40A 4.20V	2.962V	4.200V	59.16Ah	226.50Wh	3.83V	Test_1_1
EBC-A40L	C-CV 19.40A 4.20V	2.919V	4.200V	59.38Ah	227.23Wh	3.83V	Test_1_2
EBC-A40L	C-CV 19.40A 4.20V	2.898V	4.200V	59.53Ah	227.69Wh	3.82V	Test_1_3

Figura 8.5 Curbe încărcare celula 1 după utilizare

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 59,09Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 57,91Ah – 60,27Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului (Tabelul 8.6).

Tabelul 8.6 Celula 1 după utilizare – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	58,99	-0,10	0,17%
2	59,06	-0,03	0,05%
3	59,22	+0,13	0,22%

– Celula 2 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.7:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 58,96Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 57,78Ah – 60,14Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.7 Celula 2 după utilizare – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	58,84	-0,12	0,20%
2	59,00	+0,04	0,07%
3	59,04	+0,08	0,14%

– Celula 3 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.8:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 59,01Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 57,83Ah – 60,19Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.8 Celula 3 după utilizare – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	58,84	-0,17	0,29%
2	59,07	+0,06	0,10%
3	59,13	+0,12	0,20%

– Celula 4 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.9:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 58,90Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 57,72Ah – 60,08Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.9 Celula 4 după utilizare – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	58,74	-0,16	0,27%
2	58,87	-0,03	0,05%
3	59,09	+0,19	0,32%

– Celula 5 – datele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.10:

Media aritmetică a valorilor capacității descărcate obținută în cadrul celor trei măsurători este de 58,99Ah, iar abaterea maximă față de această valoare se situează sub pragul de ±2% (interval: 57,81Ah – 60,17Ah). Toate cele trei valori ale capacității se încadrează în acest interval, ceea ce confirmă stabilitatea rezultatelor și validarea testului.

Tabelul 8.10 Celula 5 după utilizare – validarea testului de capacitate statică

Testul	Capacitatea descărcată (Ah)	Abaterea față de medie (Ah)	Abaterea relativă (%)
1	58,82	-0,17	0,29%
2	58,97	-0,02	0,03%
3	59,19	+0,20	0,34%

8.3.3. Analiză și concluzii

Analiza testelor de capacitate statică evidențiază comportamentul electrochimic al celulelor în două etape distincte: înainte și după utilizarea timp de 12 luni în regim real de funcționare (Figura 8.6). Prin compararea valorilor capacității descărcate în ambele cazuri, s-a urmărit identificarea eventualelor degradări funcționale, exprimabile cantitativ prin scăderea capacității disponibile.

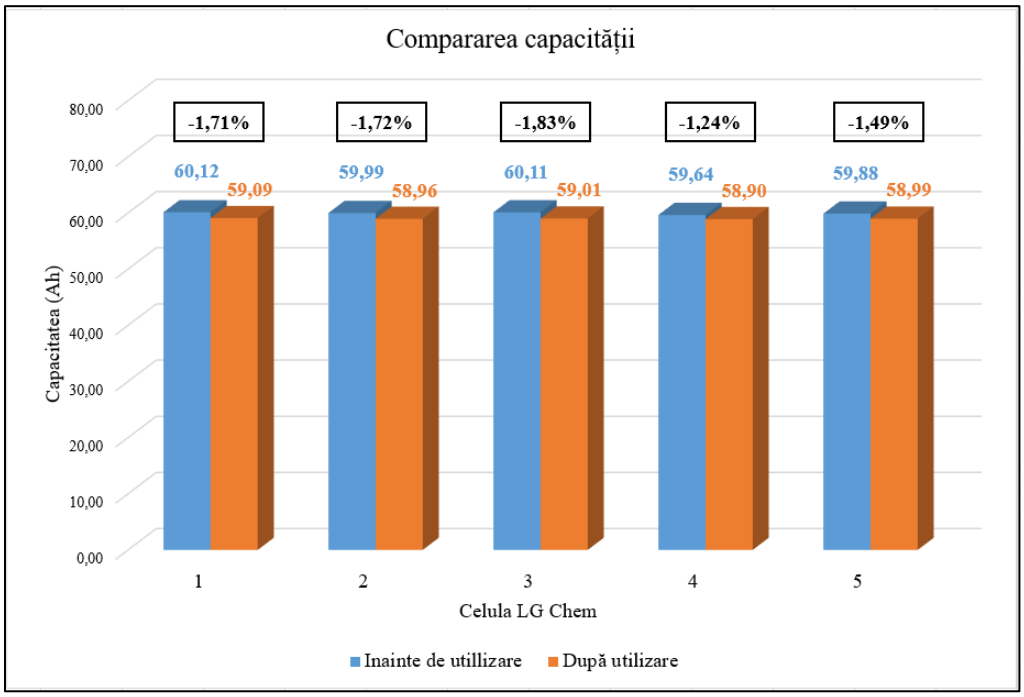


Figura 8.6 Compararea capacității celulelor înainte și după utilizare

În etapa inițială, toate cele cinci celule au prezentat valori de capacitate situate în proximitatea valorii nominale de 60Ah, cu o dispersie relativă redusă (sub ±0,5% față de media aritmetică), ceea ce confirmă omogenitatea lotului și calitatea procesului de fabricație. Valorile capacității descărcate au fost consecvente între cele trei cicluri pentru fiecare celulă, iar abaterile relative față de medie au rămas mult sub pragul de validare de ±2%, indicând o bună stabilitate și repetabilitate a testului.

După 12 luni de utilizare în sistemul fotovoltaic, s-a observat o ușoară scădere a capacității pentru toate celulele testate. Media capacității descărcate a scăzut cu aproximativ 0,9 – 1,1Ah față de valorile inițiale, ceea ce corespunde unei pierderi relative de aproximativ 1,2 – 1,8%. Această degradare moderată nu indică apariția unor fenomene acceleratoare de uzură. În plus, valorile capacităților post-utilizare continuă să se încadreze în intervalele de validare definite prin abaterea de ±2% față de media aritmetică individuală, ceea ce confirmă menținerea coerenței electrochimice și a funcționării celulei în parametri stabili.

Prin urmare, datele obținute în urma testului static susțin ideea că celulele analizate pot fi considerate adecvate pentru aplicații de stocare a energiei în regim fotovoltaic, chiar și după o perioadă de exploatare de 12 luni. Acest rezultat reflectă o degradare lentă și uniformă, caracteristică unui comportament electrochimic stabil în condiții reale de exploatare.

8.4. Test de caracterizare a puterii impulsurilor hibride - HPPC

Pentru realizarea acestui test este utilizat soft-ul de testare Chroma Battery Charge/ Discharge împreună cu sursa de alimentare DC programabilă Chroma serie 62000P și sarcina DC programabilă Chroma serie 63100A (Figura 8.7).



Figura 8.7 Echipamente utilizate pentru realizarea testului HPPC

Deoarece echipamentul Chroma Battery Charge prezintă limitări ce nu permit aplicarea curenților de impuls conform cerințelor maxime (precum curentul de încărcare de 43,8A pentru

0,75C), s-a recurs la o scalare a profilelor de test. Astfel, testele au fost realizate cu un curent de descărcare de 40A și un curent de încărcare de 30A. Această abordare este permisă conform *USABC Test Procedures Manual*, care specifică faptul că testele pot fi scalate proporțional cu condiția menținerii profilului de test și a metodologiei de analiză. Obiectivul acestei scalări a fost păstrarea formei testului pentru caracterizarea rezistenței la impuls și a capabilității de putere a celulei, în condițiile unui regim de operare adaptat echipamentului de laborator.

- *Condiții de testare*

Testele experimentale se vor efectua respectând următoarele condiții standardizate, în acord cu specificațiile producătorului:

– temperatura ambiantă: 25°C ± 2°C, asigurată de camera termică din laborator;
– încărcarea celulei conform algoritmului specificat de producător;
– după fiecare ciclu de încărcare și descărcare completă, precum și după fiecare impuls HPPC, va fi introdusă o perioadă de repaus de minimum 60 de minute pentru stabilizare;
– pe durata testelor vor fi monitorizate continuu curentul, tensiunea și timpul prin intermediul sistemul de achiziție de date.

- *Procedura de testare*

Procedura de testare va fi precedată de un proces de pregătire a celulelor, constând într-un ciclu preliminar de stabilizare. După etapa de pregătire, testul HPPC propriu-zis se va realiza conform metodologiei specificate în *USABC Test Procedures Manual*. Începând de la o stare complet încărcată, se aplică un profil standard HPPC.

În Tabelul 8.11 este prezentată simplificat structura unui profil HPPC urmat de descărcare 10% capacitate, raportat la echipamentele utilizate. Curentul aplicat se consideră pozitiv la descărcare și negativ la încărcare.

Tabelul 8.11 Structura unui profil de test HPPC + descărcare 10% capacitate

Pas	Secvență	Echipament	Timp	Setare
1	descărcare	sursă DC Chroma 62000P	30s	CC = 40A
2	pauză	-	40s	off
3	încărcare (regen)	sarcină DC Chroma 63100A	10s	CC = -30A
4	descărcare	sursă DC Chroma 62000P	1509s	CC = 13,33A
5	pauză	-	3600s	off

Acest ciclu (impulsuri + descărcare C/3 + repaus) este repetat până la atingerea a cel puțin 90% DOD, cu măsurători efectuate la fiecare treaptă intermediară (90%, 80%, ..., 10% SOC). Pentru fiecare impuls se înregistrează curentul, tensiunea și timpul, cu ajutorul cărora se determină rezistența de impuls (Pulse Resistance) și puterea de impuls (Pulse Power Capability), conform metodologiei din Secțiunea 4.4 a *USABC Test Procedures Manual*.

8.4.1. Test HPPC la achiziționarea celulelor

În contextul prezentului studiu, testul HPPC s-a derulat în regim controlat conform metodologiei *USABC Test Procedures Manual*, utilizând sursa programabilă Chroma 62000P și descărcătorul Chroma 6310A, cu comandă prin interfața software de pe laptop. Pe parcursul unor secvențe de impulsuri, au apărut întreruperi ale comunicării dintre echipamente și interfața

de control, fapt care a condus la pierderea comenzii active și la imposibilitatea aplicării corecte a profilului de curent/tensiune. În absența unei opriri controlate, din cele 5 celule testate după utilizarea în sistemul fotovoltaic, 3 celule au depășit limitele de funcționare impuse de protocol (tensiune minimă la descărcare, respectiv condiții de repaus înainte/după impuls), ceea ce a generat deviații termice și electrochimice ce compromit integritatea și repetabilitatea ulterioară a măsurărilor. Din acest motiv, testul a devenit distructiv pentru cele 3 celule invalidând utilizarea lor ulterioară în evaluări comparative.

Acest incident evidențiază atât sensibilitatea testului HPPC la integritatea lanțului de comunicație și la respectarea ferestrelor de stabilitate, cât și necesitatea supravegherii continue pe durata întregului protocol (≈25 ore/celulă). În consecință, s-a renunțat la extinderea testării la toate cele cinci celule inițial propuse și s-a adoptat o strategie de eșantionare restrictivă, limitată la celelalte două celule rămase funcționale, selecționate pentru a conserva caracterul reprezentativ al lotului. Justificarea statistică s-a realizat prin raportare la principiile din ISO 2859-1, cu definirea neconformității ca neîndeplinirea condițiilor de eligibilitate HPPC.

- Celula 1 înainte de utilizare – secvență test HPPC (Figura 8.8)

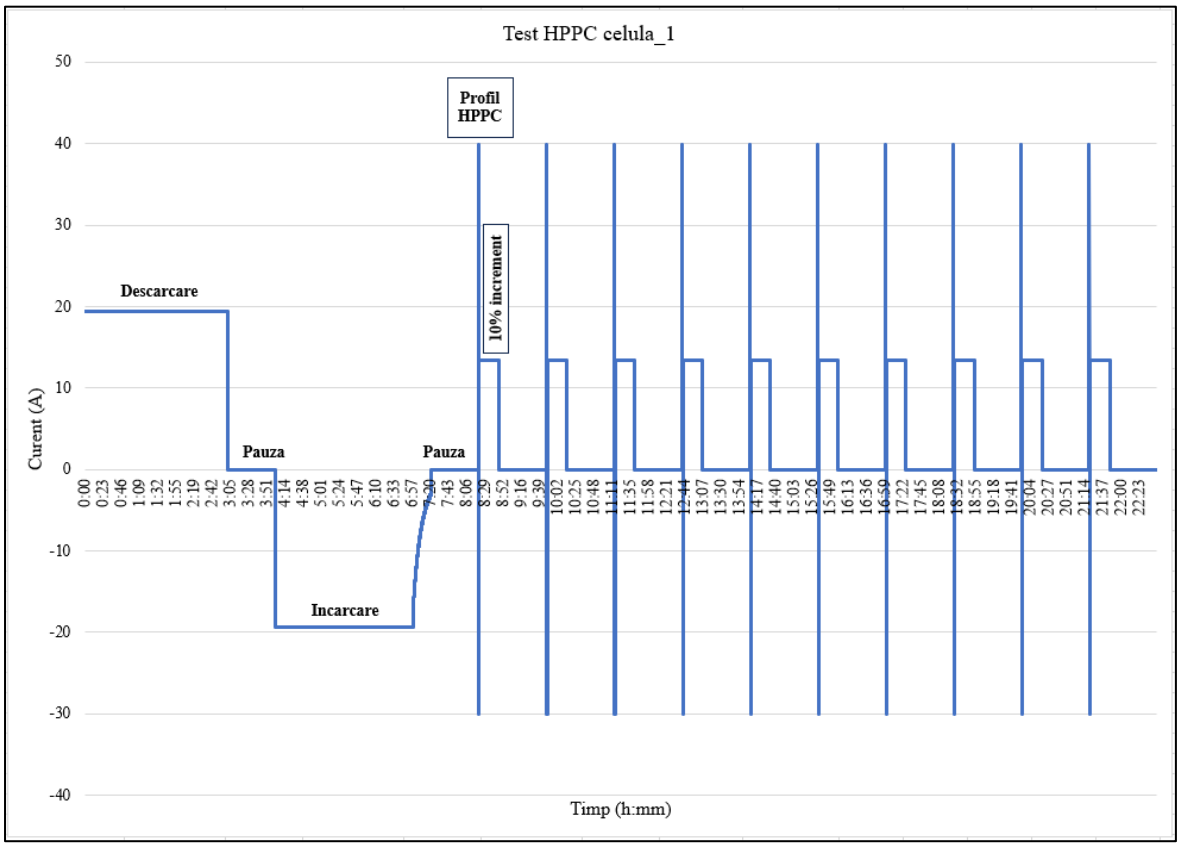


Figura 8.8 Test HPPC – celula 1 înainte de utilizare

Figura 8.9 ilustrează modul în care rezistența internă la fiecare impuls de descărcare/ încărcare variază în funcție de starea de încărcare a celulei. Analiza evoluției rezistenței interne este realizată prin aplicarea unei ajustări polinomiale de ordinul 3 (fit polinomial) utilizând funcția *Polynomial Trendline* din Microsoft Excell.

