



Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Microrețele inteligente. Dezvoltare aplicații management

Student-doctorand:
Andreea Ignat-Balaci

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Dorin PETREUȘ

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Dan Pitică** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Dorin Petreuş** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Adrian Graur** - Universitatea "Ștefan cel Mare", Suceava;

- Prof. Dr. Ing. **Dan Lascu** - Universitatea Politehnica Timișoara;

- Prof. Dr. Ing. **Corneliu Rusu** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

- Cluj-Napoca -
2021

Cuvinte cheie: *Microrețele inteligente, Energii regenerabile, Optimizarea costului, Control în timp real*

1. Introducere și motivarea tezei

O microrețea este un ansamblu de componente, ce include surse de generare a energiei, sisteme de stocare a ei și consumatori. Fiind proiectate pentru flexibilitate și pentru protecția mediului, microrețelele au în componență adesea surse regenerabile de energie, cum ar fi turbine eoliene, generatoare geotermale, generatoare cu biomasă/biogaz și panouri fotovoltaice pentru a acoperi cererea de energie electrică. Pe măsură ce guvernele lumii încep să impună prin legislație acoperirea unui procent din ce în ce mai mare din necesarul energetic folosind surse “verzi”, optimizarea costurilor de operare ale microrețelelor devine o necesitate.

Lucrarea de față, intitulată “Microrețele inteligente. Dezvoltare aplicații management”, își propune optimizarea costului de operare al unei microrețele izolate și validarea experimentală a soluțiilor.

2. Scopul și obiectivele tezei de doctorat

Scopul principal al tezei este minimizarea costului de operare al unei microrețele izolate prin utilizarea metodelor (algoritmilor) de programare în avans a utilizării resurselor (*Day-Ahead Scheduling*). Minimizarea costului de operare este, în sine, o problemă de optimizare cu un singur obiectiv: obținerea unui cost zilnic de operare cât mai mic în condițiile acoperirii în întregime a necesarului energetic și a utilizării elementelor microrețelei în parametri nominali. Limitarea metodelor de Day-Ahead Scheduling constă în predicția condițiilor meteorologice și a necesarului energetic de-a lungul zilei. Aceste metode de optimizare vor obține în realitate rezultatele calculate doar în condițiile în care cele două predicții sunt perfecte. Astfel, scopul secundar al lucrării este de a dezvolta și valida o metodă de control în timp real al microrețelei care să utilizeze programul de funcționare obținut în urma optimizării costului și să îl adapteze în situațiile în care cel puțin una dintre predicții nu corespunde cu realitatea.

În consecință, obiectivele tezei sunt următoarele:

- Optimizarea costului de operare al microrețelei propuse;
- Validarea metodelor de optimizare implementate;
- Dezvoltarea, implementarea și validarea unei metode de control în timp real al microrețelei.

3. Metodologia de cercetare

Metodologia utilizată presupune descrierea microrețelei propuse și definirea costurilor de operare ale elementelor ei, urmând ca apoi acestea să fie utilizate la definirea matematică a problemei de optimizare. Scopul optimizării este de a determina un program de funcționare a microrețelei prin care să se obțină un cost cât mai mic, dar care să nu contrazică scopul principal al microrețelei, și anume acoperirea întregului necesar energetic al consumatorilor. Problema de optimizare este rezolvată prin 3 metode, dintre care două sunt generale și utilizate în literatura de specialitate pentru o gamă largă de probleme de optimizare, iar una este o metodă dezvoltată pentru microrețeaua propusă. Rezultatele celor 3 metode sunt comparate și validate prin simulare. Metoda proprie este validată experimental și utilizată ca bază pentru implementarea unei metode de control în timp real al microrețelei.

În urma analizei rezultatelor, acestea au fost diseminate prin 6 lucrări publicate la conferințe internaționale, dintre care 5 sunt indexate *WOS* și una este indexată *BDI(IEEE)*.

4. Organizarea tezei

Structura lucrării include două părți: *Stadiul actual al cunoașterii* (capitolele 1 și 2) și *Contribuția personală* (capitolele 3-8).

Capitolul 1 este introductiv și descrie producția istorică și actuală de energie folosind surse regenerabile. Sunt descrise diverse arhitecturi și metode de control ale microrețelelor, iar managementul energetic este definit ca problemă de optimizare.

Capitolul 2 reprezintă fundamentarea teoretică și definește noțiuni de teoria probabilităților, variabile aleatoare, distribuții de probabilitate, optimizare matematică și management energetic. Metodele de optimizare sunt clasificate în urma unui studiu bibliografic.

Capitolul 3 se referă la formularea matematică a problemei de optimizare. Microrețeaua propusă în acest sens, ilustrată în Fig. 1, are în componență 3 unități de generare a energiei: un ansamblu de 12 panouri fotovoltaice ET-Solare de 250 W conectate la microrețea folosind invertorul SMA Sunny Boy 3600TL-21 de 3,8 kW (1), un generator geotermal (2) și un generator cu biogaz (3), ambele de 1,5 kW. Necesarul energetic al consumatorilor (4) este acoperit folosind cele 3 unități de generare și sistemul de stocare a energiei (5), format din 8 baterii VRLA de 12 V, 250 Ah, conectate la microrețea folosind invertorul SMA Sunny Island 6.0H, cu o capacitate de stocare de 24 kWh. Utilizarea fiecărei surse de energie este programată și controlată de sistemul de management energetic (6) în conformitate cu caracteristicile meteorologice și geografice ale locației în care este amplasată microrețeaua: județul Bihor, România. Sarcina principală este o seră de legume. Această microrețea este proiectată pentru funcționarea în modul izolat.

