



Academia Oamenilor de Știință din România

Proiect finanțat prin AOSR-Teams 2022

Domeniul „4. Asigurarea independenței energetice a României”



Universitatea Politehnica di București

Facultatea de Energetică

Departamentul Sisteme Electroenergetice

Pachet software bazat pe inteligență artificială pentru managementul energetic optim în scopul creșterii independenței energetice a României

Raportul intermediar numărul 2

Membrii echipei:

Ș.l. dr. ing. Dorian Sidea

Ș.l. dr. ing. Irina Picioroagă

As. drd. ing. Andrei Tudose

1. Raport de activitate pentru perioada iulie-decembrie 2022

În perioada iulie – decembrie 2022, activitățile din cadrul proiectului au fost concentrate pe publicarea unui articol într-o revistă cotate ISI, încadrată în categoria Q1. Scopul articolului realizat este optimizarea puterilor active și reactive într-o microrețea ce integrează un număr mare de surse distribuite de energie (SD), vehicule electrice (VE), sisteme de stocare a energiei electrice (SSEE) și baterii cu condensatoare (BC), pentru reducerea pierderilor de energie activă. În acest scop, se determină programarea optimă a încărcării și descărcării SSEE, a încărcării VE și a puterii reactive generate de SD și BC pentru o microrețea cu ajutorul unui algoritm metaeuristic. Articolul realizat de membrii echipei este intitulat: „*Two-stage Optimal Active-Reactive Power Coordination for Microgrids with High Renewable Sources Penetration and Electrical Vehicles Based on Improved Sine-Cosine Algorithm*” și a fost trimis spre publicare la revista „*Mathematics*”, încadrată în categoria JCR Q1 cu un factor de impact de 2.592. Principalele activități ale echipei de cercetare au constat în:

- Formularea unei probleme complexe de optimizare a puterilor active și reactive într-o microrețea cu scopul reducerii pierderilor de energie.

În cadrul acestei etape, a fost definită funcția obiectiv pentru minimizarea pierderilor de energie pe durata unei zile și vectorul variabilelor de control care constă în puterile active absorbite sau injectate de SSEE, timpul de începere a încărcării VE, puterea reactivă debitată de SD și treapta de funcționare a BC. Restricțiile de egalitate au scopul de a asigura calculul regimului permanent, iar restricțiile de inegalitate asigură respectarea limitelor dispozitivelor implicate în procesul de optimizare și respectarea criteriilor de securitate statică a microrețelei.

- Adaptarea modelului matematic pentru algoritmi metaeuristici

Rezolvarea problemei de optimizare formulate se realizează, în articolul de față, cu ajutorul algoritmilor metaeuristici, rezultând necesitatea adaptării modelului matematic în acest scop. În primul rând, optimizarea puterilor active și reactive au fost separate prin rezolvarea problemei de optimizare în două etape succesive. Astfel, prima etapă se concentrează pe controlul puterii active și constă în programarea optimă perioadelor de încărcare și descărcare a sistemelor de stocare și a perioadelor de încărcare ale autovehiculelor electrice. A doua etapă constă în controlul puterii reactive debitate de sursele distribuite și de bateriile cu condensatoare și este aplicată considerând programarea optimă a SSEE și VE realizată în prima etapă. Pentru asigurarea respectării restricțiilor de egalitate se rezolvă regimul permanent cu ajutorul metodei ascendent-descendent, integrată în funcția obiectiv, iar respectarea restricțiilor de inegalitate este asigurată prin impunerea limitelor inferioare și superioare pentru variabilele de control sau prin introducerea a două funcții de penalizare. Prima funcție de penalizare definită de membrii echipei are ca scop menținerea nivelului de încărcare a SSEE între limitele propuse, iar cea de-a doua menținerea tensiunilor la noduri și curenților prin laturile microrețelei în limitele admisibile.