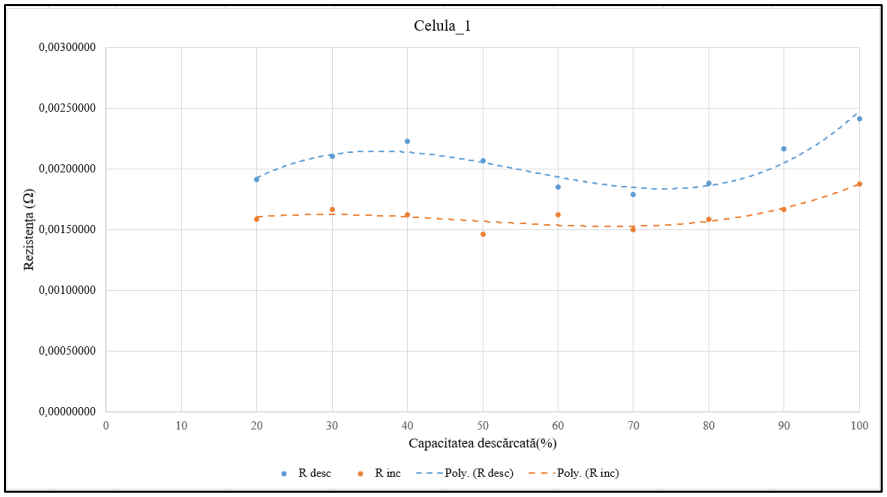


Figura 8.9 Rezistența de impuls în funcție de capacitatea descărcată – celula 1 înainte de utilizare

- Celula 2 înainte de utilizare

Figura 8.10 prezintă modul în care rezistența internă la fiecare impuls de descărcare/ încărcare se modifică pe măsură ce scade starea de încărcare a celulei.

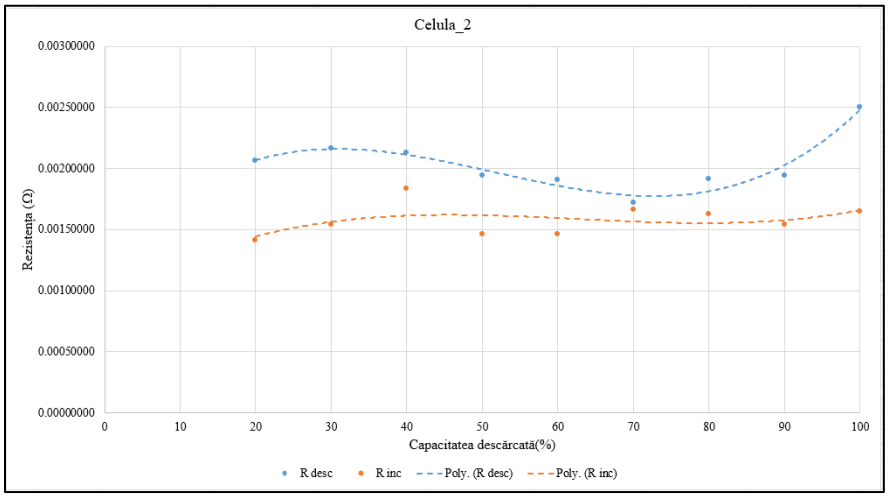


Figura 8.10 Rezistența de impuls în funcție de capacitatea descărcată – celula 2 înainte de utilizare

8.4.2. Test HPPC după utilizare în sistemul fotovoltaic

După 12 luni de funcționare în cadrul sistemului fotovoltaic, aceleași cinci celule au fost supuse iarăși testului HPPC, obținându-se următoarele:

- Celula 1 după utilizare – test HPPC (Figura 8.11)

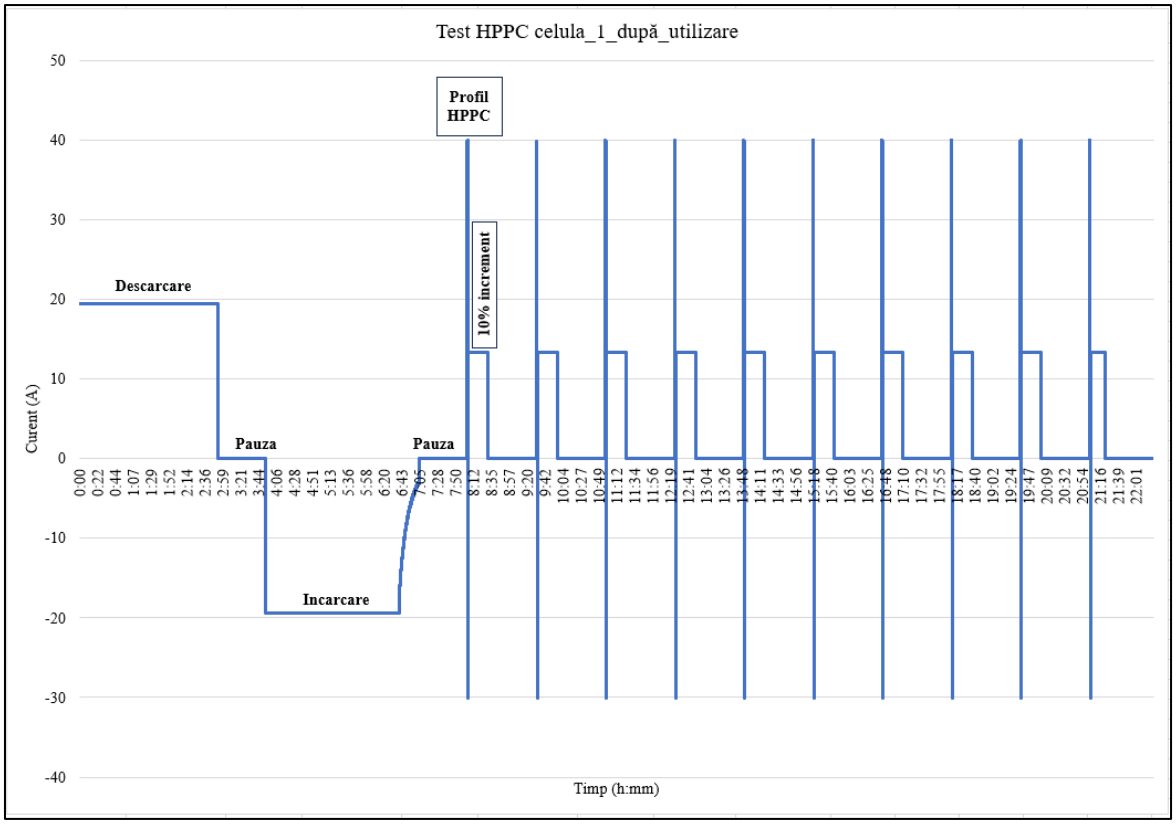


Figura 8.11 Test HPPC – celula 1 după utilizare

Figura 8.12 ilustrează modul în care rezistența internă la fiecare impuls de descărcare/ încărcare se modifică pe măsură ce scade starea de încărcare a celulei.

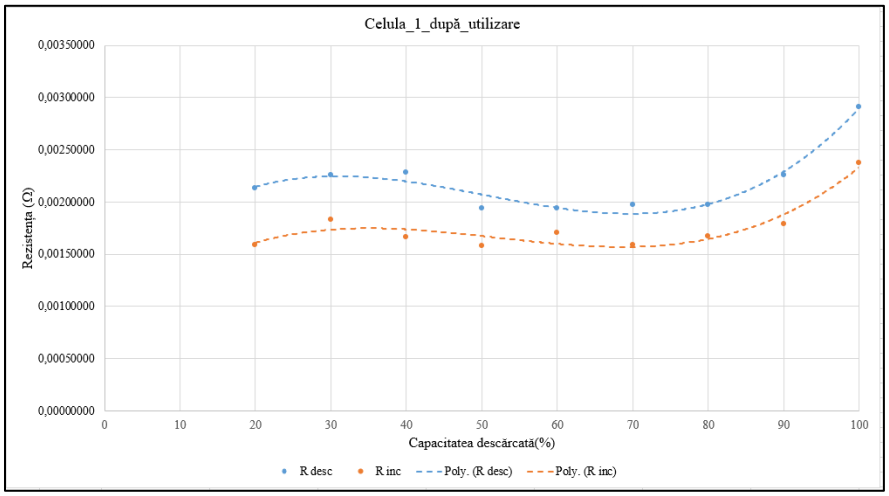


Figura 8.12 Rezistența de impuls în funcție de capacitatea descărcată – celula 1 după utilizare

- Celula 2 după utilizare

Figura 8.13 prezintă modul în care rezistența internă la fiecare impuls de descărcare/ încărcare se modifică pe măsură ce scade starea de încărcare a celulei.

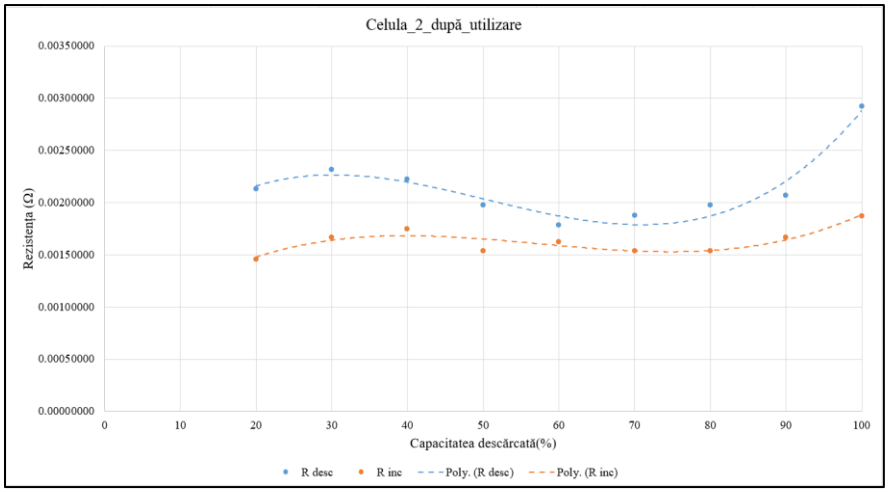


Figura 8.13 Rezistența de impuls în funcție de capacitatea descărcată – celula 2 după utilizare

8.4.3. Analiză și concluzii

Analiza comparativă a rezistenței interne la descărcare și încărcare, înainte și după utilizare, pentru celulele 1 și 2, evidențiază diferențe importante în modul de degradare a parametrilor electrochimici în urma ciclurilor de exploatare (Tabelul 8.12, Tabelul 8.13).

Tabelul 8.12 Rezistența internă înainte și după utilizare în funcție de capacitatea descărcată – celula 1

Capacitatea descărcată (%)	R_{desc} (mΩ) înainte de utilizare	R_{desc} (mΩ) după utilizare	ΔR_{desc} (%)	$R_{înc}$ (mΩ) înainte de utilizare	$R_{înc}$ (mΩ) după utilizare	$\Delta R_{înc}$ (%)
10	-	-	-	-	-	-
20	1,9098	2,1328	11,68	1,5828	1,5861	0,21
30	2,1003	2,2556	7,39	1,6661	1,8327	10,00
40	2,2231	2,2882	2,93	1,6228	1,6661	2,67
50	2,0677	1,9398	-6,19	1,4595	1,5828	8,45
60	1,8496	1,9423	5,01	1,6228	1,7094	5,34
70	1,7870	1,9724	10,37	1,4995	1,5861	5,78
80	1,8797	1,9749	5,06	1,5828	1,6694	5,47
90	2,1629	2,2556	4,29	1,6661	1,7927	7,60
100	2,4135	2,9148	20,77	1,8760	2,3725	26,47

Pentru celula 1, în regim de descărcare, creșterile relative ale rezistenței interne variază între 2,93% și 20,77%, cu un maxim pronunțat la 100% capacitate descărcată, ceea ce indică acumularea unor efecte de îmbătrânire accentuate în zona de descărcare completă. O excepție notabilă apare la 50% capacitate descărcată, unde se înregistrează o scădere de 6,19%, posibil asociată cu redistribuirea uniformă a ionilor de litiu sau cu modificări locale ale structurii interne. În regim de încărcare, celula 1 prezintă creșteri mai accentuate la valori ridicate ale capacității descărcate, cu un maxim de 26,47% la 100% descărcare. În intervalul 50–90%, variațiile sunt moderate (5–10%), ceea ce reflectă o degradare progresivă a proprietăților de transfer de sarcină, cu impact asupra eficienței stocării energiei.