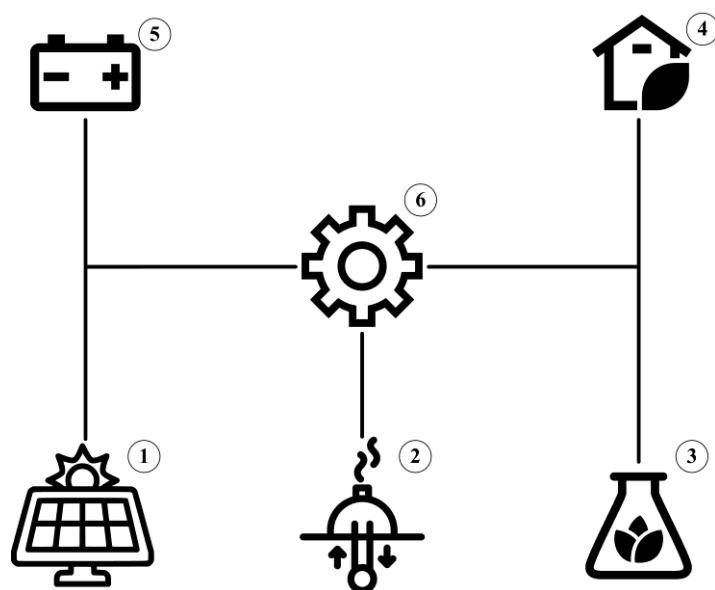


Figura 1. Microrețeaua propusă

Pentru optimizarea costului de operare al microrețelei sunt relevante valorile OPEX variabil ale elementelor ei, acestea putând fi observate în Tabelul 1.

Tabelul 1. Valorile OPEX variabil pentru elementele microrețelei propuse

		Panouri fotovoltaice	Generator cu biogaz	Generator geotermal	Baterii
OPEX variabil [\$/kWh]	de la	0,000	0,020	0,080	0,336
	până la	0,000	0,030	0,200	0,672

Scopul optimizării este definit prin ecuația 1:

$$\min f(X) = \sum_{t=1}^{24} \left(\begin{aligned} &E_{PV}(t) \cdot C_{PV} + E_{Geo}(t) \cdot C_{Geo} \\ &+ E_{Bio}(t) \cdot C_{Bio} + E_{BatDsch}(t) \cdot C_{Bat} \\ &- E_{BatCh}(t) \cdot C_{Bat} + E_{Excess}(t) \cdot C_{Excess} \\ &+ E_{Undel}(t) \cdot C_{Undel} \end{aligned} \right) \quad (1)$$

unde:

- $f(X)$ este funcția obiectiv a problemei de optimizare;
- X este matricea soluție a problemei de optimizare;
- $E_{PV}(t)$ = energia [Wh] generată de panourile fotovoltaice în intervalul orar $[t-1,t]$;
- $E_{Geo}(t)$ = energia [Wh] generată de generatorul geotermal în intervalul orar $[t-1,t]$;
- $E_{Bio}(t)$ = energia [Wh] generată de generatorul cu biogaz în intervalul orar $[t-1,t]$;
- $E_{BatDsch}(t)$ = energia [Wh] descărcată din baterii în intervalul orar $[t-1,t]$;
- $E_{BatCh}(t)$ = energia [Wh] încărcată în baterii în intervalul orar $[t-1,t]$;
- $E_{Excess}(t)$ = energia [Wh] produsă în exces în intervalul orar $[t-1,t]$;
- $E_{Undel}(t)$ = necesarul energetic [Wh] neacoperit în intervalul orar $[t-1,t]$;
- C_{PV} , C_{Geo} și C_{Bio} reprezintă costurile de operare aferente elementelor de generare;
- C_{Bat} reprezintă costul de operare al bateriilor;
- C_{Excess} și C_{Undel} reprezintă penalizări monetare pentru depășirea necesarului energetic, respectiv neacoperirea lui.

Minimizarea funcției obiectiv f constă în căutarea valorilor optime ale variabilelor de decizie $E_{PV}(t)$, $E_{Geo}(t)$, $E_{Bio}(t)$, $E_{BatDsch}(t)$, $E_{BatCh}(t)$, $E_{Excess}(t)$ și $E_{Undel}(t)$. Problema de optimizare are o constrângere de egalitate (ec. (2)) și două constrângeri de inegalitate (ec. (3) și (4)):

- Echilibrul de energie:

$$h(X) = 0 \quad (2)$$

$$h(X) = E_{Gen}(t) + E_{Bat}(t) + E_{Excess}(t) + E_{Undel}(t) + E_{Load}(t), t = 1, \dots, 24$$

unde:

- $E_{Gen}(t) = E_{PV}(t) + E_{Geo}(t) + E_{Bio}(t)$ (energia generată într-un interval orar);
- $E_{Bat}(t) = E_{BatDsch}(t) - E_{BatCh}(t)$ (energia încărcată în/descărcată din baterii într-un interval orar);
- $E_{Load}(t)$ = necesarul energetic ce trebuie acoperit într-un interval orar.

- Limitele sistemului de stocare a energiei:

$$g_1(X) \geq 0 \quad (3)$$

$$g_1(X) = E_s(t), t = 1, \dots, 24$$

$$g_2(X) \geq 0 \quad (4)$$

$$g_2(X) = E_{SLimit} - E_s(t), t = 1, \dots, 24$$

unde:

- $E_s(t) = E_s(t-1) - E_{Bat}(t)$ (cantitatea de energie stocată în baterii la sfârșitul intervalului orar);
- $E_{SLimit}(t) = 24 \text{ kWh}$ (capacitatea nominală a sistemului de stocare a energiei).

Valorile $E_s(t)$ obținute prin soluția problemei de optimizare sunt utilizate pentru calcularea valorilor State of Charge (SoC) aferente fiecărui interval orar după cum urmează:

$$SoC(t) = \frac{E_s(t) \cdot 100}{E_{SLimit}} \quad (5)$$

Pentru ca o soluție a problemei de optimizare să fie considerată validă variabilele de decizie $E_{Excess}(t)$ și $E_{Undel}(t), t = 1, \dots, 24$ trebuie să fie egale cu 0, acestea având un scop pur teoretic în formularea problemei de optimizare. În realitate, o situație în care $E_{Undel}(t) \neq 0$ poate să apară doar dacă $E_s(t) = 0$. În rest, necesarul energetic va fi acoperit prin descărcarea acumulatorilor. În mod similar, putem avea $E_{Excess}(t) \neq 0$ doar dacă $E_s(t) = E_{SLimit}$. Acest caz limită duce la disiparea excesului de energie prin efect termic. În rest, cantitatea de energie generată în plus va fi încărcată în acumulatori. Cele două variabile de decizie au fost incluse în problema de optimizare pentru verificarea mai ușoară a soluțiilor acesteia.

Profilul de consum utilizat în calcule este estimat pentru fiecare interval orar. De vreme ce algoritmi sunt utilizați pentru planificarea în avans a utilizării resurselor, rezultatele obținute sunt evaluate în funcție de costul zilnic de operare al microrețelei.