- Dezvoltarea Algoritmului Sinus-Cosinus Îmbunătățit (Improved Sine-Cosine Algorithm – ISCA)

Gradul relativ ridicat de complexitate al problemei de optimizare propuse poate conduce la un nivel mai redus de performanță al algoritmilor metaeuristici. Din acest motiv, o variantă îmbunătățită a Algoritmului Sinus-Cosinus a fost propusă de membrii echipei pentru asigurarea unui nivel ridicat de performanță, prin introducerea unor operatori pentru îmbunătățirea procesului de explorare cu scopul de a evita capcana punctelor de extrem locale și a procesului de exploatare pentru a asigura o căutare fină pe parcursul ultimelor iterații.

- Propunerea unei microrețele cu un număr mare de SD, VE, SSEE și CB

Modelul de microrețea propus pentru realizarea studiului de caz este inspirat de rețeaua electrică de test CIGRE MV Benchmark Network și constă în 11 noduri de medie tensiune, conectate

prin intermediul a 10 linii electrice în cablu într-o configurație de tip arborescent. Microrețeaua propusă este conectată pe barele de medie tensiune ale unei stații electrice, alimentează nouă consumatori și integrează 7 centrale electrice fotovoltaice (CEF), o centrală electrică eoliană (CEE), două sisteme de stocare a energiei electrice, cinci stații de încărcare ce deservește 100 de vehicule electrice și două baterii cu condensatoare. Curbele de sarcină și curbele de producție de energie folosite în cadrul articolului reprezintă valori orare pentru o perioadă de un an calendaristic și sunt structurate într-o bază de date.

- Dezvoltarea unui pachet software pentru rezolvarea problemei de optimizare

Pentru realizarea simulărilor prezentate în cadrul articolului, membrii echipei au dezvoltat un pachet software, cu o structură modulară, în mediul de programare Matlab. Primul modul pregătește modelul microrețelei prin prelucrarea și concatenarea datelor de intrare pentru diferite componente ale microrețelei, preluate din baza de date a curbelor de sarcină și de producție aferente perioadei de studiu. Modulul de optimizare primește modelul de microrețea de la primul modul și determină soluția optimă pentru controlul puterilor active și reactive pentru durata studiată, salvând rezultate într-un fișier de tipul „.mat”. Acest modul conține algoritmul propus, ISCA, și cel original SCA, funcțiile obiectiv, funcțiile pentru calculul regimului permanent și funcțiile de penalizare. Al treilea modul încarcă rezultatele furnizate de modulul de optimizare și realizează procesarea și analiza acestora atât în formă numerică, cât și grafică.

2. Rezumatul articolului propus spre publicare

2.1. Rezumatul modelului matematic

Modelul matematic realizat de membrii echipei este prezentat pe scurt în continuare. Funcția obiectiv considerată în această lucrare constă în minimizarea a pierderilor totale de energie activă ΔW_{MG} în microrețea pentru perioada de timp de programare considerată T .

$$\begin{aligned} \min f_{obj}(x) = \Delta W_{MG} &= \sum_{t=1}^T \Delta P_{MG}^t \cdot \Delta t = \sum_{t=1}^T \left(P_{sl}^t + \sum_{k=1}^{n_{GEN}} P_{G,k}^t - \sum_{k=1}^{n_N} P_{L,k}^t - \sum_{k=1}^{n_{BESS}} P_{B,k}^t - \sum_{k=1}^{n_{EV}} P_{EV,k}^t \right) \cdot \Delta t \\ \text{subject to: } & g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

unde n_N – numărul de noduri ale microrețelei, n_{BESS} numărul de sisteme de stocare și n_{EV} numărul de VE.

Pe durata fiecărui interval de timp t pierderile de putere ΔP_{MG}^t sunt determinate pe baza bilanțului de putere activă realizat la nivelul microrețelei, care include: puterea activă importată de microrețea din barele stației P_{sl}^t , puterile active generate de SD și cerute de consumatorii de la fiecare nod al microrețelei ($P_{G,k}^t$ și $P_{L,k}^t$), schimbul de putere activă dintre SSEE și microrețea $P_{B,k}^t$ și puterea activă cerută de VE $P_{EV,k}^t$.