Tabelul 8.13 Rezistența internă înainte și după utilizare în funcție de capacitatea descărcată – celula 2

Capacitatea descărcată (%)	R_{desc} (mΩ) înainte de utilizare	R_{desc} (mΩ) după utilizare	ΔR_{desc} (%)	$R_{înc}$ (mΩ) înainte de utilizare	$R_{înc}$ (mΩ) după utilizare	$\Delta R_{înc}$ (%)
10	-	-	-	-	-	-
20	2,0677	2,1328	3,15	1,4162	1,4562	2,82
30	2,1629	2,3183	7,18	1,5428	1,6661	7,99
40	2,1303	2,2255	4,47	1,8327	1,7494	-4,55
50	1,9424	1,9749	1,67	1,4595	1,5395	5,48
60	1,9097	1,7845	-6,56	1,4595	1,6228	11,19
70	1,7218	1,8797	9,17	1,6661	1,5395	-7,60
80	1,9123	1,9749	3,27	1,6261	1,5395	-5,33
90	1,9449	2,0677	6,31	1,5395	1,6661	8,22
100	2,5063	2,9248	16,70	1,6528	1,8727	13,30

Pentru celula 2, analiza rezistenței interne la descărcare arată creșteri în majoritatea intervalelor de capacitate descărcată, cu valori între +1,67% și +16,70%. Creșterea maximă apare la 100% capacitate descărcată, ceea ce indică un impact accentuat al îmbătrânirii în zona de descărcare completă. Totuși, există și o scădere semnificativă la 60% capacitate descărcată (-6,56%), posibil asociată cu o redistribuire mai eficientă a ionilor de litiu sau cu o reorganizare locală a materialului activ, ceea ce reduce temporar rezistența internă. În regim de încărcare, variațiile rezistenței interne sunt mixte. Se observă creșteri în intervalele 20–30% și 50–60%, cu un maxim de +13,30% la 100% capacitate descărcată, dar și scăderi la 40% (-4,55%), 70% (-7,60%) și 80% (-5,33%). Aceste scăderi pot indica fenomene de restructurare a interfeței electrozilor sau îmbunătățirea contactelor interne în anumite condiții de SOC.

Comparativ, celula 1 prezintă o degradare mai uniformă, cu predominanța creșterilor rezistenței interne în aproape toate intervalele de capacitate, indicând un proces de îmbătrânire constant al elementelor conductive și al interfeței electrozilor. Celula 2, în schimb, prezintă o degradare mai neuniformă, cu alternanțe între creșteri și scăderi, ceea ce sugerează o sensibilitate mai mare la condițiile de operare și evoluție mai variabilă a parametrilor interni.

În ansamblu, pentru ambele celule, degradarea este mai pronunțată la capacități descărcate ridicate ($\geq 90\%$), unde se observă creșteri semnificative ale rezistenței interne. Acest comportament recomandă evitarea descărcărilor complete și operarea celulelor într-un interval de 10–90% capacitate descărcată, pentru optimizarea performanței de putere și prelungirea duratei de viață în aplicații staționare.

Compararea rezultatelor a evidențiat o stabilitate acceptabilă a rezistenței interne, fără a compromite funcționalitatea pentru aplicații staționare. Aceste observații susțin utilizabilitatea celulelor second-life în aplicații de stocare a energiei la scară mică, cu solicitări de putere moderate, cum este cazul sistemelor PV autonome sau hibride.

În concluzie, utilizarea testului HPPC, chiar și în formă scalată, a permis validarea performanței celulelor în regim de stocare staționară, oferind o metodă standardizată de evaluare comparativă a degradării și o bază obiectivă pentru încadrarea celulelor în aplicații de tip second-use.

8.5. Test pentru determinarea impedanței interne - EIS

Pentru a continua evaluarea degradării interne a celulelor second-life după un an de funcționare în sistemul fotovoltaic, au fost efectuate măsurători EIS atât în etapa inițială, cât și în cea finală a perioadei de utilizare. Măsurătorile au fost realizate cu ajutorul testerului de impedanță pentru baterii HIOKI BT4560, un instrument specializat în măsurători la frecvențe joase, adecvat caracterizării electrochimice a bateriilor (Figura 8.14).

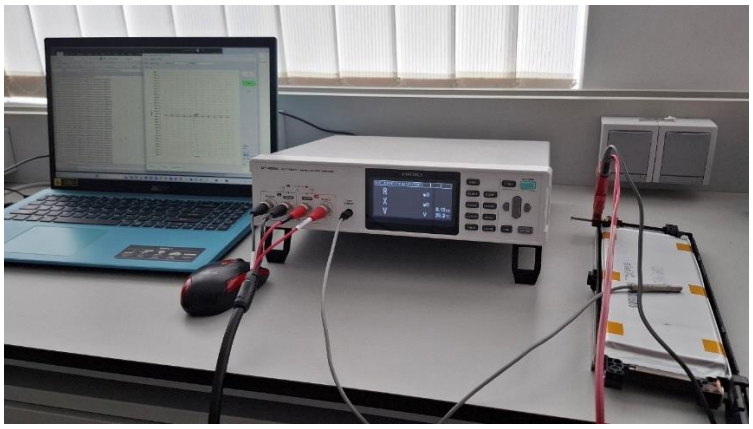


Figura 8.14 Echipamente utilizate pentru realizarea testului EIS

Testele pentru determinarea impedanței interne se realizează începând de la o stare complet încărcată, în condiții de repaus termic și electric (SOC stabil). Pe baza măsurătorilor realizate cu echipamentul Hioki BT4560, se obține curba Nyquist pentru frecvențele cuprinse între 0,1Hz și 1kHz. Acest grafic oferă informații despre comportamentul intern al celulei în domeniul frecvențelor, prin reprezentarea componentei imaginare a impedanței în funcție de componenta reală [42], [43]. Din grafic, se extrag următorii parametri:

– rezistența ohmică (R_s) – include calitatea contactelor, rezistența electrolitului, starea colectorilor iar o creșterea a acesteia indică degradare mecanică;

– rezistența totală (R_{tot}) – considerată suma dintre rezistența ohmică și rezistența de transfer de sarcină iar o creștere a acesteia indică o degradare internă globală.

– rezistența de transfer de sarcină (R_{ct}) – reflectă procesele electrochimice la interfața electrod-electrolit.

În cadrul unui studiu comparativ între starea unei celule înainte și după utilizare, monitorizarea valorii rezistenței de transfer de sarcină R_{ct} este necesară pentru a evalua nivelul de degradare al interfeței electrod–electrolit și pentru a corela uzura electrochimică cu modificările de performanță (capacitate, randament energetic, stabilitate în timp) [44]. În același timp, compararea valorilor R_{tot} este utilă pentru a exclude sau izola contribuțiile de natură electrică, mecanică sau de contact, dar fără a oferi informații directe despre procesele chimice interne.

8.5.1. Test EIS la achiziționarea celulelor

Rezultatele experimentale obținute în această etapă sunt prezentate și supuse unei analize detaliate, evidențiind implicațiile lor asupra comportamentului electrochimic al celulelor.

➢ Celula 1 înainte de utilizare – grafic Nyquist (Figura 8.15)

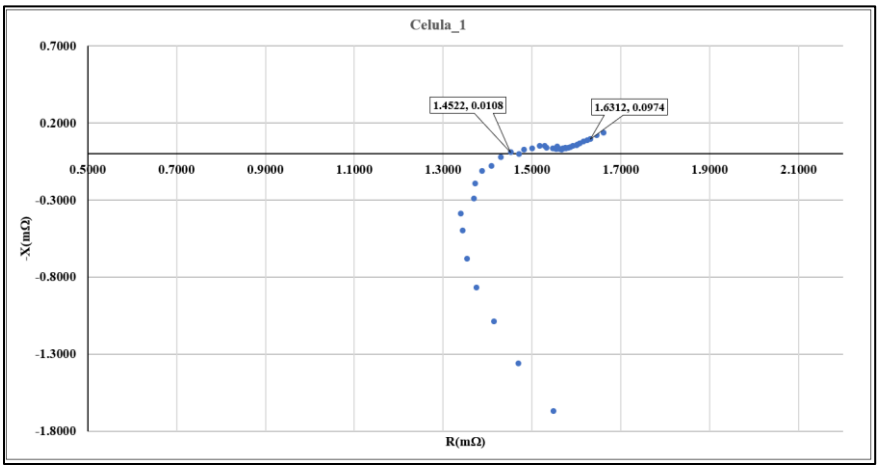


Figura 8.15 Grafic Nyquist celula 1 înainte de utilizare

Curba Nyquist obținută pentru Celula 1 înainte de utilizare reflectă un comportament tipic pentru o celulă Li-ion aflată într-o stare electrochimică stabilă. Graficul prezintă un semicerc aplatizat, fără prelungire clară în regiunea difuzională, ceea ce sugerează o interfață electrod–electrolit activă și o mobilitate ionică bună. Parametrii de interes au fost extrași direct din datele experimentale, fără ajustări:

- R_s = 1,4522mΩ (la 50Hz);
- R_{tot} = 1,6312mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1790mΩ.

➢ Celula 2 înainte de utilizare

Pentru Celula 2 înainte de utilizare, analiza oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3861mΩ (la 40Hz);
- R_{tot} = 1,5368 mΩ (la 0,1Hz);
- R_{ct} = 0,1507mΩ.

➢ Celula 3 înainte de utilizare

Pentru Celula 3 înainte de utilizare, analiza oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3286mΩ (la 32Hz);
- R_{tot} = 1,4717mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1431mΩ.

➢ Celula 4 înainte de utilizare

Pentru Celula 4 înainte de utilizare, analiza oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3283mΩ (la 32Hz);
- R_{tot} = 1,4695mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1412mΩ.

➢ Celula 5 înainte de utilizare

Pentru Celula 5 înainte de utilizare, analiza oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3547mΩ (la 32Hz);
- R_{tot} = 1,5309mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1762mΩ.

8.5.2. Test EIS după utilizare celulelor în sistemul fotovoltaic

Datele experimentale obținute în această etapă:

- Celula 1 după utilizare – grafic Nyquist (Figura 8.16)

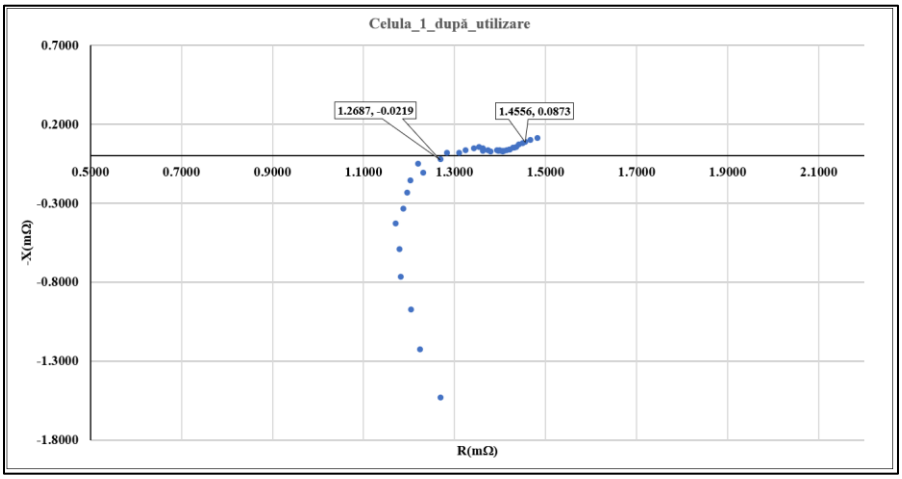


Figura 8.16 Grafic Nyquist celula 1 după utilizare

Pentru Celula 1 după utilizare, analiza pe baza curbei Nyquist oferă următorii parametri:

- R_s = 1,2687mΩ (la 50Hz);
- R_{tot} = 1,4556mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1869mΩ.

- Celula 2 după utilizare

Pentru Celula 2 după utilizare, analiza pe baza curbei Nyquist oferă următorii parametri:

- R_s = 1,4616mΩ (la 32Hz);
- R_{tot} = 1,6210mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1594mΩ.

- Celula 3 după utilizare

Pentru Celula 3 după utilizare, analiza pe baza curbei Nyquist oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3279mΩ (la 40Hz);
- R_{tot} = 1,4842mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1563mΩ.

- Celula 4 după utilizare

Pentru Celula 4 după utilizare, analiza pe baza curbei Nyquist oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3658mΩ (la 40Hz);
- R_{tot} = 1,5173mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1515mΩ.

- Celula 5 după utilizare

Pentru Celula 5 după utilizare, analiza pe baza curbei Nyquist oferă următorii parametri:

- R_s = 1,3065mΩ (la 50Hz);
- R_{tot} = 1,4921mΩ (la 0,16Hz);
- R_{ct} = 0,1856mΩ.

8.5.3. Analiză și concluzii

Obiectivul acestei analize a fost de a evidenția, prin parametri măsurabili, gradul de degradare electrochimică acumulat în timpul utilizării celulelor. Evaluarea s-a realizat prin urmărirea a doi parametri specifici extrași din curbele Nyquist: rezistența ohmică R_s, asociată cu rezistențele interne ale componentelor conductive ale celulei (electrolit, colectoare de curent, terminale), și rezistența de transfer de sarcină R_{ct}, ce reflectă dificultatea cu care se realizează procesele de oxidare și reducere la interfața electrod–electrolit. Rezultatele obținute sunt sintetizate în Tabelul 8.14.