Capitolul 4 descrie implementarea și testarea metodei de căutare a armoniei (Harmony Search - HS). Aceasta este o metodă metaeuristică de optimizare inspirată din procesul prin care muzicienii obțin o melodie plăcută. În acest caz calitatea estetică a muzicii este înlocuită de funcția obiectiv. Deoarece tonalitățile instrumentelor influențează calitatea generală a muzicii, acestea sunt reprezentate de variabilele de decizie ale problemei de optimizare, ele formând matricea soluție.

În procesul de optimizare o variabilă de decizie poate să primească o valoare din memoria armoniilor (Harmony Memory - HM), o valoare din HM care a fost ușor ajustată sau o valoare generată aleatoriu în intervalul posibil definit la începutul procesului de optimizare. Numărul de armonii existente în HM poartă denumirea de dimensiune a memoriei armoniilor (Harmony Memory Size - HMS). Există 3 parametri care influențează performanțele algoritmului: rata utilizării memoriei armoniilor (Harmony Memory Considering Rate - HMCR), rata de ajustare a pasului (Pitch Adjustment Rate - PAR) și lățimea de bandă (bandwidth - bw). Probabilitatea de a alege o armonie din HM este HMCR. PAR reprezintă probabilitatea ajustării unei armonii din HM. bw este utilizat pentru a obține un echilibru între procesul local de optimizare și cel global. Ajustarea unei soluții existente în HM se realizează folosind următoarea formulă:

$$valoareNouă = valoareVeche \pm r \cdot bw \quad (6)$$

unde r este un număr generat aleatoriu în intervalul $[0,1)$.

După ce variabilele de decizie primesc valori noi și se formează o nouă soluție posibilă, aceasta este evaluată folosind funcția obiectiv. Dacă noua soluție îndeplinește toate

constrângerile și este mai bună decât cea mai defavorabilă soluție din HM, atunci aceasta din urmă va fi înlocuită.

Costurile de operare obținute pentru câte o zi tipică a fiecărei luni din an folosind metoda HS sunt comparate cu cele obținute folosind metoda Mixed Integer Linear Programming (MILP). Aceasta din urmă este o metodă clasică, matematică, utilizată pentru rezolvarea acestui tip de problemă de optimizare, rezultatele ei fiind utilizate ca referință în timpul implementării și testării metodelor de optimizare prezentate în această lucrare. Pentru fiecare set de date de intrare metoda HS a generat soluții cu costuri mai mici decât metoda MILP.

Capitolul 5 descrie implementarea și testarea optimizării roiului de particule (Particle Swarm Optimization - PSO). Aceasta este o metodă stocastică de optimizare bazată pe populație utilizată pentru rezolvarea atât a problemelor continue de optimizare, cât și a celor discrete. Aceasta face parte din disciplina inteligenței roiului. În această metodă agenți software simpli, denumiți particule, se deplasează prin spațiul de căutare definit. Poziția unei particule reprezintă o posibilă soluție a problemei. Fiecare particulă caută poziții din ce în ce mai favorabile prin schimbarea vitezei conform unor reguli inspirate din comportamentul bancurilor de pești și a stolurilor de păsări în căutarea hranei.

În PSO roiul este format dintr-un set de particule. Poziția unei particule corespunde unei posibile soluții a problemei de optimizare, reprezentată prin funcția obiectiv. În orice moment particula are asociate o poziție și o viteză. Implementarea începe cu generarea aleatoare a pozițiilor particulelor din roi în cadrul spațiului de căutare definit. În timpul rulării vitezele și pozițiile particulelor sunt modificate iterativ până când este atinsă condiția de oprire. Modalitatea de actualizare a vitezei și poziției unei particule este reprezentată prin ec. (7) și (8):

$$v_{it+1} = wv_{it} + \phi_1 r_1 (b_{it} - x_{it}) + \phi_2 r_2 (l_{it} - x_{it}) \quad (7)$$

$$x_{it+1} = x_{it} + v_{it+1} \quad (8)$$

unde w reprezintă ponderea inerției, ϕ_1 și ϕ_2 poartă denumirea de coeficienți de accelerație, r_1 și r_2 sunt numere generate aleatoriu în intervalul $[0,1]$, b_{it} este cea mai favorabilă poziție obținută de particulă, iar l_{it} este cea mai favorabilă poziție obținută de întregul roi.

Rezultatele obținute folosind metoda PSO sunt comparate cu cele obținute folosind metodele MILP și HS. Metoda MILP a fost depășită de către metodele stocastice în aproape fiecare lună. Excepțiile reprezintă costurile de operare obținute prin metoda PSO pentru zile din lunile iunie, iulie și august. Metoda PSO oferă rezultate bune în lunile reci ale anului, în timp ce metoda HS oferă rezultate bune în lunile calde.

Capitolul 6 descrie dezvoltarea, implementarea și testarea unei metode proprii de optimizare, denumită metoda stocastic-dinamică (SD). Spre deosebire de metodele HS și PSO, metoda SD este o metodă de optimizare creată special pentru problema de optimizare definită mai sus. Scopul dezvoltării unei metode personalizate de optimizare a fost acela de a evita neajunsurile observate în timpul implementării și testării metodelor generale de optimizare. Cele două metode de optimizare descrise mai sus utilizează populații inițiale de soluții generate aleatoriu și reguli complicate pentru generarea soluțiilor noi, care implică un număr mare de parametri ale căror valori trebuie descoperite empiric în funcție de problema de optimizare pentru care sunt aplicate. Ambele caracteristici au provocat probleme în timpul testării și depanării programelor implementate și au determinat necesitatea aplicării unor

corecții asupra soluțiilor oferite. Din aceste motive s-a decis implementarea unei metode proprii de optimizare, care să aibă un caracter stocastic și să fie ușor de configurat.

Metoda SD a avut ca scop evitarea neajunsurilor întâmpinate prin eliminarea populației inițiale și utilizarea unei metode mai simple de generare a posibilelor noi soluții. Astfel metoda proprie are doar 2 parametri specifici, α și β . Cu cât este mai mare valoarea lui α , cu atât crește probabilitatea de acoperi întregul necesar energetic. Cu cât este mai mare valoarea lui β , cu atât crește probabilitatea de a acoperi necesarul energetic folosind energia stocată în baterii. La fiecare iterație parametrii α și β sunt comparați cu valori generate aleatoriu în intervalul $[0,1]$, fiind definite astfel 3 metode de generare a posibilelor noi soluții:

- o metodă utilizată pentru intervalele orare în care necesarul energetic este foarte mic;
- o metodă în care necesarul energetic este acoperit prin utilizarea elementelor de generare în ordinea crescătoare a costurilor lor de operare;
- o metodă în care necesarul energetic este acoperit în mare parte prin descărcarea acumulatorilor.