Vectorul variabilelor de control constă în schimbul de putere activă dintre SSEE și microrețea, puterea activă cerută de fiecare EV, puterea reactivă furnizată de fiecare sursă distribuită și treapta de funcționare pentru fiecare baterie cu condensatoare.

$$[x] = \left[\left[P_{B,1} \right] \dots \left[P_{B,k} \right] \dots \left[P_{B,n_{BESS}} \right], [t_{ch}], [Q_{G,1}] \dots [Q_{G,k}] \dots [Q_{G,n_{Gen}}], [N_{CB,1}] \dots [N_{CB,k}] \dots [N_{CB,n_{CB}}] \right] \quad (2)$$

$$\left[P_{B,k} \right] = \left[P_{B,k}^1, P_{B,k}^2, \dots, P_{B,k}^t, \dots, P_{B,k}^T \right] \quad (3)$$

$$[t_{ch}] = [t_{ch,1}, t_{ch,2} \dots t_{ch,k} \dots t_{ch,n_{EV}}] \quad (4)$$

$$[Q_{G,k}] = [Q_{G,k}^1, Q_{G,k}^2 \dots Q_{G,k}^t \dots Q_{G,k}^T] \quad (5)$$

$$[N_{CB,k}] = [N_{CB,k}^1, N_{CB,k}^2 \dots N_{CB,k}^t \dots N_{CB,k}^T] \quad (6)$$

Modelarea componentelor microrețelei

În studiul de față, toți consumatorii, generatoarele, sistemele de stocare și vehiculele electrice sunt modelate ca puteri active și reactive absorbite sau injectate constante, iar bateriile cu condensatoare sunt modelate ca susceptanțe constante.

Nivelul de încărcare al sistemelor de stocare se calculează pe baza relațiilor:

$$SOC_k^t = SOC_k^{t-1} + \Delta SOC_k^t \quad (7)$$

$$\Delta SOC_k^t = \frac{\Delta W_k^t}{W_{max,k}} = \begin{cases} \frac{P_{B,k}^t \cdot \eta_{Bch,k} \cdot \Delta t}{W_{max,k}} & \text{if } P_{B,k}^t \geq 0 \\ \frac{P_{B,k}^t \cdot \Delta t}{W_{max,k} \cdot \eta_{Bdsc,k}} & \text{if } P_{B,k}^t < 0 \end{cases} \quad (8)$$

unde $\eta_{Bch,k}$ și $\eta_{Bdsc,k}$ reprezintă randamentul la încărcare și descărcare a sistemului de stocare k , și $W_{max,k}$ capacitatea acestuia.

Perioada optimă de încărcare a fiecărui vehicul electric este determinată individual în cadrul problemei de optimizare. În acest scop, se consideră că fiecare VE ajunge la stația de încărcare la momentul de sosire $t_{arr,k}$ având nivelul inițial al energiei stocate în acesta $W_{init,k}$ și necesită încărcare până la nivelul dorit $W_{fin,k}$ pe durata de staționare care se încheie la momentul plecării $t_{dep,k}$. Puterea activă cerută de fiecare VE $P_{ch,k}$ este considerată constantă pe durata perioadei de încărcare Δt_{ch} , fiind determinată astfel:

$$\Delta t_{ch,k} = \frac{W_{fin,k} - W_{init,k}}{P_{ch,k} \cdot \eta_{EVch,k}} \quad (9)$$

$$t_{stop,k} = t_{start,k} + \Delta t_{ch,k} \quad (10)$$

Prin urmare, puterea cerută de fiecare EV pe durata de încărcare definită de momentul de începere $t_{start,k}$ și de terminare $t_{stop,k}$ este:

$$P_{EV,k}^t = \begin{cases} P_{ch,k} & \text{if } t_{start,k} \leq t \leq t_{stop,k} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

Restricții de egalitate și de inegalitate

Restricțiile de egalitate prezentate în ecuația (1) constau în ecuațiile puterilor active și reactive nodale, utilizate în calculul regimului permanent.

$$\begin{aligned} P_{G,i}^t - P_{L,i}^t - V_i^t \sum_{k \in n_B} V_k^t [G_{ik} \cos(\theta_i^t - \theta_k^t) + B_{ik} \sin(\theta_i^t - \theta_k^t)] &= 0 \\ Q_{G,i}^t - Q_{L,i}^t - V_i^t \sum_{k \in n_B} V_k^t [G_{ik} \sin(\theta_i^t - \theta_k^t) - B_{ik} \cos(\theta_i^t - \theta_k^t)] &= 0 \end{aligned} \quad , \quad \forall i = 1 \dots n_N \quad (12)$$

Restricțiile de inegalitate constau în limitele componentelor microrețelei și în criteriile de securitate statică a microrețelei.