Tabelul 8.14 Variația R_s și R_{ct} pentru cele 5 celule înainte și după utilizare

Nr. celulă	R_s (mΩ) înainte de utilizare	R_s (mΩ) după utilizare	ΔR_s (%)	R_{ct} (mΩ) înainte de utilizare	R_{ct} (mΩ) după utilizare	ΔR_{ct} (%)
1	1,4522	1,2687	-12,64	0,1790	0,1869	4,41
2	1,3861	1,4616	5,45	0,1507	0,1594	5,77
3	1,3286	1,3279	-0,05	0,1431	0,1563	9,22
4	1,3283	1,3658	2,82	0,1412	0,1515	7,29
5	1,3547	1,3065	-3,56	0,1762	0,1856	5,33

Se observă că evoluția valorii R_s nu urmează un model coerent între cele cinci celule. Celula 1 a înregistrat o scădere de aproximativ 12,64% a rezistenței ohmice după utilizare, fenomen ce poate fi atribuit unor ajustări fizice ale contactelor sau reconfigurării traseului ionic în urma ciclurilor de funcționare. În contrast, celula 2 a evidențiat o creștere a acestui parametru cu 5,45%, iar celula 4 o variație de 2,82%, ceea ce poate semnala o ușoară degradare mecanică sau modificări în conductivitatea internă. Celula 5 a înregistrat o scădere de 3,56%, în timp ce celula 3 este singura care a rămas aproape constantă, cu o variație de 0,05%, considerată nesemnificativă din punct de vedere practic.

În general, aceste rezultate sugerează că modificările rezistenței ohmice nu sunt relevante pentru evaluarea degradării funcționale, fiind influențate în mod considerabil de factori locali și variații de contact. Totodată, lipsa unei tendințe uniforme limitează utilitatea directă a acestui parametru în diagnosticul comparativ al celulelor.

Parametrul R_{ct}, care reflectă condițiile de contact între electrod și electrolit în cadrul proceselor electrochimice, a prezentat o evoluție clară și sistematică în toate cele cinci cazuri. S-au înregistrat creșteri ale valorii R_{ct} după utilizare pentru toate celulele, cu abateri procentuale între +4,41% (celula 1) și +9,22% (celula 3). Această tendință confirmă prezența unor procese de degradare la nivelul interfeței electrod–electrolit, cum ar fi îngroșarea stratului pasiv (SEI), acumularea de produse de reacție, sau reducerea suprafeței active electrochimic disponibile.

Faptul că toate celulele prezintă o astfel de creștere, în mod consistent, indică o degradare specifică utilizării în aplicații reale.

Rezultatele obținute prin analiza EIS oferă o bază coerentă pentru evaluarea comparativă a stării de sănătate a celulelor utilizate, permițând identificarea celor cu degradare avansată și oferind sprijin în deciziile de reconfigurare sau retragere a modulelor din uz.

Capitolul 9

Modelarea și simularea alternativă a funcționării hibride a sistemului fotovoltaic rezidențial

În continuarea analizei sistemului fotovoltaic rezidențial existent, acest capitol propune o variantă alternativă de extindere a arhitecturii prin integrarea unei configurații de tip DC-coupled. Dacă în capitolul anterior a fost analizată o soluție de hibridizare bazată pe un invertor Victron MultiPlus II, conectat pe partea de curent alternativ (AC-coupled), prezentul capitol explorează posibilitatea utilizării doar a invertorului Fronius Primo 8.2-1 deja instalat, prin adaptarea sistemului pentru a permite comutarea automată între stringurile fotovoltaice și un pachet de acumulatori Li-ion.

Modelarea și simularea sunt realizate în mediul MATLAB Simulink, cu scopul de a evalua comportamentul energetic al configurației propuse în regim de funcționare zi-noapte. Se evidențiază avantajele și limitările acestei soluții din perspectiva compatibilității electrice cu invertorul existent, precum și din punct de vedere al controlului automat al surselor.

9.1. Obiectivul simulării

Configurația inițială a bateriei analizate (19s3p), a fost reconfigurată într-o structură 28s2p pentru a respecta cerințele de tensiune impuse de arhitectura DC-coupled propusă. Această modificare permite compatibilitatea cu intervalul de operare al MPPT-urilor invertorului Fronius Primo 8.2-1 și asigură continuitatea alimentării în regim nocturn. Reconfigurarea oferă o tensiune nominală adecvată și o capacitate suficientă pentru a susține un flux constant de energie în absența generării fotovoltaice.

Pe baza acestei structuri, obiectivul simulării este validarea funcționării unui sistem fotovoltaic hibrid în configurație DC-coupled, în care sursele fotovoltaice și acumulatorul Li-ion sunt conectate direct la cele două intrări MPPT ale invertorului. Modelul urmărește comutarea automată între stringul PV2 și pachetul de baterii 28s2p LG Chem, în funcție de variația iradierii solare, simulată printr-un semnal logic de tip zi/ noapte.

9.2. Configurația sistemului modelat

În vederea simulării și evaluării performanței sistemului analizat, am definit o configurație reprezentativă, integrând cele două stringuri fotovoltaice distincte, pachetul de acumulatori Li-ion și invertorul cu două trackere MPPT independente, după cum urmează:

– string PV1 constituit din 12 panouri fotovoltaice Sharp NU-JD540W: V_{mpp} = 499,7V; I_{mmp} = 12,97A;

– string PV2 constituit din 8 panouri fotovoltaice Longi LR5-66HTH-525M: V_{mmp} = 320,5V; I_{mmp} = 13,11A;

– baterie LG Chem configurată 28s2p: V_{nom} = 100,8V; V_{max} = 117,6V; C_{nom} = 116,8Ah;

– invertor Fronius Primo 8.2-1: două MPPT-uri independente, interval de lucru 80 – 450V, curent maxim 18A/ MPPT.

Această configurație a fost selectată pentru a asigura compatibilitatea tehnică între componente, precum și pentru a permite analiza detaliată a interacțiunilor dintre sursele fotovoltaice, sistemul de stocare și rețea, în diverse condiții de operare.

9.3. Modelarea și simularea sistemului hibrid în Matlab/ Simulink

Modelarea a fost realizată în mediul Matlab/ Simulink, utilizând blocuri logice și surse de semnal, iar diagrama bloc este prezentată în Figura 9.1:

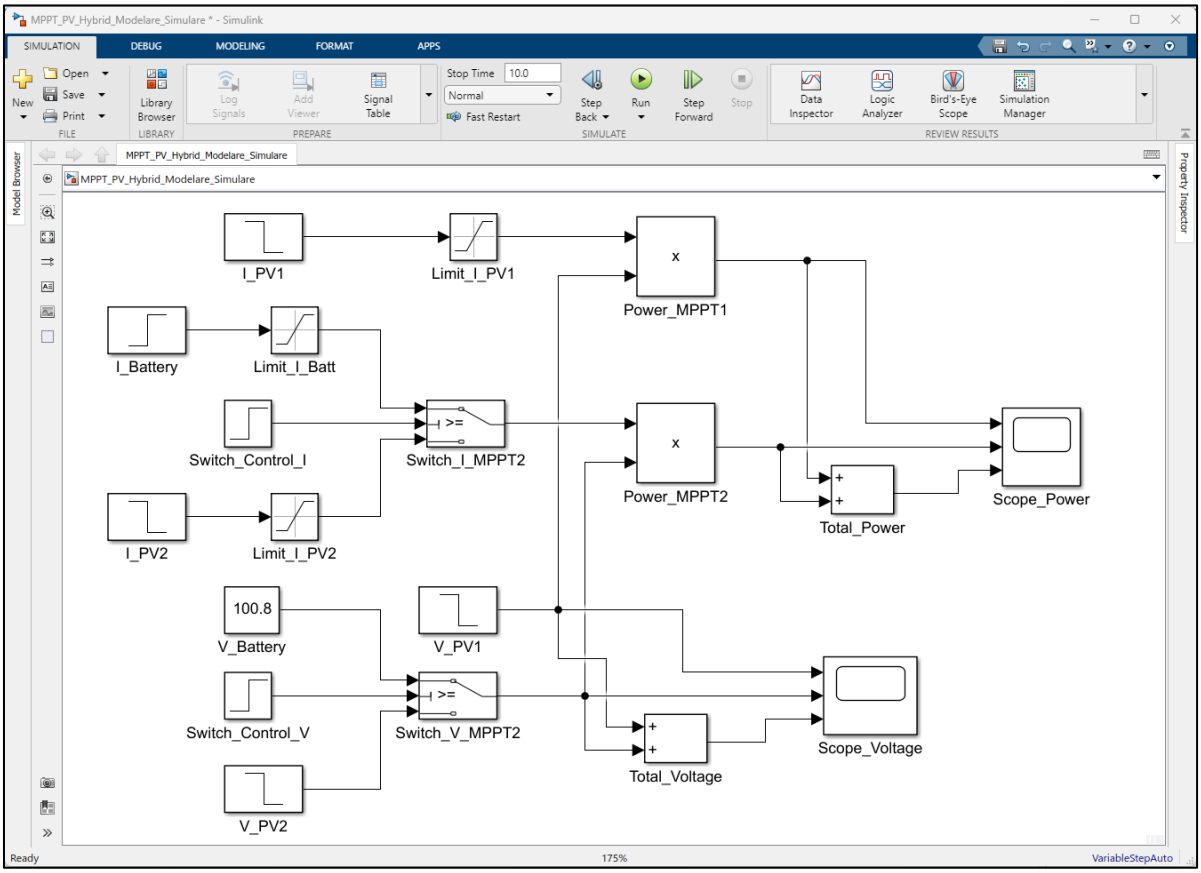


Figura 9.1 Diagrama bloc a modelului Simulink

➢ *Modelarea panourilor fotovoltaice*

Pentru fiecare string fotovoltaic s-au utilizat blocuri de tip *Step* (*I_PV1, I_PV2*) configurate să reproducă valorile caracteristice de curent și tensiune la punctul de putere maximă pentru cele două seturi de panouri. Aceste semnale sunt limitate la 18A prin blocuri *Saturation* (*Limit_I_PV1, Limit_I_PV2*) pentru a corespunde specificațiilor tehnice ale MPPT-

urilor invertorului Fronius Primo 8.2-1. Valorile de tensiune sunt combinate cu cele de curent în blocuri *Product* (*Power_MPPT1, Power_MPPT2*), rezultând puterea obținută pe fiecare string.

- *Modelarea bateriei*

Pachetul de baterii LG Chem configurat 28s2p este reprezentat printr-un bloc *Step* (*I_Battery*) și un bloc *Constant* (*V_Battery*) corespunzătoare curentului maxim disponibil și tensiunii nominale. Acestea sunt utilizate în comutare cu al doilea MPPT al invertorului, asigurând alimentarea acestuia în condiții de iradiere redusă (noapte). Și în acest caz, curentul este limitat pentru a proteja MPPT-ul cu ajutorul unui bloc *Saturation* (*Limit_I_Batt*).

- *Logica de comutare automată*

Comutarea între sursele fotovoltaice și baterie se realizează cu ajutorul a două blocuri *Switch* (*Switch_I_MPPT2, Switch_V_MPPT2*), controlate de semnale logice de tip *Step* (*Switch__Control_I, Switch_Control_V*), cu o tranziție la t = 5s, astfel:

– înainte de t = 5s (zi): ieșirea este 1 → activare PV2
– după t = 5s (noapte): ieșirea este 0 → activare baterie

Astfel, aceste semnale simulează tranziția zi-noapte și activează conectarea bateriei la MPPT2 în perioada fără producție solară. Logica implică și comparatoare care evaluează semnalele de control pentru a comuta selectiv între PV2 și baterie.

- *Calculul puterii și afișarea rezultatelor*

Puterea generată pe fiecare MPPT este calculată utilizând blocuri *Product* (*Power_MPPT1, Power_MPPT2*), iar suma acestora este reprezentată print-un bloc de tip *Sum* (*Total_Power*). Valorile de putere și tensiune sunt monitorizate în timp real prin blocuri *Scope* (*Scope_Power, Scope_Voltage*), permițând analiza dinamică a regimurilor de funcționare și a tranzițiilor impuse de logica de comutare.

9.4. Interpretarea rezultatelor simulării

Rezultatele obținute în urma simulării indică curbele de tensiune electrică și de putere. Acestea reflectă comportamentul realist al sistemului fotovoltaic hibrid în regim de funcționare zi/noapte. În intervalul inițial (t < 5s), ambele MPPT-uri sunt alimentate exclusiv de stringurile PV1 și PV2, asigurând conversia energiei solare în putere activă disponibilă la ieșirea invertorului.

După momentul t = 5s, controlul logic determină comutarea sursei PV2 cu bateria LG Chem. MPPT2 continuă să furnizeze putere, însă de această dată provenită din stocul acumulat în baterie. Această tranziție poate fi observată direct în semnalul *Scope_Power* unde puterea rămâne activă după apus, spre deosebire de sistemele convenționale on-grid care încetează funcționarea în absența iradierii solare.

Se poate realiza următoarea analiză a comportamentului sistemului fotovoltaic hibrid, echipat cu mecanism de comutare automată între stringul PV2 și acumulatorul LG Chem configurat 28s2p:

- *Comportamentul în regim zi (0 – 5s):*

Până la momentul t = 5s, sursele fotovoltaice sunt active, iradierea este maximă, iar ambele MPPT-uri sunt alimentate de stringurile PV1 și PV2. În această perioadă:

– puterea pe MPPT1 este constantă în jur de 6480Wp, corespunzând curentului de 12,97A și tensiunii de 499,7V;

– puterea pe MPPT2 este de aproximativ 4200Wp, rezultând din cei 13,11A și 320,5V ai stringului PV2;

– puterea totală atinge un maxim de 10680Wp (conform Scope_Power, linia albastră);

– tensiunea totală de intrare este de aproximativ 820,2V (499,7V + 320,5V), confirmând buna funcționare în configurația DC-coupled.