Pentru cea de-a doua metodă de generare noua valoare a unei variabile de decizie este obținută după cum urmează:

$$X_i = r \cdot X_{i \max} \quad (9)$$

unde r aleatoriu în intervalul $[0,1]$, iar $X_{i \max}$ este valoarea maximă a variabilei de decizie.

Metoda de optimizare dezvoltată este o combinație între programarea dinamică și cea stocastică. Având în vedere faptul că problema de optimizare poate fi împărțită instinctiv în 24 de subprobleme, câte una pentru fiecare interval orar, programarea dinamică este o soluție naturală pentru rezolvarea ei. Pe de altă parte, pentru a obține varietatea soluțiilor oferite de metodele stocastice și evitarea rezolvării unui sistem complicat de ecuații, se utilizează variabile ale căror valori sunt generate aleatoriu pentru obținerea posibilelor noi soluții.

Tabelul 2 reprezintă centralizarea costurilor de operare zilnice obținute folosind metoda MILP și cele 3 metode de optimizare implementate în lucrarea de față. După cum se poate observa, cele mai mici costuri de operare au fost obținute cu ajutorul metodei proprii de optimizare.

Tabelul 2. Costurile de operare zilnice obținute pentru fiecare lună a anului [\$]

Luna	MILP	HS	PSO	SD
Ianuarie	0,83368	0,563176	0,516328	0,3012
Februarie	0,7827	0,557368	0,512108	0,390692
Martie	0,73028	0,55368	0,477628	0,307324
Aprilie	0,62064	0,579932	0,477668	0,285776
Mai	0,37621	0,240036	0,371468	0,174164
Iunie	0,22219	0,19902	0,327112	0,176388
Iulie	0,20558	0,189248	0,36526	0,089004
August	0,35763	0,172988	0,384388	0,169404
Septembrie	0,62907	0,499768	0,453308	0,322304
Octombrie	0,74412	0,616192	0,480848	0,343924
Noiembrie	0,81262	0,657828	0,508488	0,378004
Decembrie	0,9108	0,575764	0,522108	0,26892

Capitolul 7 se referă la testarea prin simulare a celor 3 metode de optimizare, validarea experimentală a metodei proprii de optimizare și implementarea metodei de control în timp real al microrețelei.

Pentru validarea soluțiilor de metodele optimizare a fost utilizată o simulare de tipul Model in the Loop. Modelul MATLAB/Simulink al microrețelei propuse include toate elementele acesteia și este ilustrat în Figura 2.

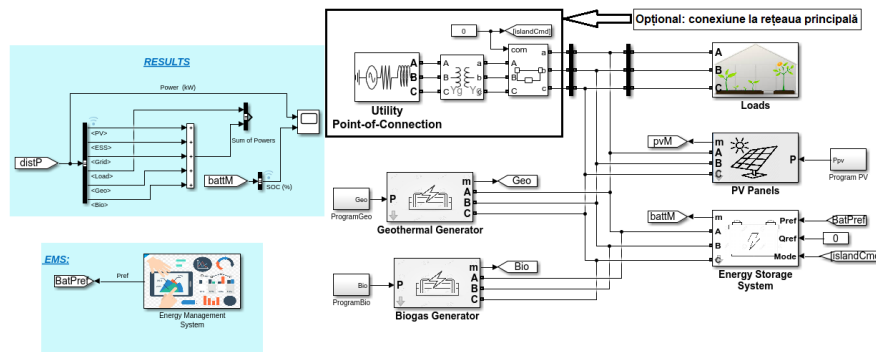


Figura 2. Modelul microrețelei propuse

Au fost simulate programele de funcționare generate de către cele 3 metode de optimizare pentru o zi din luna octombrie. Pentru fiecare soluție au fost comparate valorile SoC calculate și cele obținute prin simulare cu scopul de a determina soluția cu performanțele cele mai bune. Fiecare simulare oferă două grafice: primul ilustrează puterea generată și cea consumată, iar cel de-al doilea ilustrează variația SoC de-a lungul celor 24 de ore simulate. Tabelele 3-5 de mai jos compară rezultatele obținute prin calcule cu cele obținute prin simulare pentru soluțiile celor 3 metode de optimizare. După cum se poate observa, cele mai mici diferențe dintre calcule și simulări au fost obținute pentru soluția oferită de metoda SD. Cele mai mari diferențe apar la soluția oferită de metoda HS.

Tabelul 3. Comparația valorilor SoC pentru metoda HS [%]

	t=9	t=16	t=24
SoC calculat	88,9417	96,2583	95,1583
SoC simulat	89,74	96,69	97,09
Diferență	0,7983	0,4317	1,9317

Tabelul 4. Comparatia valorilor SoC pentru metoda PSO [%]

	t=9	t=16	t=24
SoC calculat	93,93	100	97,508
SoC simulat	93,58	98,72	97,86
Diferență	0,35	1,28	1,9317

Tabelul 5. Comparația valorilor SoC pentru metoda SD [%]

	t=9	t=16	t=24
SoC calculat	93,2917	93,2917	96,8167
SoC simulat	93,08	93,05	96,82
Diferență	0.2117	0.2417	0.0033

Cu ajutorul simulărilor putem observa că toate cele 3 soluții sunt valide, dar, chiar dacă mici diferențe dintre calcule și simulări sunt de așteptat, diferențe mari dintre cele două semnifică faptul că soluția generată de metoda de optimizare nu este ideală în ceea ce privește uzura echipamentului chiar dacă este corectă din punct de vedere matematic și respectă setul de constrângeri al problemei de optimizare.

Având în vedere faptul că metoda SD a generat rezultate mai bune decât celelalte două metode de optimizare, s-a decis validarea experimentală a acesteia. Figura 3 de mai jos ilustrează microrețeaua experimentală.