- Restricțiile de inegalitate asociate sistemelor de stocare a energiei fac referire la limitele puterii active, ale nivelului de încărcare și a diferenței dintre nivelurile de încărcare de la începutul și sfârșitul zilei:

$$P_{B,k}^{min} \leq P_{B,k}^t \leq P_{B,k}^{max}, \quad \forall k = 1 \dots n_{ESS} \quad (13)$$

$$SOC_k^{min} \leq SOC_k^t \leq SOC_k^{max} \quad (14)$$

$$|SOC_k^0 - SOC_k^T| \leq \varepsilon_{SOC} \quad (15)$$

- Restricțiile de inegalitate asociate autovehiculelor electrice se referă la încadrarea momentelor de începere și terminare a încărcării în perioada de staționare a acestora:

$$t_{arr,k} \leq t_{start,k} \leq t_{dep,k} - \Delta t_{ch,k}, \quad \forall k = 1 \dots n_{EV} \quad (16)$$

- Restricțiile de inegalitate asociate surselor regenerabile se referă la limitele puterii reactive pe care acestea o pot injecta sau absorbi:

$$Q_{G,k}^{min} \leq Q_{G,k}^t \leq Q_{G,k}^{max}, \quad \forall k = 1 \dots n_{Gen} \quad (17)$$

- Restricțiile de inegalitate aferente bateriilor cu condensatoare constau în limitele minimă și maximă a treptei de funcționare a acestora:

$$N_{CB,k}^{min} \leq N_{CB,k}^t \leq N_{CB,k}^{max}, \quad \forall k = 1 \dots n_{CB} \quad (18)$$

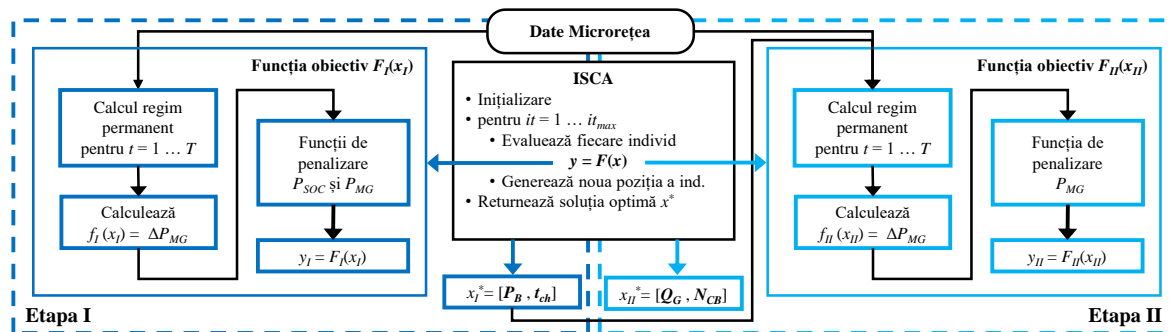
- Restricțiile de inegalitate aferente microrețelei asigură securitatea statică a acesteia prin încadrarea tensiunilor la noduri și a curenților prin liniile electrice în limitele admisibile:

$$V_k^{min} \leq V_k^t \leq V_k^{max}, \quad \forall k = 1 \dots n_N \quad (19)$$

$$|I_k^t| \leq I_k^{max}, \quad \forall k = 1 \dots n_L \quad (20)$$

Adaptarea modelului pentru algoritmi metaeuristici

Datorită gradului relativ ridicat de complexitate, problema de optimizare formulată se rezolvă succesiv în două etape: I) se realizează programarea optimă a SSEE și EV, iar apoi II) se optimizează puterile reactive furnizate de SD și BC. În figura următoare este prezentată schematic rezolvarea în două etape a problemei de optimizare.