- *Comportamentul în regim noapte (după 5s):*

După momentul t = 5s, semnalul de comutare *zi/noapte* determină dezactivarea stringului PV2 și comutarea pe baterie:

– puterea pe MPPT1 scade la 0W, confirmând absența iradierii și implicit oprirea producției stringului PV1;

– MPPT2 primește acum curent și tensiune de la baterie (100,8V și 18A), iar puterea generată scade la aproximativ 1800W;

– puterea totală a sistemului devine 1800W, reflectând exclusiv aportul bateriei;

– tensiunea totală este acum 100,8V, egală cu valoarea tensiunii bateriei, întrucât PV1 și PV2 sunt nefuncționale în absența iradierii.

- *Validarea comportamentului sistemului:*

Simularea confirmă:

– funcționarea corectă a comutării automate în funcție de iradiere;

– menținerea alimentării prin acumulator în regim nocturn, cu tensiune și putere adecvată pentru sarcini ușoare aplicabile ieșirii invertorului;

9.5. Concluzii

Modelarea realizată în Simulink demonstrează posibilitatea extinderii unui sistem fotovoltaic rezidențial existent prin integrarea unei surse secundare de energie (acumulator) într-o arhitectură de tip DC-coupled, fără modificarea invertorului on-grid deja instalat. Simularea comutării automate între stringurile fotovoltaice și baterie în funcție de ciclul zi/ noapte permite evidențierea avantajelor unei astfel de configurații în ceea ce privește continuitatea alimentării și utilizarea eficientă a energiei stocate.

Din punct de vedere teoretic și simulativ, ideea de a înlocui un string PV cu o sursă echivalentă de curent continuu (acumulator cu tensiune compatibilă) este validă. În practică însă:

– este necesară adăugarea unui BMS care să gestioneze cu precizie curentul și tensiunea furnizat, dar și cu protecție la supradescărcare și monitorizare termică;

– trebuie validată compatibilitatea cu algoritmii MPPT ai invertorului;

– invertorul nu trebuie să interpreteze tensiunea constantă a bateriei drept o anomalie.

Prin urmare, abordarea poate fi implementată în sisteme reale, dar necesită verificări riguroase de compatibilitate și securitate electrică.

Capitolul 10

Analiza comparativă a performanței sistemului fotovoltaic cu și fără stocare de energie: impact energetic și economic

Acest capitol are ca obiectiv analiza comparativă a performanței sistemului fotovoltaic în cele două configurații distincte: înainte și după integrarea sistemului de stocare a energiei. Studiul se concentrează pe impactul adăugării bateriei asupra principalilor indicatori energetici și economici relevanți, precum autoconsumul, nivelul de independență energetică, eficiența utilizării energiei solare, precum și asupra interacțiunii cu rețeaua electrică. Scopul este de a evidenția avantajele, limitările și potențialul tehnico-economic al hibridizării sistemului fotovoltaic prin stocare locală.

Evaluarea se bazează pe date reale de operare pentru două perioade distincte: 01.06.2023 – 31.05.2024, în configurație on-grid clasică (fără stocare), iar cea de-a doua, 13.06.2024 – 12.06.2025, în configurație hibridă, cu baterii second-life LG Chem integrate în sistem prin echipamente Victron Energy în AC coupling cu invertorul Fronius Primo 8.2-1.

10.1. Impact energetic

10.1.1. Analiza energetică a sistemului fotovoltaic în configurație on-grid (configurație de bază)

Se prezintă evoluția energiei electrice produse de sistemul fotovoltaic în această configurație, pe parcursul unui an complet (1.06.2023 – 31.05.2024). Datele prezentate au fost obținute cu ajutorul aplicației *Solar Web*. Energia generată a fost structurată în două componente: energia livrată în rețea, care reprezintă surplusul de energie neutilizat local și injectat în sistemul național, și consumul direct, adică energia utilizată în timp real de către consumator (Tabelul 10.1).

Tabelul 10.1 Distribuția energiei produse de sistemul fotovoltaic în perioada 1.06.2023 –31.05.2024

Perioada	Către rețea (kWh)	Consum direct (kWh)	Total (kWh)
01.06.2023 – 31.05.2024	6529,97	1729,78	8260,82

Consumul de energie electrică, repartizată în funcție de sursa de proveniență (energia furnizată din rețeaua publică și energia utilizată direct din producția fotovoltaică locală), este prezentat în Tabelul 10.2.

Tabelul 10.2 Energia consumată în perioada 1.06.2023 – 31.05.20214

Perioada	Din rețea (kWh)	Din energia solară (kWh)	Total (kWh)
01.06.2023 – 30.06.2023	2065,59	1729,78	3795,37

10.1.2. Analiza energetică a sistemului fotovoltaic în configurație hibridă (cu integrarea stocării de energie)

În perioada 13.06.2024 – 12.06.2025, sistemul a fost extins prin integrarea unui pachet de baterii second-life LG Chem, utilizând controlere Victron Energy și menținând invertorul Fronius pentru conversia solară. În această nouă arhitectură, energia solară excedentară a fost redirecționată către baterii în loc să fie pierdută sau blocată de supratensiuni.

Sistemul de calcul Victron (Cerbo GX) a gestionat inteligent fluxurile de energie, permițând stocarea surplusului de producție și apoi utilizarea acestuia pentru acoperirea consumului rezidențial sau pentru injecție controlată în rețea. Atunci când producția solară este insuficientă, energia necesară este preluată din rețeaua publică.

Pentru a analiza în continuare comportamentul energetic al sistemului fotovoltaic după integrarea bateriei, a fost evaluat modul în care energia solară produsă este direcționată către diferite destinații de consum sau stocare. În Tabelul 10.3 este prezentată distribuția energiei generate de sistemul fotovoltaic în perioada 13.06.2024 – 12.06.2025, diferențiată în trei fluxuri principale: energia injectată în rețea, energia utilizată pentru încărcarea bateriei și energia consumată direct, adică energia utilizată în timp real de către consumator. Datele au fost obținute cu ajutorul aplicației *Vrm Victron Energy*.

Tabelul 10.3 Distribuția energiei produse de sistemul fotovoltaic în perioada 13.06.2024 –12.06.2025

Perioada	Către rețea (kWh)	Către baterie (kWh)	Consum direct (kWh)	Total (kWh)
13.06.2024 – 12.06.2025	6264,29	2968,35	2307,26	11539,93

Cantitățile de energie consumate din fiecare sursă sunt sintetizate în Tabelul 10.4.

Tabelul 10.4 Cantitățile de energie consumate din fiecare sursă

Perioada	Din rețea (kWh)	Din baterie (kWh)	Din energia solară (kWh)	Total (kWh)
13.06.2024 – 12.06.2025	393,45	2186,45	2307,26	4889,18

10.1.3. Analiză comparativă

Analiza comparativă a funcționării sistemului fotovoltaic în regim on-grid și ulterior în configurație hibridă evidențiază o îmbunătățire semnificativă a eficienței energetice și a gradului de autonomie energetică.

În perioada 01.06.2023 – 31.05.2024, sistemul a funcționat exclusiv în regim on-grid. Energia anuală produsă a fost de 8260,82kWh (vezi Tabelul 10.1). Energia utilizată în timp real de către consumatori a fost 1729,78kWh, un consum relativ scăzut, restul fiind injectat în rețea (Figura 10.8). Consumul total anual a fost de 3795,37kWh, din care o mare parte a fost asigurată de energia importată din rețea (Figura 10.9), adică 2065,59kWh (vezi Tabelul 10.2.).

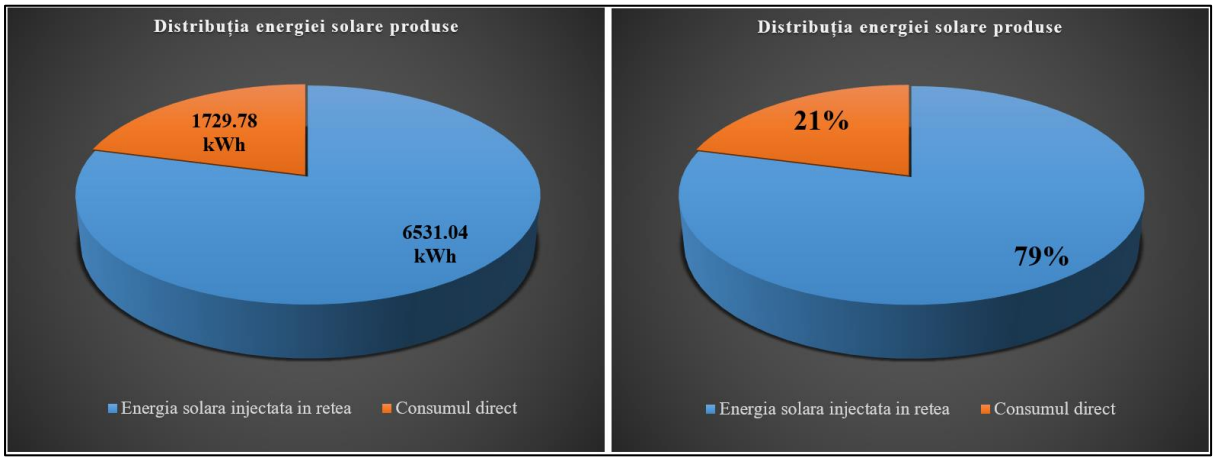


Figura 10.8 Distribuția energiei solare produse în sistem on-grid

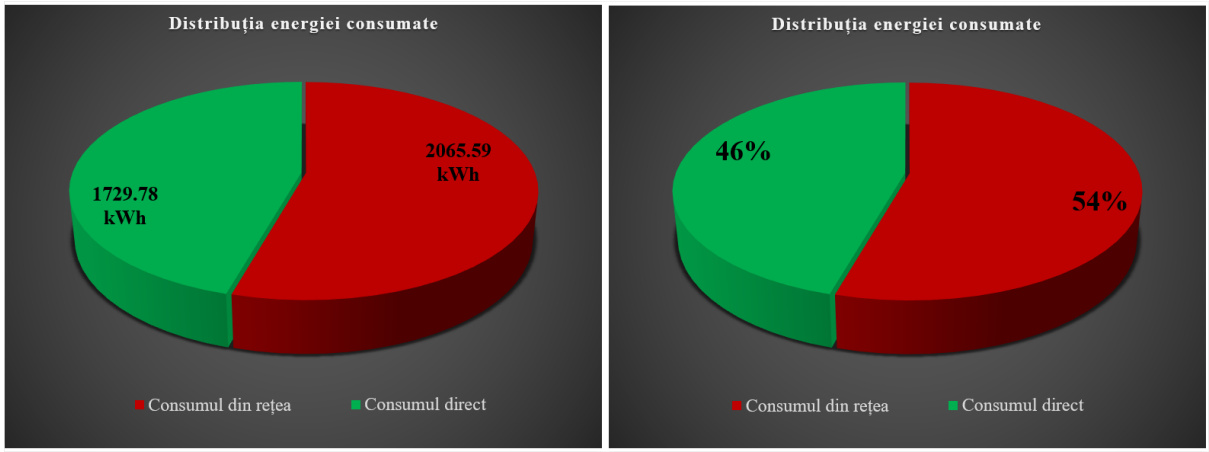


Figura 10.9 Distribuția energiei consumate cu sistem on-grid

În lipsa unui sistem de stocare, rețeaua a furnizat 54% din consumul total anual, ceea ce reflectă o dependență ridicată față de rețeaua de distribuție și o utilizare ineficientă a energiei solare produse.

După integrarea bateriei second-life LG Chem și extinderea capacității de producție, sistemul a produs o cantitate mai mare de energie, 11539,93kWh (vezi Tabelul 10.3), și a asigurat o utilizare mai eficientă a acesteia: consumul direct a crescut la 2307,26kWh, unitatea de acumulare a energiei a înmagazinat o cantitate totală de 2968,35kWh, iar în rețea s-au injectat 6264,29kWh (Figura 10.10). Conform Tabelului 10.4, consumul total anual a fost de 4889,18kWh (Figura 10.11), astfel:

- 2307,26kWh din energie solară;
- 2186,45kWh din sistem de stocare;
- 393,45kWh din rețeaua de distribuție locală.