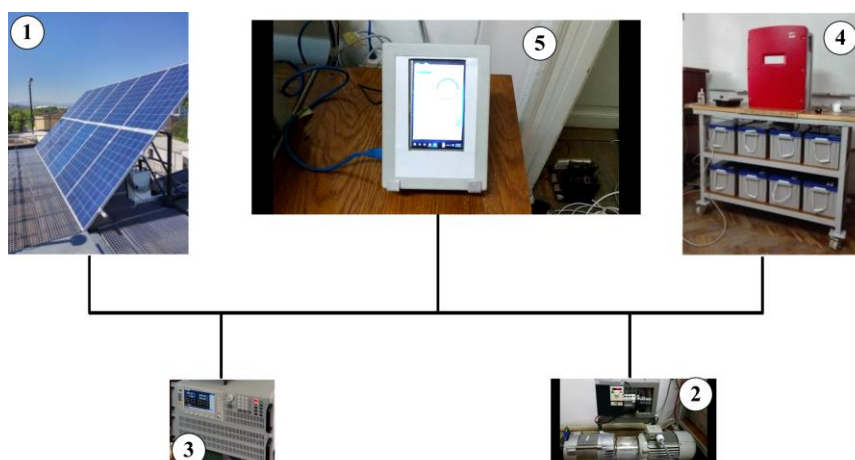


Figura 3. Microrețeaua experimentală

Aceasta are în componență următoarele elemente:

- (1) 12 panouri fotovoltaice ET-Solar de 250 W, conectate la microrețea folosind invertorul SMA Sunny Boy 3600TL-21 de 3,8 kW;
- (2) un emulator pentru generatorul geotermal ce poate genera o putere maximă de 1 kW;
- (3) o sarcină electronică;
- (4) un sistem de stocare a energiei format din 8 baterii VRLA de 12V, 200 Ah, conectate la microrețea folosind invertorul SMA Sunny Island 6.0H, cu o capacitate de stocare de 19,2 kWh;
- (5) un sistem de management energetic.

Diferențele dintre microrețeaua propusă și cea experimentală sunt următoarele:

- capacitatea redusă de generare a emulatorului generatorului geotermal;
- indisponibilitatea emulatorului generatorului cu biogaz;
- capacitatea redusă de stocare a energiei;
- profil tipic de generare al panourilor fotovoltaice diferit datorită locației geografice.

Având în vedere diferențele de mai sus, pentru validarea experimentală au fost necesare modificări ale problemei de optimizare, metodei de optimizare și modelului de simulare. În plus, validarea experimentală a metodei SD a implicat compararea rezultatelor obținute cu ajutorul acesteia cu cele obținute folosind un algoritm de management energetic bazat pe SoC, dezvoltat și implementat anterior pentru aceeași microrețea. Datorită limitărilor metodelor de day-ahead scheduling, și anume faptul că acestea se bazează pe predicțiile meteo-logice și de consum, pentru compararea performanțelor celor două metode a fost necesară elaborarea unei metode accelerate de testare. Corelația dintre timpul simulat și duratele relevante din cele două experimente sunt prezentate în Tabelul 6.

Tabelul 6. Corelația dintre timpul simulat și duratele relevante din experimente

Simulare	Experiment
24 h	4 h
1 h	10 min
1 min	10 s

Pentru început, soluția oferită de metoda SD a fost simulată pentru validare. Apoi, aceeași soluție a fost transformată pentru testul accelerat. După rularea testului pe microrețeaua

experimentală, raportul generat de către sistemul de management energetic a fost utilizat pentru generarea unor grafice care ilustrează puterea generată de către panourile fotovoltaice, puterea generată de către emulatorul generatorului geotermal și variația SoC. Figurile 4, 6 și 8 de mai jos ilustrează rezultatele obținute prin simulare, iar Figurile 5, 7 și 9 cele obținute în timpul experimentului.