Pentru a asigura respectarea restricțiilor de egalitate, calculul regimului permanent de funcționare este realizat cu ajutorul metodei ascendent-descendent, în cadrul funcției obiectiv. Restricțiile de inegalitate referitoare la variabilele de control, sunt integrate în algoritmul metaeuristic sub forma limitelor superioare și inferioare ale acestora, iar restricțiile de inegalitate referitoare la nivelul de încărcare a sistemelor de stocare, la tensiunile nodale și circulațiile de curent prin laturile microrețelei sunt integrate sub forma funcțiilor de penalizare P_{SOC} și P_{MG} , care au rolul de a crește valoarea funcției obiectiv pentru indivizii care nu respectă aceste restricții. În final, algoritmul metaeuristic va rezolva funcțiile obiectiv penalizate F_I și F_{II} :

$$F_I(x_I) = w_0 \cdot (f_I(x_I) + w_{SOC} \cdot P_{SOC} + w_{MG} \cdot P_{MG}) \quad (21)$$

$$F_{II}(x_{II}) = w_0 \cdot (f_{II}(x_{II}) + w_{MG} \cdot P_{MG}) \quad (22)$$

2.2. Algoritmul Sinus-Cosinus Îmbunătățit

Algoritmul Sinus-Cosinus (SCA, din engleză Sine-Cosine Algorithm), propus de către S. Mirjalili este un algoritm metaeuristic care prezintă două avantaje majore și anume permite obținerea unor performanțe bune, folosind un model matematic foarte simplu pentru modificarea poziției indivizilor, bazat pe funcțiile trigonometrice sinus și cosinus:

$$X_i^{j,t+1} = \begin{cases} X_i^{j,t} + r \times \sin(rand_1) \times |rand_2 \times P_i^t - X_i^{j,t}|, & rand_3 < 0.5 \\ X_i^{j,t} + r \times \cos(rand_1) \times |rand_2 \times P_i^t - X_i^{j,t}|, & rand_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (23)$$

În varianta îmbunătățită propusă de autori, se introduc un număr de N_{mut} indivizi mutanți, cu scopul de a îmbunătăți atât procesul de explorare pentru evitarea punctelor locale de minim, cât și etapei de exploatare pentru a obține o „șlefuire” a soluției optime, cu ajutorul relațiilor prezentate în pseudocodul de mai jos. În cadrul articolului, se prezintă o comparație între ISCA și SCA pentru rezolvare problemei de optimizare pe durata unui an calendaristic, din care reiese o reducere a pierderilor totale de energie, în medie cu 12.6% obținută de ISCA față de SCA.

Algoritmul Sinus-Cosinus Îmbunătățit

1. Generarea populației inițiale de N indivizi
2. Pentru $t = 1 : T_{max}$
3. Modifică poziția celor N indivizi, conform relației (23).
4. Determină procentul mutanților din populație:

$$N_{mut} = N \times \frac{\text{mod}(t, 50) + 5}{100}$$

5. Pentru $i = 1 : N_{mut}$
6. Alege două variabile ale individului i în mod aleator pos_1 și pos_2
7. Generează un număr aleator p în intervalul $[0,1]$.
8. Dacă $p \leq 0.2$

$$X_{pos_1}^{i,t} = rand \times (ub_{pos_1} - lb_{pos_1}) + lb_{pos_1}$$

$$X_{pos_2}^{i,t} = rand \times (ub_{pos_2} - lb_{pos_2}) + lb_{pos_2}$$

9. Altfel, dacă $p \leq 0.8$

$$X_{pos_1}^{i,t} = P_{pos_1}^t + (rand \times (ub_{pos_1} - lb_{pos_1}) + lb_{pos_1})$$

$$X_{pos_2}^{i,t} = P_{pos_2}^t - (rand \times (ub_{pos_2} - lb_{pos_2}) + lb_{pos_2})$$