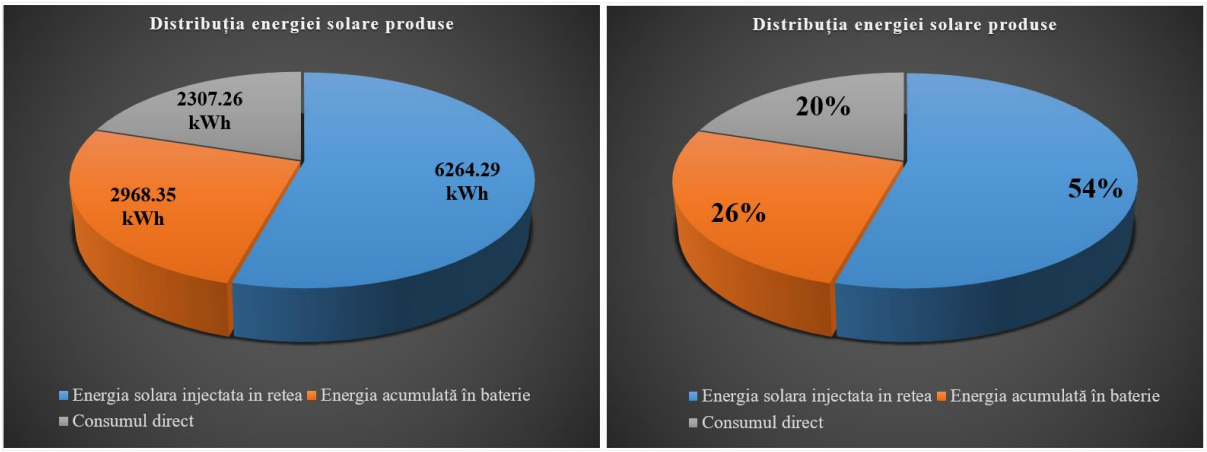


Figura 10.10 Distribuția energiei solare produse în configurație hibridă

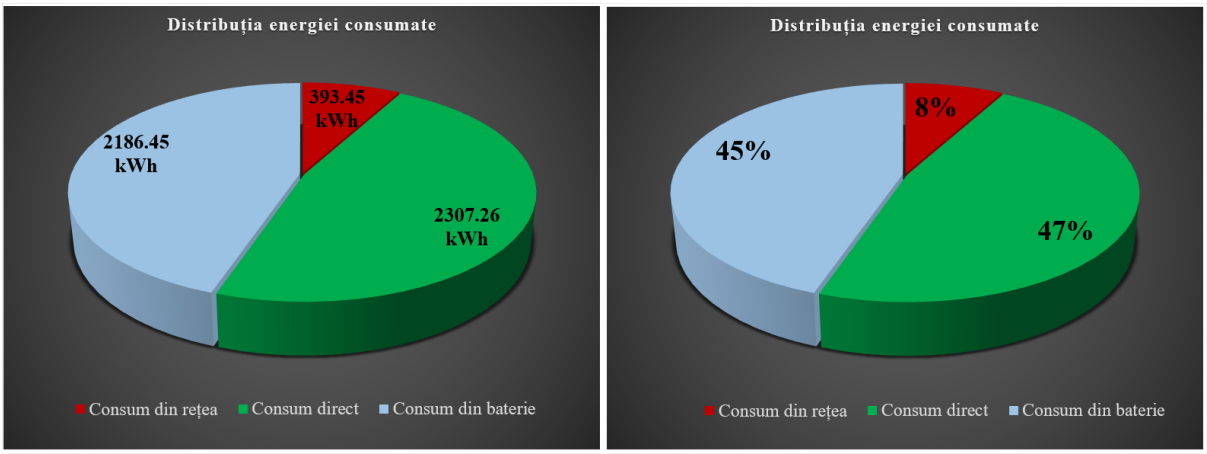


Figura 10.11 Distribuția energiei consumate în configurație hibridă

Se observă că energia consumată din rețea s-a redus considerabil, de la 54% la 8%. Această modificare a determinat o diminuare considerabilă a dependenței de rețeaua electrică și a permis o utilizare mai eficientă a energiei fotovoltaice disponibile local, prin reducerea pierderilor asociate injectării și prin limitarea efectelor supratensiunilor.

Datele prezentate ilustrează diferențele de performanță între cele două configurații și pe baza lor se poate concluziona că integrarea bateriei second-life a condus la: creșterea ratei de autoconsum, reducerea energiei pierdute prin deconectarea invertorului, scăderea importului de energie din rețea și la creșterea valorii energetice a sistemului. Sistemul devine astfel mai autonom, mai eficient în utilizarea energiei solare disponibile și mai stabil în relația cu rețeaua electrică. Această performanță este susținută de utilizarea inteligentă a stocării și de capacitatea sistemului de a amortiza fluctuațiile de tensiune prin absorbția surplusului în baterii.

10.2. Impact economic

10.2.1. Analiza economică a sistemului fotovoltaic în configurație on-grid (configurație de bază)

Pentru perioada de funcționare fără stocare (01.06.2023 – 31.05.2024), furnizorul de energie a înregistrat un total de 6297,59kWh din care 4232,00kWh au fost remunerați direct,

iar 2065,59kWh au fost înregistrați drept compensare cantitativă pentru consumul din rețea (Tabelul 10.5). Conform sistemului de monitorizare Solar Web, din energia solara s-au injectat în rețea 6529,97kWh, iar diferența dintre aceasta valoare și cea înregistrată de furnizor (232,38kWh) este considerată pierdere la injectare în rețea.

Tabelul 10.5 Energia produsă raportată la furnizorul de energie (sistem on-grid)

Perioada	Compensare 1:1 (kWh)	Consum direct (kWh)	Către rețea conform furnizorului de energie (kWh)
01.06.2023 – 31.05.2024	2065,59	1729,78	4232,00

Prețurile pe kWh asociate pentru fiecare categorie de energie utilizată sunt următoarele:

– 4232,00kWh (energia injectată în rețea) sunt remunerați cu prețul mediu de 0,5613 lei/ kWh;

– 2065,59kWh (energia consumată din rețea și compensată 1:1) corespund prețului de 0,80 lei/ kWh [45], însă doar 0,5613 lei/ kWh sunt rambursați de catre furnizor, restul până la 0,80 lei/ kWh acoperă tarifele de transport/ plafonare tarifară ale companiei de distribuție, conform Tabelului 10.6.

– 1729,78kWh (consum direct din energia solară), sunt luați în calcul cu prețul 0,80 lei/ kWh, cât ar fi fost achiziționați direct de la furnizorul de energie [45].

Tabelul 10.6 Diferența de plată (lei/ kWh) către furnizor (01.06.2023 – 31.05.2024)

Preț achiziție din rețea (lei/ kWh)	Preț mediu oferit de furnizor (lei/ kWh)	Tarif de transport/ plafonare tarifară (lei/ kWh)
0,80	0,5613	0,2387

În Tabelul 10.7 sunt prezentate sumele aferente fiecărei categorii de energie electrică.

Tabelul 10.7 Sumele aferente fiecărei categorii de energie electrică (sistem on-grid)

Categorie de energie	Cantitate (kWh)	Preț (lei/ kWh)	Total (lei)
Compensare 1:1 (kWh)	2065,59	0,5613	1159,42
Tarif transport/ plafonare tarifară pentru compensare 1:1 (kWh)	2065,59	-0,2387	-493,06
Consum direct (kWh)	1729,78	0,80	1383,82
Către rețea conform furnizorului de energie (kWh)	4232,00	0,5613	2375,42

Bilanțul pentru perioada analizată (12 luni) indică un profit de 4425,60 lei (relația 10.1).

$$1159{,}42lei - 493{,}06lei + 1383{,}82lei + 2375{,}42lei = 4425{,}60\ lei \qquad (10.1)$$

10.2.2. Analiza economică a sistemului fotovoltaic în configurație hibridă (cu integrarea stocării de energie)

Pentru perioada de funcționare în configurație hibridă (13.06.2024 – 12.06.2025), furnizorul de energie a înregistrat un total de 6545,45kWh din care 6152,00kWh au fost

remunerați direct, iar 393,45kWh au fost înregistrați drept compensare cantitativă pentru consumul din rețea (Tabelul 10.8).

Tabelul 10.8 Energia produsă raportată la furnizorul de energie (sistem hibrid)

Perioada	Compensare 1:1 (kWh)	Consum direct (kWh)	Consum din baterie (kWh)	Către rețea conform furnizorului de energie (kWh)
13.06.2024 – 12.06.2025	393,45	2307,26	2186,45	6152,00

Conform sistemului de monitorizare Cerbo GX, din energia solara s-au injectat în rețea 7046,19kWh, din care:

– 6264,29kWh au fost injectați în rețea direct din producția solară;
– 781,90kWh au fost injectați din sistemul de stocare;

Prețurile pe kWh asociate fiecărei categorii de energie utilizate sunt detaliate astfel:

– energiei cumpărate din rețea, 393,45kWh, i se asociază două tarife [45]:
  - cantitatea de 155,07kWh din luna decembrie 2024 a fost achiziționată la prețul de 0,80 lei/ kWh;
  - cantitatea de 238,28kWh corespunzătoare celorlalte 11 luni a fost achiziționată la prețul de 0,68 lei/ kWh.

Pentru ambele tarife, doar 0,5775 lei/ kW sunt rambursați de catre furnizor, restul până la 0,80 lei/ kWh, respectiv 0,68 lei/ kWh, acoperă tarifele de transport/ plafonare tarifară ale companiei de distribuție, conform Tabelului 10.9.

– 2307,26kWh (consum direct din energia solară), sunt luați în calcul cu prețul 1,30 lei/ kWh, cât ar fi fost achiziționați direct de la furnizorul de energie [45];

– 2186,45kWh (consum din baterie), sunt luați în calcul tot cu prețul 1,30 lei/ kWh, cât ar fi fost achiziționați direct de la furnizorul de energie [45];

– 6152,00kWh sunt remunerați cu prețul mediu de 0,5775 lei/ kWh.

Tabelul 10.9 Diferența de plată (lei/ kWh) către furnizor (13.06.2024 – 12.06.2025)

Preț achiziție din rețea (lei/ kWh)	Preț mediu oferit de furnizor (lei/ kWh)	Tarif de transport/ plafonare tarifară (lei/ kWh)
0,80	0,5775	0,2225
0,68	0,5775	0,1025

În Tabelul 10.10 sunt prezentate sumele aferente fiecărei categorii de energie electrică.

Tabelul 10.10 Sumele aferente fiecărei categorii de energie electrică (sistem hibrid)

Categorie de energie	Cantitate (kWh)	Preț (lei/ kWh)	Total (lei)
Compensare 1:1 (kWh)	155,07	0,5775	89,55
	238,28	0,5775	137,61
Tarif transport/ plafonare tarifară pentru compensare 1:1 (kWh)	155,07	-0,2225	-34,50
	238,28	-0,1025	-24,42
Consum direct (kWh)	2307,26	1,30	2999,44
Consum din baterie (kWh)	2186,45	1,30	2842,38
Către rețea conform furnizorului de energie (kWh)	6152,00	0,5775	3552,78

Bilanțul pentru perioada analizată (12 luni) indică un profit de 9562,84 lei (relația 10.2).

$$89{,}55lei + 137{,}61lei - 34{,}50lei - 24{,}42lei + 2999{,}44lei + 2842{,}38lei + 3552{,}78lei = 9562{,}84\ lei \quad (10.2)$$

10.3. Amortizarea investiției

10.3.1. Amortizarea investiției pentru sistemul fotovoltaic on-grid

Pentru a evalua rentabilitatea sistemului fotovoltaic în configurație on-grid, s-a utilizat costul total de achiziție al componentelor, adică 30995,00 lei. Pe baza datelor anuale de funcționare, sistemul a generat un profit compus din valoarea energiei consumate direct și cea obținută prin injecția în rețea, totalizând aproximativ 4425,60 lei/ an.

Astfel, perioada de recuperare a investiției (amortizarea) poate fi estimată prin raportul dintre investiția inițială și profitul anual (relația 10.3), rezultând:

$$Perioada\ de\ amortizare = \frac{30995{,}00\ lei}{4425{,}60\ {}^{lei}/_{an}} = 7\ ani \quad (10.3)$$

10.3.2. Amortizarea investiției pentru sistemul fotovoltaic hibridizat

În urma transformării sistemului fotovoltaic din configurație on-grid într-un sistem hibridizat, s-a realizat o analiză economică detaliată a performanței financiare pentru perioada 13.06.2024 – 12.06.2025. Acest sistem a fost compus din infrastructura fotovoltaică inițială, la care s-au adăugat echipamente de stocare (baterii LG Chem second-life) și dispozitive Victron pentru integrarea acestora. Costul sistemului on-grid a fost de 30995,00 lei, iar costul suplimentar pentru componenta de stocare și hibridizare a fost de 19545,75 lei. Astfel, investiția totală pentru sistemul fotovoltaic hibridizat se ridică la 50540,75 lei.

Raportând valoarea totală a beneficiilor (9562,84 lei/ an) la costul investiției (50540,75 lei), rezultă o perioadă estimativă de amortizare de aproximativ 5,28 ani (relația 10.4) în condițiile actuale. Această performanță se datorează capacității sistemului de a stoca surplusul fotovoltaic și de a reduce pierderile, ceea ce anterior afecta randamentul sistemului on-grid.

$$Perioada\ de\ amortizare = \frac{30995{,}00lei + 19545{,}75\ lei}{9562{,}84\ {}^{lei}/_{an}} = 5{,}28\ ani \quad (10.4)$$

Ca și în cazul sistemului on-grid, estimarea realizată presupune menținerea performanțelor panourilor fotovoltaice și ale invertorului în timp, în absența unei degradări semnificative, precum și menținerea tarifelor de energie la un nivel stabil. Totuși, în condiții reale de exploatare, perioada de amortizare poate varia în funcție de modificările survenite în profilul de consum, de fluctuațiile nivelului de iradiere solară, de evoluția tarifelor reglementate și de fiabilitatea componentelor sistemului.

10.4. Concluzii

Analiza comparativă a celor două configurații ale sistemului fotovoltaic (on-grid și hibridizat cu sistem de stocare) evidențiază o îmbunătățire semnificativă a performanței economice odată cu integrarea bateriilor și a echipamentelor auxiliare de gestiune a energiei. Sistemul on-grid a generat un profit anual de aproximativ 4425,60 lei, conducând la o perioadă estimativă de amortizare de 7 ani, în timp ce sistemul hibridizat, cu o investiție suplimentară în componente de stocare și control, a înregistrat un profit anual de 9562,84 lei, reducând perioada de amortizare la circa 5,28 ani.

Aceste rezultate evidențiază potențialul economic al hibridizării sistemelor fotovoltaice rezidențiale, mai ales în contextul unor rețele cu fluctuații de tensiune sau restricții de injectare. Creșterea gradului de autoconsum și valorificarea surplusului fotovoltaic prin stocare contribuie direct la optimizarea rentabilității investiției.