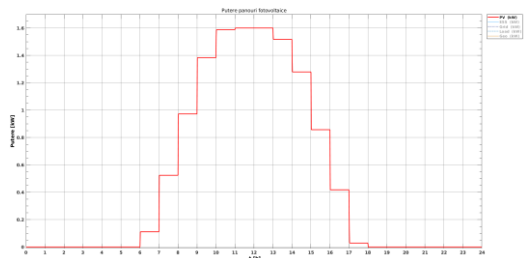


Figura 4. Puterea generată de panourile fotovoltaice - simulare

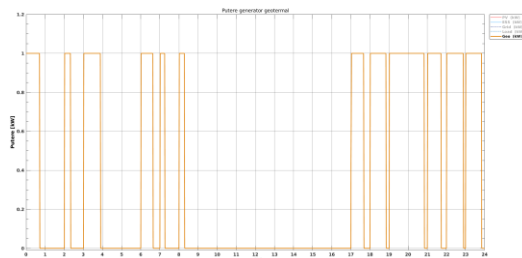


Figura 6. Puterea generată de generatorul geotermal - simulare

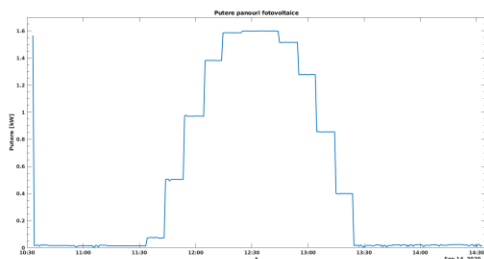


Figura 5. Puterea generată de panourile fotovoltaice - experiment

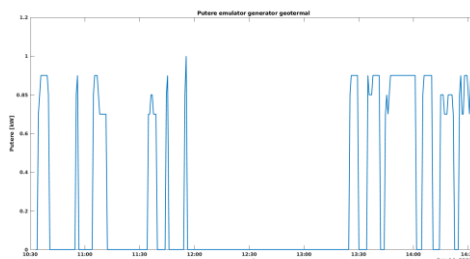


Figura 7. Puterea generată de emulatorul generatorului geotermal - experiment

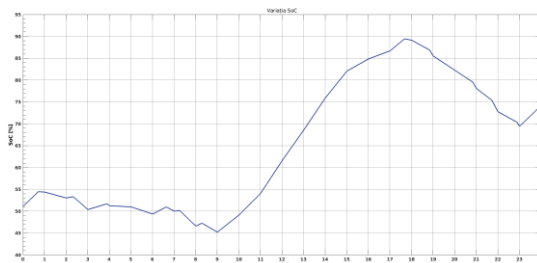


Figura 8. Variația SoC - simulare

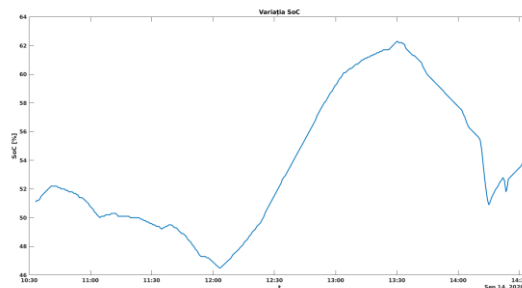


Figura 9. Variația SoC - experiment

Putem observa că graficele obținute prin simulare și cele obținute prin experiment au aceeași formă. A fost utilizat același profil de generare al panourilor fotovoltaice și același program de funcționare al generatorului/emulatorului. Prin comparația graficelor variației SoC putem concluziona faptul că soluția generată de metoda SD este una validă.

Ce de-a doua etapă a experimentului a implicat testarea algoritmului de management bazat pe SoC în aceleași condiții (aceleași profil de generare al panourilor fotovoltaice și același profil de consum). Figurile 10, 11 și 12 de mai jos ilustrează graficele obținute prin prelucrarea raportului generat de sistemul de management energetic după cel de-al doilea experiment.

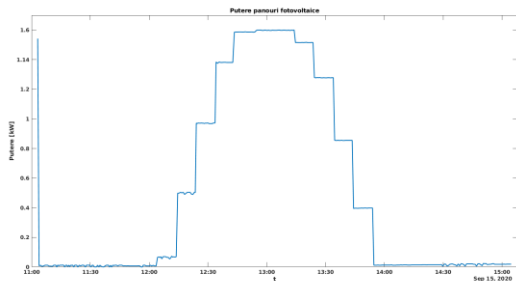


Figura 10. Puterea generată de panourile fotovoltaice – cel de-al doilea experiment

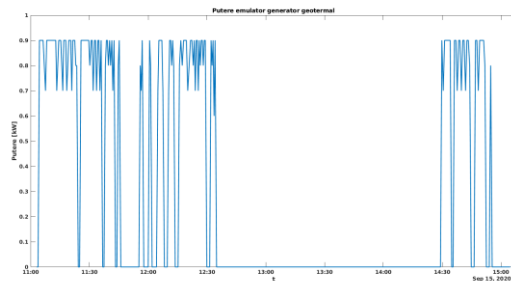


Figura 11. Puterea generată de emulatorul generatorului geotermal – cel de-al doilea experiment

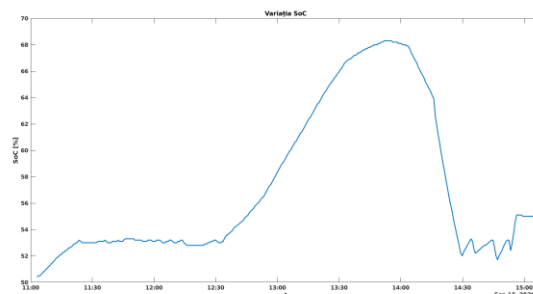


Figura 12. Variația SoC – cel de-al doilea experiment

Condițiile celui de-al doilea experiment coincid cu condițiile primului. Tabelul de mai jos reprezintă comparația costurilor de operare obținute în urma celor două experimente. Acestea au fost calculate prin scalarea datelor din cele două rapoarte pentru un interval de 24 de ore și calcularea valorii funcției obiectiv.

Tabelul 7. Comparația costurilor de operare obținute

	Metoda SD	Algoritmul de management energetic	Diferență
Cost minim	-0,99 \$	-0,74 \$	0,25 \$
Cost maxim	-0,64 \$	-0,51 \$	0,13 \$
Cost mediu	-0,81 \$	-0,62 \$	0,19 \$

Putem concluziona faptul că utilizarea unei metode de optimizare a costului aduce beneficii monetare. Costurile de operare obținute sunt negative datorită încărcării acumulatorilor pe parcursul simulării și a celor două experimente. Conform funcției obiectiv, încărcarea acumulatorilor scade costul de operare al microrețelei.

Nevoia de a implementa o metodă de control în timp real provine din limitarea metodelor de day-ahead scheduling. În consecință, metoda de control implementată urmărește programul de funcționare generat de către metoda SD ca soluție pentru microrețeaua experimentală cât timp valoarea SoC simulată pentru fiecare interval orar rămâne la $\pm 2\%$ față de cea calculată. După cum se poate observa în Figura 13 de mai jos, generatorul geotermal funcționează conform programului cât timp valoarea SoC rămâne între limitele definite. Dacă valoarea SoC depășește limita maximă sau ajunge sub ea, atunci generatorul geotermal va fi oprit, respectiv pornit.

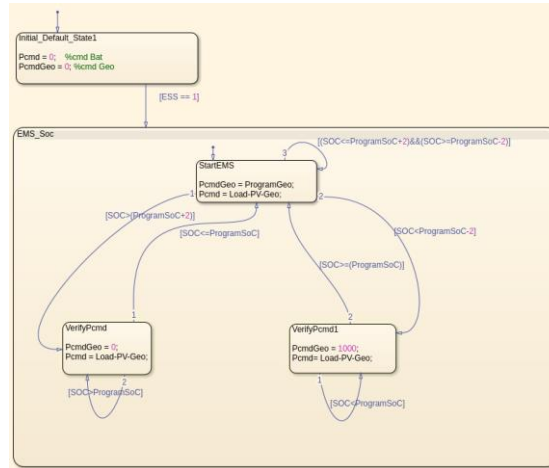


Figura 13. Logica de decizie a metodei de control în timp real

Pentru a testa metoda de control au fost create 4 scenarii de test. Primul scenariu este unul de control, utilizat pentru a verifica faptul că programul de funcționare este urmărit. Cel de-al doilea scenariu este unul în care a fost modificat profilul de generare al panourilor fotovoltaice. Cel de-al treilea a implicat modificări ale profilului de consum. Cel de-al patrulea scenariu a intridus modificările aduse prin cel de-al doilea și cel de-al treilea. Figurile 14-18 de mai jos ilustrează graficele puterilor generate și puterii consumate obținute prin rularea simulării microrețelei experimentale întâi fără și apoi cu metoda de control.