10. Altfel

$$X_{pos_1}^{i,t} = P_{pos_1}^t + rand \times (ub_{pos_1} - lb_{pos_1}) + lb_{pos_1}$$

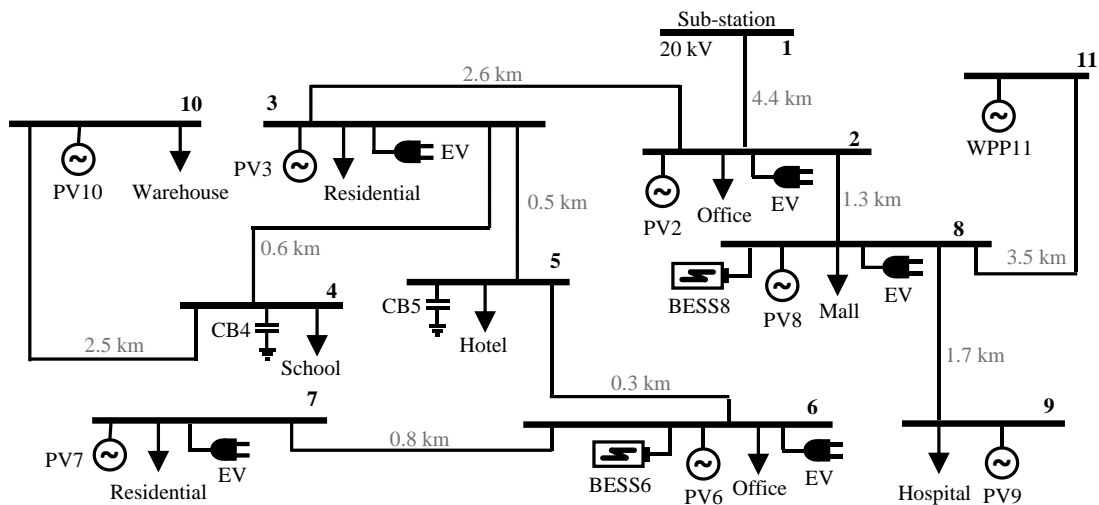
$$X_k^i = P_k^t - (rand \times (ub_k - lb_k) + lb_k) / (m - 1) \quad \forall k=1...m, k \neq pos_1$$

11. sfârșit buclă pentru

12. sfârșit buclă pentru
-

2.3. Rezumatul rezultatelor obținute

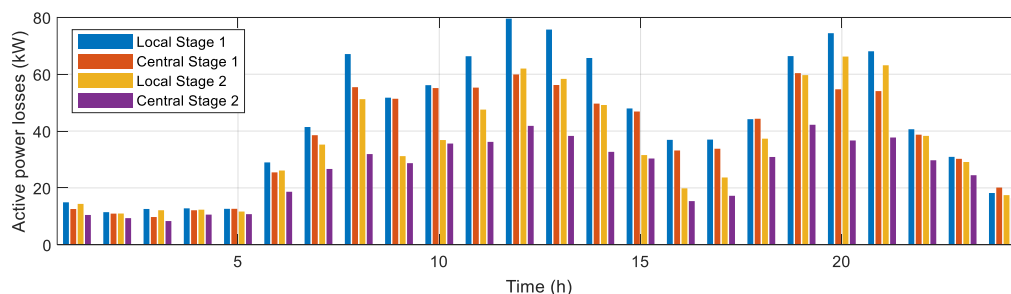
Microrețeaua propusă de membrii echipei constă în 11 noduri de 20 kV, conectate într-o structură arborescentă care alimentează 9 consumatori și integrează 7 CEF și o CEE, două sisteme de stocare, 100 de vehicule electrice și două baterii cu condensatoare. Schema monofilară este prezentată în figura următoare.