Totuși, este important de subliniat că aceste estimări se bazează pe ipoteze idealizate, precum menținerea performanțelor tehnice ale echipamentelor fără degradări semnificative și stabilitatea tarifelor de energie. În condiții reale de exploatare, durata efectivă de recuperare a investiției poate fi influențată de variații în consumul utilizatorului, de modificările climatice locale (care afectează iradierea solară), de ajustările tarifare reglementate și de fiabilitatea componentelor utilizate în sistem. Prin urmare, pentru o estimare robustă și sustenabilă, se recomandă monitorizarea periodică a performanței energetice și financiare a sistemului în exploatare.

Capitolul 11

Concluzii

Evoluția sistemelor on-grid din România se caracterizează printr-o creștere semnificativă, susținută de stabilitatea financiară, sprijinul guvernamental și considerentele de mediu. Conceptul de prosumator a câștigat importanță, numărul acestora crescând vizibil în urma modificărilor legislative și a programelor de sprijin. Această expansiune pune însă presiune asupra rețelei naționale de joasă tensiune, generând fluctuații de tensiune și posibile perturbări. Pentru atenuarea acestor efecte sunt necesare soluții inovatoare, inclusiv utilizarea tehnologiilor avansate precum sistemele de stocare a energiei și configurațiile hibride. Evoluția actuală evidențiază necesitatea unei abordări echilibrate, care să ia în considerare beneficiile de mediu, implicațiile economice și cerințele tehnice. Tendința indică o continuare a creșterii în adoptarea sistemelor on-grid, cu accent tot mai mare pe compatibilitatea cu rețeaua și creșterea rezilienței sistemelor.

Prezenta lucrare a urmărit integrarea unei baterii second-life provenite dintr-un vehicul electric într-un sistem fotovoltaic rezidențial și investigarea posibilităților reale de extindere, optimizare și hibridizare a acestuia. În cadrul cercetării au fost parcurse etape esențiale, de la analiza comparativă a tehnologiilor de stocare disponibile și selecția pachetului de acumulatori, până la testarea experimentală a performanțelor celulelor selectate și validarea configurației hibride propuse.

Studiul a evidențiat faptul că bateriile litiu-ion second-life, în special cele de tip NMC provenite din vehicule electrice, pot constitui o alternativă viabilă pentru aplicații staționare de stocare a energiei. Prin testarea statică, test de caracterizare a puterii impulsurilor hibride și spectroscopia de impedanță electrochimică a celulelor LG Chem selectate, s-a reușit caracterizarea stării acestora înainte și după integrarea în sistemul fotovoltaic, obținându-se date relevante privind capacitatea, rezistența internă și degradarea în timp. Rezultatele experimentale au arătat o pierdere moderată a capacității active, fără a compromite însă funcționarea sistemului în parametri funcționali acceptabili.

Integrarea bateriei într-o configurație AC-coupled a permis creșterea nivelului de autoconsum și reducerea pierderilor asociate injectării necontrolate în rețea, în special în perioadele cu consum redus și producție solară ridicată. Simulările realizate în MATLAB/Simulink au confirmat, de asemenea, funcționalitatea și eficiența arhitecturii hibride alternative propuse.

Analiza energetică și economică a demonstrat că modernizarea sistemului prin adăugarea unei componente de stocare determină o îmbunătățire semnificativă a performanțelor generale, conducând la o perioadă de amortizare comparabilă sau chiar mai scurtă decât în configurația clasică on-grid. Costurile de investiție suplimentare pentru integrarea bateriei sunt compensate prin valorificarea surplusului de energie și creșterea gradului de independență energetică.

Analiza comparativă a fluxurilor energetice din perioada 13 iunie 2024 – 12 iunie 2025 evidențiază performanța sistemului fotovoltaic hibrid în condiții reale de funcționare, cu variații sezoniere semnificative. Integrarea bateriei a avut un impact esențial în:

– reducerea dependenței de rețea, în special în lunile cu producție solară ridicată;
– maximizarea autoconsumului, prin absorbția surplusului solar și acoperirea consumului în afara orelor de iradiere;
– limitarea injecției în rețea în afara perioadelor de vară, datorită capacității de stocare.

Conform statisticilor furnizate de aplicația Solar.web de la Fronius, sistemul fotovoltaic a produs, pe întreaga perioadă de funcționare, 30,54 MWh, echivalent cu emisia a 16,18 tone de CO_2 în atmosferă. Această economie de emisii este echivalentă cu plantarea a aproximativ 415 arbori**,** care ar fi absorbit aceeași cantitate de CO_2 pe parcursul vieții lor sau cu parcurgerea a circa 64928 km cu un autoturism pe combustie, distanță ce ar fi generat emisii similare (Figura 11.1). Acești indicatori ilustrează contribuția directă a sistemului fotovoltaic la reducerea impactului asupra mediului, prin înlocuirea unei părți din energia provenită din surse convenționale cu energie regenerabilă produsă local.

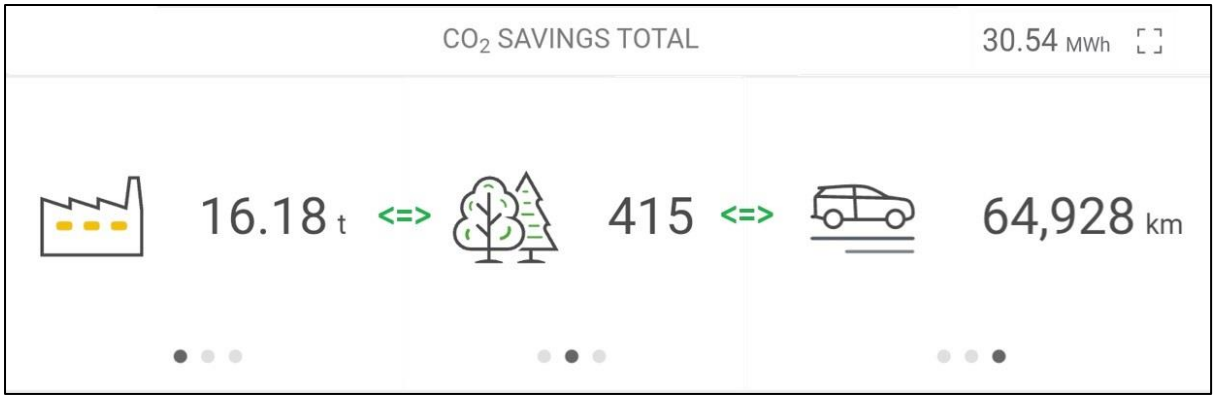


Figura 11.1 Contribuția sistemului fotovoltaic la reducerea impactului asupra mediului

Prin urmare, această lucrare contribuie la fundamentarea deciziei de reutilizare a bateriilor second-life în contextul tranziției energetice și al promovării sustenabilității. Se oferă o perspectivă integrată asupra oportunităților și limitărilor acestei abordări, susținută de rezultate experimentale concrete și simulări tehnico-economice relevante.

11.1. Rezultate obţinute

În urma cercetărilor desfășurate în cadrul acestei lucrări au fost obținute rezultate relevante care confirmă fezabilitatea și potențialul integrării bateriilor second-life în sistemele fotovoltaice on-grid, contribuind la dezvoltarea soluțiilor sustenabile de stocare a energiei.

Analiza literaturii de specialitate și a tehnologiilor existente a permis identificarea caracteristicilor constructive și funcționale ale diferitelor tipuri de baterii utilizate în domeniul vehiculelor electrice, cu accent pe tehnologia NMC utilizată de LG Chem. Pe această bază, a fost selectat și achiziționat un pachet de acumulatori provenit dintr-un vehicul electric Hyundai Kona Electric 64 kWh, care a fost ulterior dezasamblat și configurat în vederea integrării într-un sistem de stocare staționară.

Testarea experimentală, desfășurată în cadrul laboratorului „Testare baterii”, a cuprins trei etape majore:

– testul de capacitate statică – utilizat pentru determinarea capacității reale a celulelor înainte și după utilizare;

– testul HPPC – folosit pentru caracterizarea rezistenței interne și a puterii disponibile în funcție de starea de încărcare;

– spectroscopia de impedanță electrochimică (EIS) – destinată evaluării parametrilor electrochimici interni și identificării eventualelor modificări structurale ale celulelor.

Compararea rezultatelor obținute înainte și după integrarea în sistemul fotovoltaic a evidențiat o scădere moderată a capacității și o ușoară creștere a rezistenței interne, fără afectarea funcționalității generale a pachetului de baterii în aplicația staționară. Acest rezultat reflectă o degradare lentă și uniformă, caracteristică unui comportament electrochimic stabil în condiții reale de exploatare.

Integrarea bateriei second-life într-o configurație AC-coupled, împreună cu un sistem existent Fronius Primo 8.2-1, a permis optimizarea fluxului energetic prin reducerea surplusului injectat în rețea și creșterea utilizării energiei produse local. Astfel, se confirmă funcționalitatea arhitecturii propuse și se evidențiază potențialul acesteia de a îmbunătăți parametrii energetici ai locuinței. Simularea realizată în MATLAB/Simulink ar putea fi considerată o alternativă la configurația hibridizată analizată experimental, prin testarea conceptului de conectare directă a bateriei la intrarea MPPT a invertorului on-grid (arhitectură de tip DC-coupled). Modelarea evidențiază posibilitatea extinderii unui sistem fotovoltaic rezidențial existent prin integrarea unei surse secundare de energie fără modificarea invertorului deja instalat, precum și beneficiile comutării automate între stringurile fotovoltaice și baterie în funcție de ciclul zi/noapte, în vederea asigurării continuității alimentării și a utilizării optime a energiei stocate.

Analiza energetică și economică a demonstrat că integrarea soluției de stocare second-life reduce dependența de rețea, crește gradul de autoconsum și poate asigura o amortizare competitivă a investiției comparativ cu configurația clasică on-grid. Extinderea câmpului fotovoltaic prin adăugarea a încă 8 module PV a determinat o creștere semnificativă a producției, asigurând o acoperire mai mare a consumului din surse proprii. În același timp, confortul mediului rezidențial a fost îmbunătățit prin achiziționarea unor echipamente electrocasnice suplimentare, alimentate preponderent din energia generată local, ceea ce a permis diversificarea activităților zilnice fără majorarea costurilor recurente cu electricitatea. Astfel, combinarea creșterii producției cu optimizarea consumului a consolidat performanțele tehnice și economice ale configurației hibride, contribuind totodată la creșterea nivelului de confort al utilizatorilor.

Așadar, principalele concluzii și rezultate sunt următoarele:

– bateriile second-life reprezintă o soluție tehnică viabilă pentru sistemele fotovoltaice on-grid, păstrând performanțe adecvate pentru stocarea energiei pe termen mediu și lung;

– configurația AC-coupled asigură o integrare eficientă și flexibilă a bateriilor reutilizate, facilitând gestionarea optimă a energiei între producție, stocare și consum, cu un impact pozitiv asupra rețelei electrice;

– metodele de testare aplicate au demonstrat capacitatea de diagnosticare precisă a stării bateriei, fiind utile pentru monitorizarea performanței și pentru luarea deciziilor de management a ciclului de viață;

– integrarea bateriilor second-life contribuie atât la reducerea costurilor sistemelor de stocare, cât și la diminuarea impactului ecologic al bateriilor uzate, susținând tranziția energetică durabilă;

– pentru implementarea pe scară largă a acestor soluții, este necesară dezvoltarea unor standarde clare privind reutilizarea bateriilor, precum și implementarea unor strategii eficiente de monitorizare și întreținere.

Rezultatele obținute validează ipoteza că integrarea bateriilor second-life în sistemele fotovoltaice rezidențiale reprezintă o soluție fezabilă, cu beneficii tehnice și economice, contribuind la implementarea unor strategii sustenabile de producere și gestionare a energiei.

11.2. Contribuţii originale

Această teză de doctorat prezintă contribuții originale la domeniul integrării bateriilor second-life în sistemele fotovoltaice on-grid, printr-o abordare combinată, teoretică și experimental aplicativă. Principalele contribuții includ:

– selecția și configurarea unui pachet de baterii second-life provenit dintr-un vehicul electric Hyundai Kona Electric 64kWh, utilizând criterii de trasabilitate, fiabilitate și compatibilitate, conform metodologiei de eșantionare ISO 2859-1, în vederea adaptării la o aplicație staționară de tip AC-coupled;

– elaborarea și implementarea unui plan experimental de testare a celulelor second-life, care combină testul de capacitate statică, testul HPPC și spectroscopia de impedanță electrochimică (EIS), permițând o caracterizare a performanțelor electrochimice atât înainte, cât și după utilizarea în sistemul fotovoltaic;

– determinarea pragurilor optime de încărcare și descărcare pentru celulele LG Chem din pachetul analizat, cu scopul maximizării duratei de viață în aplicația staționară și stabilirii parametrilor de configurare a BMS-ului JK-PB2A16S-20P;

– evaluarea impactul numărului mare de prosumatori aparținători de sisteme fotovoltaice on-grid asupra rețelei de joasă tensiune și dezvoltarea unui model evaluativ ce analizează impactul integrării bateriilor second-life asupra creșterii autoconsumului, reducerii energiei preluate din rețeaua electrică în perioadele de vârf și stabilității și fiabilității generale a sistemului fotovoltaic;

– proiectarea și realizarea practică a unei configurații tehnice AC-coupled adaptată particularităților bateriilor second-life, care optimizează gestionarea fluxurilor de energie între panourile fotovoltaice, consumatorii casnici, sistemul de stocare și rețeaua publică de energie electrică;

– realizarea, în mediul MATLAB/Simulink, a unei simulări ce poate fi considerată o alternativă la configurația hibridizată analizată experimental, având ca obiectiv testarea conceptului de conectare directă a bateriei la intrarea MPPT a invertorului on-grid, într-o arhitectură de tip DC-coupled. Modelarea obținută evidențiază posibilitatea extinderii unui

sistem fotovoltaic rezidențial existent prin integrarea unei surse secundare de energie, fără modificarea invertorului deja instalat;

– realizarea unei analize comparative detaliate, atât din perspectivă energetică, cât și economică, între configurația on-grid de bază și configurația hibridă cu stocare second-life, evidențiind impactul pozitiv al acesteia asupra performanței sistemului și a perioadei de amortizare a investiției.