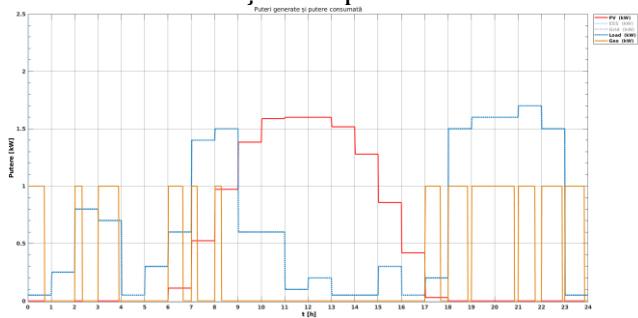


Figura 14. Simularea fără metoda de control în timp real

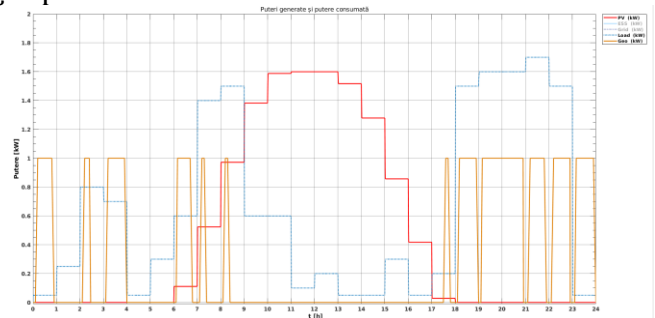


Figura 15. Simularea scenariului de control

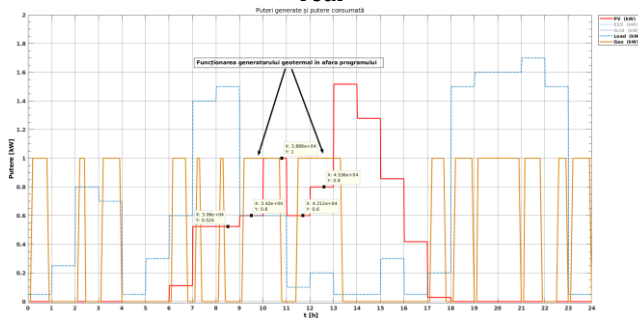


Figura 16. Simularea celui de-al doilea scenariu de test

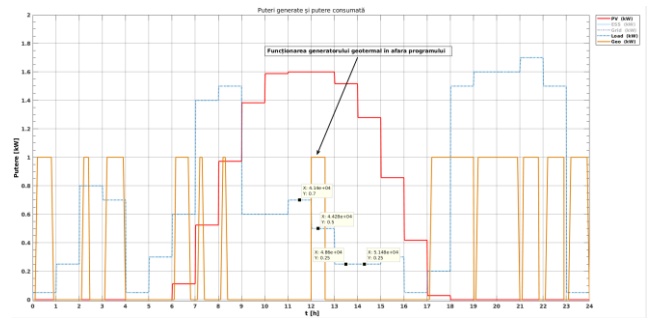


Figura 17. Simularea celui de-al treilea scenariu de test

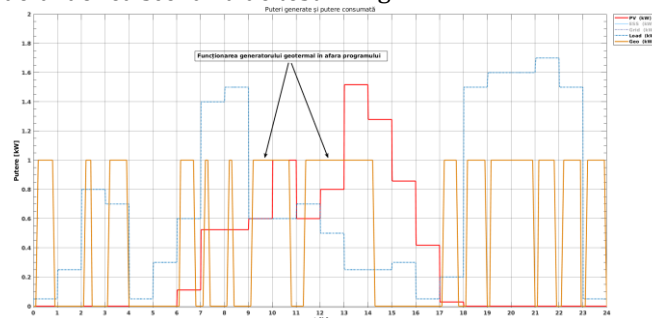


Figura 18. Simularea celui de-al patrulea scenariu de test

Figurile 14 și 15 de mai sus ilustrează simularea aceluiași program de funcționare, prima dată fără metoda de control și a doua oară cu ea. Profilul de generare al panourilor fotovoltaice și profilul de consum sunt identice. Din acest motiv în Figura 15 generatorul geotermal urmează programul de funcționare. În Figura 16 cursoarele indică intervalele orare în care profilul de generare al panourilor fotovoltaice a fost modificat. Se poate observa funcționarea generatorului geotermal în afara programului pentru acoperirea necesarului energetic. Figura 17 ilustrează graficele puterilor generate și al puterii consumate pentru cel de-al treilea scenariu de test. Aici cursoarele indică intervalele orare în care profilul de consum a fost modificat. Se poate observa funcționarea generatorului geotermal în afara programului pentru acoperirea necesarului energetic. În Figura 18 poate fi observat efectul pe care îl are cumularea modificărilor din cel de-al doilea și cel de-a treilea scenariu. Și în această situație este acoperit necesarul energetic.

În tabelul de mai jos sunt comparate valorile SoC obținute prin cele 5 simulări.

Tabelul 8. Comparația valorilor SoC obținute prin cele 5 simulări

t	Fără metodă de control	Scenariul de control	Cel de-al doilea scenariu de test	Cel de-al treilea scenariu de test	Cel de-al patrulea scenariu de test
1	54,49	54,63	54,63	54,63	54,63
2	53,14	53,39	53,39	53,39	53,39
3	50,52	50,72	50,72	50,72	50,72
4	51,4	51,31	51,31	51,31	51,31
5	51,1	51,04	51,04	51,04	51,04
6	49,48	49,55	49,55	49,55	49,55
7	50,14	50,45	50,45	50,45	50,45
8	46,74	47,1	47,1	47,1	47,1
9	45,35	45,48	43,1	45,48	43,1
10	49,2	49,67	48,06	49,67	48,06
11	54,14	55,02	52,39	55,02	52,39
12	61,61	63,14	59,44	59,91	56,22
13	68,62	70,74	68,12	69,09	63,26
14	75,95	78,69	78,21	76,23	75,78
15	82,11	85,37	84,89	82,09	83,81
16	84,92	88,42	87,94	85,14	86,86
17	86,77	90,43	89,94	87,15	88,87
18	89,24	90,67	92,32	89,52	91,25
19	85,69	87,22	88,96	86,16	87,88
20	82,39	83,44	85,17	83,16	84,1
21	78,27	80,44	82,17	80,16	81,1
22	72,94	75,66	75,18	74,8	76,32
23	69,59	72,15	71,67	71,12	72,81
24	73,44	76,17	75,89	75,13	76,99