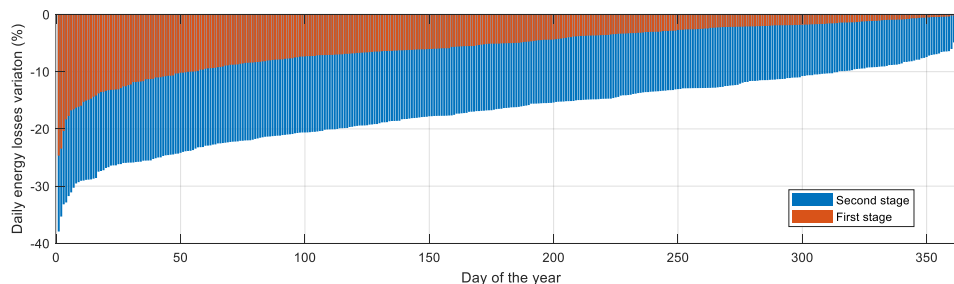
Principalele date ale componentelor microrețelei sunt prezentate în tabelul următor.

Nod	Tip cons.	$P_{L,max}$ (kW)	$Q_{L,max}$ (kVAr)	n_{EV} (-)	$t_{arr} - t_{dep}$ (hh ^{mm})	DG type	$P_{G,max}$ (kW)	$Q_{G,max}$ (kVAr)	W_{Bmax} (kWh)	P_{Bmax} (kW)	$N_{CB} \times Q_{CB,r}$ (kVAr)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Birouri	825	615	25	7 ⁰⁰ - 16 ⁵⁹	CEF	650	315	-	-	-
3	Rezidențial	625	385	15	17 ⁰⁰ - 23 ⁵⁹	CEF	250	121	-	-	-
4	Școală	145	105	-	-	-	-	-	-	-	5×50
5	Hotel	370	250	-	-	-	-	-	-	-	7×50
6	Birouri	880	555	30	7 ⁰⁰ - 16 ⁵⁹	CEF	250	121	900	225	-
7	Rezidențial	925	650	15	0 ⁰⁰ - 7 ⁵⁹	CEF	550	266	-	-	-
8	Mall	250	180	15	15 ⁰⁰ - 21 ⁵⁹	CEF	150	73	600	150	-
9	Spital	305	225	-	-	CEF	350	170	-	-	-
10	Depozit	175	135	-	-	CEF	1200	581	-	-	-
11	-	-	-	-	-	CEE	1600	775	-	-	-

Prin programarea optimă a dispozitivelor din cadrul microrețelei se obține următorul profil al pierderilor de putere orare pentru ziua selectată de 29 martie. Se poate observa că algoritmul propus obține o reducere substanțială a pierderilor zilnice de energie cu 26.55%, față de strategia de control local, considerată scenariu de referință.



Prin aplicarea modelului de optimizare pentru fiecare zi din perioada de un an calendaristic, rezultă de asemenea o reducere a pierderilor zilnice de energie cu 15.2% comparativ cu strategia locală de control. În figura următoare este prezentată variația valorii funcției obiectiv în procente pentru fiecare etapă a problemei de optimizare, relativ la scenariul de referință.



În concluzie, în perioada de raportare iulie-decembrie 2022, echipa de cercetare a realizat manuscrisul articolului „*Two-stage Optimal Active-Reactive Power Coordination for Microgrids with High Renewable Sources Penetration and Electrical Vehicles Based on Improved Sine–Cosine Algorithm*”, trimis spre publicare la revista *Mathematics*, încadrată în categoria Q1, cu un factor de impact de 2.592.

În cadrul articolului, se prezintă optimizarea puterilor active și reactive în două etape pentru o micrețea cu un număr mare de surse regenerabile de energie, sisteme de stocare a energiei electrice, vehicule electrice și baterii cu condensatoare. În acest scop, echipa de cercetare a avut ca principale realizări: formularea problemei de optimizare, adaptarea acesteia pentru algoritmi metaeuristici, propunerea Algoritmului Sinus-Cosinus Îmbunătățit, propunere unei micrețele, dezvoltarea unui pachet software pentru realizarea simulărilor și realizarea propriu-zisă a articolului. Rezultatele obținute demonstrează atât performanța superioară a algoritmului propus prin comparație cu cel original cât și eficacitatea modelului de optimizare propus, prin comparație cu o strategie locală de control considerată ca scenariu de referință.