În ansamblu, contribuțiile acestei lucrări oferă un cadru metodologic și aplicativ pentru evaluarea fezabilității tehnice, economice și ecologice a reutilizării bateriilor second-life în sisteme fotovoltaice rezidențiale, cu potențial de replicare în proiecte similare, sprijinind tranziția către soluții energetice durabile și flexibile.

11.3. Perspective de dezvoltare ulterioară

Având în vedere rezultatele obținute în urma integrării unei baterii second-life într-un sistem fotovoltaic rezidențial de tip on-grid, direcțiile viitoare de cercetare pot fi orientate atât spre aprofundarea aspectelor tehnice, cât și spre extinderea aplicabilității practice a soluției propuse.

O primă direcție constă în analiza comportamentului sistemului pe termen lung, prin monitorizarea continuă a performanței bateriei second-life în condiții reale de funcționare, în vederea identificării unor posibile mecanisme de degradare accelerată sau a variațiilor de eficiență în funcție de sezon. Această abordare ar permite validarea ipotezelor formulate în cadrul testelor de laborator și ar putea contribui la îmbunătățirea modelelor de predicție a duratei de viață.

În al doilea rând, extinderea configurației actuale spre o arhitectură complet autonomă (off-grid) sau semi-autonomă (cu suport inteligent de la rețea) poate constitui un pas normal, implicând dezvoltarea unor strategii de management energetic avansat bazate pe inteligență artificială și algoritmi de optimizare în timp real.

Totodată, pe plan experimental, se recomandă investigarea comportamentului altor tipuri de celule second-life pentru a determina adaptabilitatea lor la aplicații rezidențiale, precum și evaluarea comparativă între diverse tehnologii de BMS și protocoale de comunicație pentru controlul și protecția sistemului de stocare.

În paralel, pe plan economic, cercetările viitoare pot include analiza modelelor de afaceri pentru reutilizarea bateriilor second-life, studiul barierelor legislative și identificarea stimulentelor necesare pentru adoptarea la scară largă a acestor soluții. Integrarea acestor sisteme în cadrul rețelelor inteligente (smart grid) și participarea lor la piețele de servicii auxiliare ar putea constitui o nouă oportunitate de valorificare.

În concluzie, dezvoltarea ulterioară a cercetării presupune o abordare multidisciplinară, care să includă ingineria electrică, știința materialelor, analiza economică și politicile energetice, în vederea consolidării rolului bateriilor second-life în tranziția către un sistem energetic sustenabil și flexibil.

Bibliografie

[1] I. T. Bello, H. Raza, A. T. Michael, M. Muneeswara, N. Tewari, W. Bingsen, Y. N. Cheung, Z. Choi, S. T. Boles, "Charging Ahead: The Evolution and Reliability of Nickel-Zinc Battery Solutions", EcoMat, vol. 7, no. 1, 2025, pp. 1-36. [Online]. doi: 10.1002/eom2.12505

[2] J. M. Abarro, J. N. Gavan, D. E. Loresca, M. A. Ortega, E. A. Esparcia, J. A. Paraggua, "A Tale of Nickel-Iron Batteries: Its Resurgence in the Age of Modern Batteries", Batteries, vol. 9, no. 383, 2023, pp. 1-44. [Online]. doi: 10.3390/batteries9070383

[3] H. Budde-Meiwes, B. Lunz, J. Muennix, S. Lehner, "A review of current automotive battery technology and future prospects", Article in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2013, pp. 760-776. [Online]. doi: 10.1177/0954407013485567

[4] M. T. von Srbik, "Advanced Lithium-ion Battery Modelling for Automotive Applications", Ph.D dissertation, Imperial College London, 2015, pp. 20-28. [Online]. https://spiral.imperial.ac.uk/server/api/core/bitstreams/9a64ea52-6aa8-4126-a7d3-1aff65c4c312/content

[5] https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion

[6] M. S. Houache, C. H. Yim, Z. Karkar, Y. A. Lebdeh, "On the Current and Future Outlook of Battery Chemistries for Electric Vehicles - Mini Review", Batteries, vol. 8, no. 70, 2022, pp. 1-19. [Online]. doi: 10.3390/batteries8070070

[7] S. Bauknecht, F. Wätzold, A. Schlösser, J. Kowal, "Comparing the Cold-Cranking Performance of Lead-Acid and Lithium Iron Phosphate Batteries at Temperatures below 00C", Batteries, vol. 9, no. 176, 2023, pp. 1-13. [Online]. doi: 10.3390/batteries9030176

[8] S. Clark, A. Latz, B. Horstmann, "A Review of Model-Based Design Tools for Metal-Air Batteries", Batteries, vol. 4, no. 5, 2018, pp. 1-26. [Online]. doi: 10.3390/batteries4010005

[9] T. R. B. Grandjean, J. Groenewald, A. McGordon, W. Widanage, J. Marco, "Accelerated Internal Resistance Measurements of Lithium-Ion Cells to Support Future End-of-Life Strategies for Electric Vehicles", Batteries, vol. 4, no. 49, 2018, pp. 1-17. [Online]. doi: 10.3390/batteries4040049

[10] A. Gailani, R. Mokidm, M. El-Dalahmeh, "Analysis of Lithium-ion Battery Cells Degradation Based on Different Manufacturers", 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2020. [Online]. doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209759

[11] https://www.tesla.com/support/vehicle-warranty

[12] https://www.nissan.ro/gama/modele/leaf/garantie.html

[13] https://www.bmw.ro/ro/topics/offers-and-services/service-workshop/garantia-bmw.html

[14] https://www.volkswagen.ro/autovehicule-electrice-hibride/id-tehnologie/garantia-si-ingrijirea-bateriei

[15] https://www.hyundai-motor.ro/ro/model/kona-electric

[16] https://www.kia.ro/modele/ev6#;

[17]https://assets.rivian.com/2md5qhoeajym/4Gu8v9hXmik94CHAKis9mG/c6008f410cac191abd746bd60274bb22/r1t_r1s-new-vehicle-limited-warranty-guide-us-en-us-20241231.pdf

[18] L. Schwich, P. Sabarny, B. Friedrich, "Recycling Potential of Lithium-Sulfur Batteries – A First Concept Using Thermal and Hydrometallurgical Methods", Metals, vol. 10, no. 1513, 2020, pp. 1-19. [Online]. doi: 10.3390/met10111513

[19] A. Holzer, S. Windisch, C. Ponak, H. Raupenstrauch, "A Novel Pyrometallurgical Recycling Process for Lithium-Ion Batteries and Its Application to the Recycling of LCO and LFP", Metals, vol. 11, no. 149, 2021, pp. 1-22. [Online]. doi: 10.3390/met11010149

[20] L. Bruckner, J. Frank, T. Elwert, "Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries – A Critical Review of Metallurgical Process Routes", Metals, vol. 10, no. 1107, 2020, pp. 1-29. [Online]. doi: 10.3390/met10081107

[21] D. Werner, U. A. Peuker, T. Mutze, "Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries", Metals, vol. 10, no. 316, 2020, pp. 1-29. [Online]. doi: 10.3390/met10030316

[22] A. Patel, L. Lander, J. Ahuja, J. Bulman, J. K. H. Lum, J. O. D. Pople, A. Hales, Y. Patel, J. Edge, "Lithium-ion battery second life: pathways, challenges and outlook", Frontiers in Chemistry, vol. 12, 2024, pp. 1-21. [Online]. doi: 10.3389/fchem.2024.1358417

[23] E. Hossain, N. Sami, S. H. Sunny, "A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers and Potential Solutions, Business Strategies and Policies", IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 73215-73252. [Online]. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917859

[24] T. Montes, M. Etxandi-Santolaya, J. Eichman, V. J. Ferreira, L. Trilla, C. Corchero, "Procedure for Assessing the Suitability of Battery Second Life Applications after EV First Life", Batteries, vol. 8, no. 122, 2022, pp. 1-19. [Online]. doi: 10.3390/batteries8090122

[25] J. Lacap, J. W. Park, L. Beslow, "Development and Demonstration of Microgrid System Utilizing Second-Life Electric Vehicle Batteries", Journal of Energy Storage, vol. 41, 102837, 2021, pp. 1-13. [Online]. doi: 10.1016/j.est.2021.102837

[26] S. Bobba, A. Podias, F. Di Persio, M. Messagie, P. Tecchio, A. Cusenza, U. Eynard, F. Mathieux, A. Pfrang, "Sustainability Assessment of Second Life Application of Automotive Bateries (SASLAB)", JRC Exploratory Research, Final technical report august 2018. [Online]. doi:10.2760/53624

[27] S. R. Das, P. K. Ray, A. K. Sahoo, K. K. Singh, G. Dhiman, A. Singh, "Artificial intelligence based grid connected inverters for power quality improvement in smart grid applications", Computers & Electrical Engineering, vol. 93, 2021, 107208. [Online]. doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107208

[28] M. Burlacu, V. Năvrăpescu, A. I. Chirilă, I. D. Deaconu, "Optimal reactive power management for microgrids based on photovoltaic inverters using sine-cosine algorithm", Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Electrotechnique et Energetique, vol. 67, no. 2, 2022, pp. 117–122. [Online]. https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/189/155

[29] D. Beriber, A. Talha, A. Kouzou, A. Guichi, F. Boukhafaa, "Multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems", Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Electrotechnique et Energetique, vol. 67, no. 2, 2022, pp. 105–110. [Online]. https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/111/168

[30] P. Kumar, M. Kumar, N. Pal, "An efficient control approach of voltage and frequency regulation in an autonomous microgrid", Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Electrotechnique et Energetique, vol. 66, no. 1, 2021, pp. 33–39. [Online]. https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/63/47

[31] Ordin nr. 228/2018 pentru aprobarea Normei tehnice "Condiții tehnice de racordare la rețelele electrice de interes public pentru prosumatorii cu injecție de putere activă în rețea", emitent ANRE - Autoritatea Națională de Reglementare în Domeniul Energiei. [Online].

https://lege5.ro/gratuit/gmytimzvhe4a/ordinul-nr-228-2018-pentru-aprobarea-normei-tehnice-conditii-tehnice-de-racordare-la-retelele-electrice-de-interes-public-pentru-prosumatorii-cu-injectie-de-putere-activa-in-retea

[32] https://www.greenpeace.org/romania/articol/1198/lucian-popescu-primul-roman-care-s-a-conectat-la-retea-cu-un-sistem-fotovoltaic-pentru-a-obtine-energie-curata/

[33] Directive 2018/2001 of the european parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union, 2018. [Online]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001

[34] https://anre.ro/wp-content/uploads/2023/05/Raport-prosumatori_2022.pdf

[35] M. Shafiullah, S. D. Ahmed, F. A. Al-Sulaiman, "Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems: A Review", IEEE Access, vol. 10, 2022, pp. 52233-52257, [Online]. doi:10.1109/ACCESS.2022.3174555

[36] Commission Regulation (EU) 2019/1782 laying down ecodesign requirements for external power supplies pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EC) No 278/2009, Official Journal of the European Union, 2019. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1782&from=es

[37] https://creator.fronius.com/pv-design

[38] International Standard ISO 2859-1, "Sampling procedures for inspection by attributes - Part 1: Sampling plans indexed by acceptable quality level (AQL) for lot-by-lot inspection", First edition, 1989, [Online]. https://sites.chemistry.unt.edu/~tgolden/courses/iso2859-1.pdf

[39] https://www.victronenergy.ro/panel-systems-remote-monitoring/vrm

[40] https://www.victronenergy.ro/upload/documents/Datasheet-MultiPlus-II-inverter-charger-RO.pdf

[41] United States Advanced Battery Consortium (USABC) - Battery Test Manual For Electric Vehicles, U. S. Department of Energy Vehicle Technologies Program, revision 3.1, 2020. [Online]. https://cet.inl.gov/ArticleDocuments/USABCElectricVehicleTestManualRev3.1.pdf

[42] E. Barsoukov, J. R. Macdonald, "Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications", Second Edition, Chapter 3.3, Wiley-Interscience, 2005, pp. 188-204. [Online]. https://www.biodyn.ro/course/literatura/Impedance%20Spectroscopy%20Theory%20Experiment%20And%20Applications%20Wiley%202004.pdf

[43] M. Orazem, B. Tribollet, "Electrochemical Impedance Spectroscopy", ECSThe Electrochemical Society Series, Wiley-Interscience, 2008. [Online]. https://www.researchgate.net/profile/Mazdak_Izadi/post/From_where_can_I_learn_about_Nyquist_and_bode_plots/attachment/59d6595979197b80779aee46/AS:542110975619072@1506260736303/download/Orazem+EIS.pdf

[44] C. Pastor-Fernandez, K. Uddin, G. H. Chouchelamane, W. D. Widanage, J. Marco, "A Comparison between Electrochemical Impedance Spectroscopy and Incremental Capacity-Differential Voltage as Li-ion Diagnostic Techniques to Identify and Quantify the Effects of Degradation Modes within Battery Management Systems", Journal of Power Sources, vol. 360, 2017, pp. 301-318. [Online]. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.042

[45] Ordonanţă de urgenţă 27/2022 privind măsurile aplicabile clienţilor finali din piaţa de energie electrică şi gaze naturale în perioada 1 aprilie 2022-31 martie 2023, Articolul 1, litera B [Online]. https://lege5.ro/Gratuit/geydsnbsgi3dk/art-1-ordonanta-de-urgenta-27-2022?dp=gq2tmnrrgu2tiny