Analizând datele din Tabelul 8 putem trage următoarele concluzii:

- valorile SoC corespunzătoare scenariului de control sunt foarte apropiate de cele obținute prin simularea programului de funcționare fără metoda de control;
- în primele 8 intervale orare valorile SoC obținute în cele 4 scenarii de test sunt identice datorită faptului că în acele intervale nu au fost efectuate modificări și, în consecință, a fost urmat programul de funcționare;
- în intervalele orare aferente lui $t = 9, 10$ și 11 valorile obținute în cel de-al doilea și cel de-al patrulea scenariu sunt identice datorită modificării profilului de generare al panourilor fotovoltaice în acele intervale și demonstrând astfel utilizarea aceleiași metode de control;

- în cel de-al doilea, cel de-al treilea și cel de-al patrulea test cele mai mari diferențe față de scenariul de control apar în intervalele orare aferente lui $t = 9-13$, când au fost efectuate modificările; în toate cele 3 situații se poate observa faptul că metoda de control a compensat pentru diferențe;
- diferențele de la sfârșitul simulărilor sunt foarte mici.

Timpul de simulare obținut este de 6 – 10 secunde, iar calculatorul utilizat pentru simulări are următoarele specificații:

- procesor Intel(R) Core(TM) i7-4720HQ CPU @ 260 GHz (1 procesor fizic, 4 core-uri, 8 fire de execuție);
- memorie RAM: 16 GB;
- sistem de operare: Ubuntu 20.04.1 LTS.

Capitolul 8 prezintă concluziile finale și contribuțiile personale.

5. Contribuții personale

Contribuțiile personale aduse prin această lucrare sunt:

1. Formularea matematică a problemei de optimizare, cu evidențierea diferențelor dintre ecuații și realitate.
2. Definirea scopului optimizării costului de operare al microrețelei și a limitărilor acesteia.
3. Implementarea metodei de căutare a armoniei pentru problema de optimizare definită.
4. Analizarea soluțiilor generate de metoda HS și corecția lor pentru a le asigura viabilitatea.
5. Identificarea cazurilor în care soluțiile generate prin metoda HS, deși corecte, nu sunt ideale.
6. Implementarea optimizării roiului de particule pentru problema de optimizare definită.
7. Analizarea soluțiilor generate prin metoda PSO și corecția lor pentru a le asigura viabilitatea.
8. Identificarea cazurilor în care soluțiile generate prin metoda PSO, deși corecte, nu sunt ideale.
9. Identificarea cazurilor în care metodele generale de optimizare utilizate au lăsat de dorit.
10. Propunerea, dezvoltarea și implementarea unei metode proprii de optimizare care să ofere avantajele metodelor generale și să evite dezavantajele lor.
11. Demonstrarea atingerii scopurilor propuse pentru metoda SD prin compararea rezultatelor obținute folosind metoda proprie cu cele obținute folosind metodele generale de optimizare prezentate mai devreme.
12. Crearea unui model de simulare pentru microrețeaua propusă.
13. Adaptarea rezultatelor metodelor de optimizare pentru a putea fi simulate.
14. Simularea rezultatelor celor 3 metode de optimizare și demonstrarea eficienței metodei proprii de optimizare prin analiza rezultatelor obținute.
15. Dezvoltarea unei metodologii de testare pentru validarea experimentală a metodei de optimizare proprii.
16. Adaptarea problemei de optimizare, a metodei de optimizare și a modelului de simulare pentru microrețeaua experimentală.
17. Simularea microrețelei experimentale împreună cu noua formă a metodei de optimizare.

18. Validarea experimentală a metodei proprii de optimizare.
19. Demonstrarea utilității metodei de optimizare a costului prin compararea rezultatelor obținute experimental cu cele obținute prin testarea aceluiași scenariu folosind un algoritm de management energetic bazat pe State of Charge.
20. Dezvoltarea și validarea prin simulare a unei metode de control în timp real al microrețelei.

6. Direcții de continuare a cercetării

Direcțiile în care această lucrare poate fi continuată sunt:

1. Dezvoltarea unor metode noi de optimizare a costului de operare, direcție posibilă datorită lipsei unei soluții care să nu poată fi îmbunătățită (în momentul de față).
2. Adăugarea de obiective de optimizare la problemă, cum ar fi creșterea duratei de viață a acumulatorilor.
3. Definirea problemei pentru o microrețea conectată la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice și optimizarea costului pentru maximizarea profitului.
4. Dezvoltarea unor metode de *Real-Time Scheduling* bazate pe optimizarea costului.

7. Listă de publicații

Lucrări din domeniul tezei indexate **WOS**:

- E. Lazar, A. Ignat, D. Petreus and R. Etz, "Energy Management for an Islanded Microgrid Based on Harmony Search Algorithm," 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Zlatibor, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISSE.2018.8443673.
- A. Ignat, E. Lazar and D. Petreus, "Energy Management for an Islanded Microgrid Based on Particle Swarm Optimization," 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Iasi, 2018, pp. 213-216, doi: 10.1109/SIITME.2018.8599272.
- A. Ignat, E. Lazar and D. Petreus, "Real-Time Scheduling for an Islanded Microgrid," 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Cluj-Napoca, Romania, 2019, pp. 351-354, doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990861.
- A. Ignat, D. Petreus and E. Lazar, "Cost Optimization and Day-Ahead Scheduling for a Renewable Energy Microgrid," 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wroclaw, Poland, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISSE.2019.8810290.
- A. Ignat, E. Szilagyi and D. Petreus, "Renewable Energy Microgrid Model using MATLAB — Simulink," 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Demanovska Valley, Slovakia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9120923.

Lucrări din domeniul tezei indexate **BDI(IEEE)**:

- A. Ignat, E. Szilagyi and D. Petreus, "Islanded Microgrid Simulation and Cost Optimisation," 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti, Romania, 2020, pp. 426-429, doi: 10.1109/SIITME50350.2020.9292153.

Lucrări din domeniul tezei trimise spre evaluare:

- A. Ignat, E. Szilagyi and D. Petreus, "Day-Ahead Scheduling, Simulation, and Real-Time Control of an Islanded Microgrid" – Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE).