

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Școala Doctorală a Facultății de Energetică

Rezumatul tezei de doctorat:

Alimentarea cu energie electrică a unui punct mobil de comunicații

Conducător științific:

Prof. emerit dr. ing. Nicolae GOLOVANOV

Doctorand:
Ing. Mihai-Dorel DAFINCA-IONESCU

București 2026

Rezumat

Lucrarea cuprinde studiul scenariilor operaționale ale unei microrețele autonome de tip rezilient alcătuită, în principal, dintr-un grup electrogen Diesel, un sistem de stocare a energiei (BESS) și o celulă de combustibil alimentată cu hidrogen, toate coordonate de un sistem de automatizare bazat pe un PLC SIEMENS de tip 12XX DC/DC/RLY .

Scopul principal al cercetării este de a evalua fiabilitatea, eficiența și continuitatea alimentării cu energie electrică a receptoarelor critice din cadrul microrețelei, în contextul întreruperilor sursei principale sau al funcționării insulare.

Așadar am proiectat și configurat un sistem pentru a prioritiza sursele de energie în funcție de scenariile prestabilite, iar funcționalitate sa a fost validată prin simulare și dimensionare software.

Modelarea dinamică și matematică a componentelor microrețelei am realizat-o folosind softul *Simulink* (*MATLAB*), pentru calculele curenților electrici de scurtcircuit am folosit platforma programului *ETAP*, iar dimensionarea cablurilor și a protecțiilor le-am calculat cu ajutorul programului *Ecodial INT V5* și al normativelor de specialitate.

Evaluările fotometrice ale instalației de iluminat le-am determinat cu ajutorul programului *Dialux*.

Am proiectat arhitectura sistemului de control bazându-mă pe un PLC industrial, care gestionează logica de comutare și pornire secvențială a surselor și consumatorilor, conform matricei de priorități prestabilite.

Pentru parametrii operaționali ai microrețelei (tensiuni, frecvență, distorsiuni armonice etc.) monitorizați în timp real am folosit un analizor de rețea de tip JANITZA , iar interfața grafică am asigurat-o printr-un sistem HMI (Human-Machine Interface).

De asemenea am reliefat faptul că în componența sistemului pe care l-am proiectat, prezența grupului generator este esențială întrucât aceasta asigură inerția sistemului prin masa sa rotorică, contribuind la stabilizarea frecvenței imediat după o posibilă perturbare, asigură continuitatea în alimentarea cu energie electrică și îmbunătățește reziliența microgridului.

Astfel, grupul electrogen nu este doar o rezervă de energie, ci un element activ de stabilitate și protecție într-un microgrid modern.

Rezultatele obținute în urma simulărilor și validărilor le-am sintetizat în secțiunea de concluzii, reliefând îmbunătățirea rezilienței și optimizarea funcționării în regim insularizat sau de backup.

Analiza cercetării am prezentat-o în articole publicate în reviste de specialitate și prezentări susținute în cadrul unor conferințelor de profil energetic.

Aşadar,pentru a pune în evidenţă principalele obiective din prezentul studiu (fiabilitatea, eficiența și continuitatea alimentării cu energie electrică a receptoarelor critice din cadrul microrețelei, în contextul întreruperilor sursei principale sau al funcționării insulare), am proiectat şi modelat cu ajutorul softurilor de specialitate diferite scenarii de funcționare prezentate sumar in cele de urmează:

Date despre microrețeaua analizată; Studiu de caz

Am propus spre analiză o soluție care are ca sursă de energie principală un generator Diesel având puterea de 3×400V/1000kVA. De asemenea, are în componența acumulatoare de 48V/12kWh, este prevăzut cu o celulă cu combustibil cu Hidrogen de 48V/10 kW ce este comandată automatizat de un PLC. Este prevăzut cu "Charger" ale cărui caracteristici sunt următoarele:

- Tensiune alternativă de intrare 230V;
- Tensiune continuă de ieșire 48V;
- Curentul electric *I* de ieșire 20 A.

În figura 1 este ilustrată schema monofilară a unei microrețele care are în componența și o celulă cu combustibil.

Invertorul are caracteristicile:

- Tensiune continuă de intrare 48 V
- Tensiune alternativă de ieșire 230 V

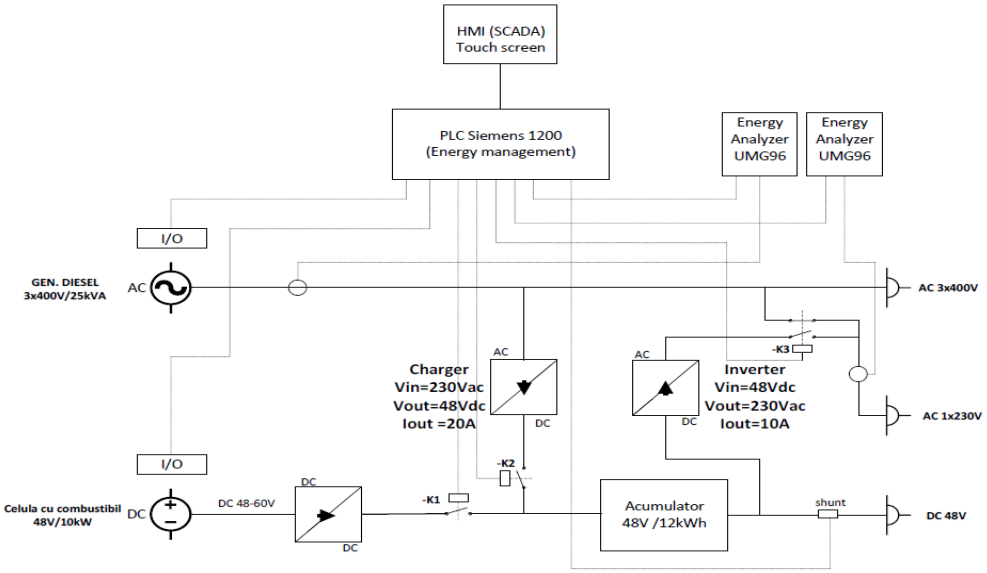


Fig.1 Schema monofilară a unei microrețele având în componență o celulă cu combustibil

Schema propusă dispune de un subsistem de management al operării ce poate monitoriza automat controlul funcțiilor și parametrilor . Sistemul este controlat de un PLC SIEMENS de tipul 12XX DC/DC/RLY. Sistemul este containerizat și scalabil. Sistemul analizat şi proiectat este destinat să poată alimenta cu energie electrică site-urile de telecomunicații ale operatorilor fie la tensiunea alternativă de 230 V sau la tensiunea continuă de 48 V fie să deservească alimentarea altor obiective de acest tip,(Figura 2).

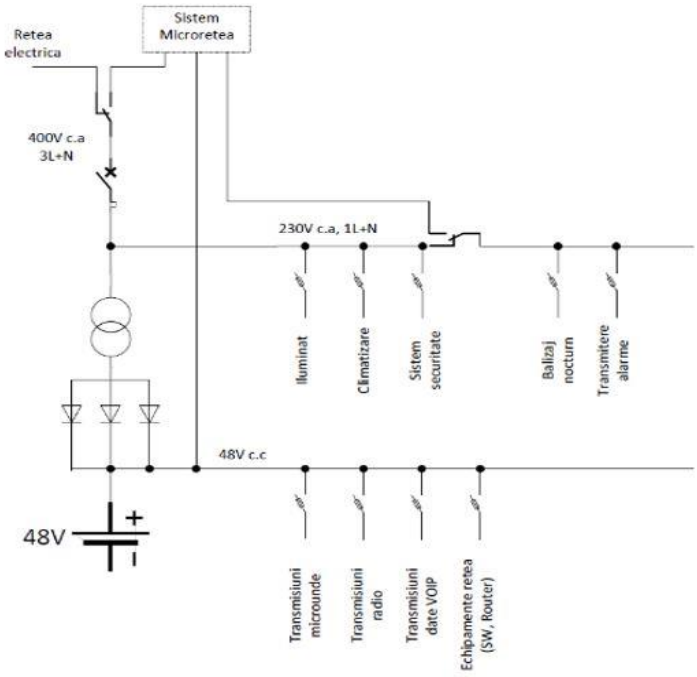


Fig. 2 Schema de principiu a microrețelei analizate.

Sistemul poate funcționa în paralel cu rețeaua de tensiune a distribuitorilor asigurând redundanța în cazul întreruperilor sau avariilor de tensiune. Este prevăzut cu echipamente și automatizări performante astfel încât poate comuta singur de la starea off-line la starea de pornire.

Cu ajutorul echipamentelor de comandă și control gen PLC, pot fi configurate și setate toate scenariile dorite, astfel încât datele culese pot fi stocate sau trimise către operatori prin ajutorul protocoalelor de telecomunicații (rețea fibră optică conectată la echipamente de tip rețea, Swich/Router) sau GSM.

Modelarea Microrețelei -Simulink-Matlab

Pentru a evidenția importanța stocării și stării de încărcare a bateriilor (SoC) am modelat o microrețea care produce hidrogen folosind energia solară având în componență un sistem de stocare (baterii de acumulatoare).

Simulare a fost realizată în mediul **MATLAB/Simulink**. Am folosit biblioteca **Simscape** iar in continuare sunt enunţate mărimile analizate:

T_vect: Vectorul temperaturii în Kelvin (K), convertit din grade Celsius. Reprezintă temperaturile la care au fost măsurate proprietățile hidrogenului.

h_vect: Entalpie specifică a hidrogenului (adică energia internă conținută per kg de substanță), exprimată în kilojouli pe kilogram.

nu_vect: Vâscozitate cinematică a hidrogenului, exprimată în micro Pascal-secunde. Indică rezistența la curgere (fricțiunea internă) a gazului.

cond_vect: Conductivitatea termică a hidrogenului (măsoară cât de bine conduce căldura), în milivati pe metru pe Kelvin.

cp_vect: Căldura specifică la presiune constantă, adică energia necesară pentru a încălzi un kg de hidrogen cu un grad Kelvin, fără schimbare de presiune.

R_h2: Constanta specifică a gazului hidrogen – o constantă termodinamică ce se folosește în ecuația gazului ideal: pV = m * R * T

t_solar_profile: Vector de timp în secunde (de la 0 la 82800 s = 23 h). Fiecare valoare reprezintă un moment al zilei la care se cunoaște puterea generată de panourile solare. Se folosește pentru a defini profilul zilnic de radiație solară.

solar_profile: Profilul de putere generat de sistemul fotovoltaic, exprimat în wați (W). Reprezintă câtă putere furnizează panourile solare la momentele din t_solar_profile. Valorile mici (4 W) noaptea, iar în timpul zilei urcă până la **200.000 W (200 kW)**.

temperature: Temperatura la care se face simularea pentru celulele solare, exprimată în grade Celsius. Este importantă deoarece eficiența panourilor solare depinde de temperatură.

Dimensiunile plăcii (electrodului/membranei) în centimetri. Se folosesc pentru a calcula suprafața totală a membranei și a rezervorului de apă.

```
Electrolyzer.Np_electrodes = 3; % Nr. Perechilor de electrozi
Electrolyzer.N_cell = 100;      % Nr,Celulelor
```

Structura electrolizorului:

- **Np_electrodes** = număr de perechi anod-catod.
- **N_cell** = numărul de celule electrochimice conectate în serie.

```
(273.15, 353.15, 5); % Vector de temperatură
(0.55,0.9,5);  % Eficienta vectorului [pu]
```

Eficiența electrolizorului în funcție de temperatură:

- Temperaturile (în Kelvin) la care a fost măsurată eficiența.
- Eficiența este exprimată în „pu” (per unit = fracțiune din 1 → ex: 0.8 înseamnă 80%).

Aria suprafației totale a membranei de schimb ionic, care influențează rata de reacție a electrolizei. Se calculează din dimensiuni și număr de electrozi.

```
Electrolyzer.Xd = 2.0;          % Grosimea membranei [cm]
Electrolyzer.Resistance = 0.25; % Rezistența [Ohm]
```

Caracteristici fizice ale membranei:

- **Xd** – grosimea membranei
- **Resistance** – rezistența electrică totală a sistemului de celule

```
Heat.Resistance = 25; % Rezistența de încălzire [Ohm]
```

Heat.Resistance = Rezistența elementului folosit pentru încălzirea apei în sistem.

Area = Aria suprafației rezervorului de apă, care este importantă pentru transferul termic și reacția de electroliză.

Informații despre rezervorul de stocare a hidrogenului:

- Volumul în cm³
- Temperatura (0°C în Kelvin)

Temp_vect_heat = [0 50 75 100]+273.15;

Curbele de reglare a încălzirii:

- Cât curent electric parcurge rezistorul de încălzire în funcție de temperatura apei din sistem

Qn este capacitatea maximă de energie pe care o poate stoca bateria (50 kWh). **Qinit** este energia disponibilă la începutul simulării.
Q1 este un prag folosit de sistemul de control (ex: nu lasă bateria să se descarce sub 50%).
Rs afectează disiparea de energie în baterie.**Un** este tensiunea la care bateria funcționează optim.
U1 este limita inferioară – sub această valoare, bateria e considerată descărcată.
Operation_Ref.Ie – curentul electric livrat electrolizorului
Operation_Ref.Isolar – referință de curent electric în funcție de iradierea solară
Converter.Iout – valorile posibile de curent electric de ieșire
Converter.Efficiency – eficiența convertorului în funcție de curentul electric de ieșire

În schema din figura 3 este reprezentată o microrețea insularizată de tensiune continuă (DC) care folosește o sursă solară și un sistem de stocare a energiei pentru a alimenta un electrolizor.

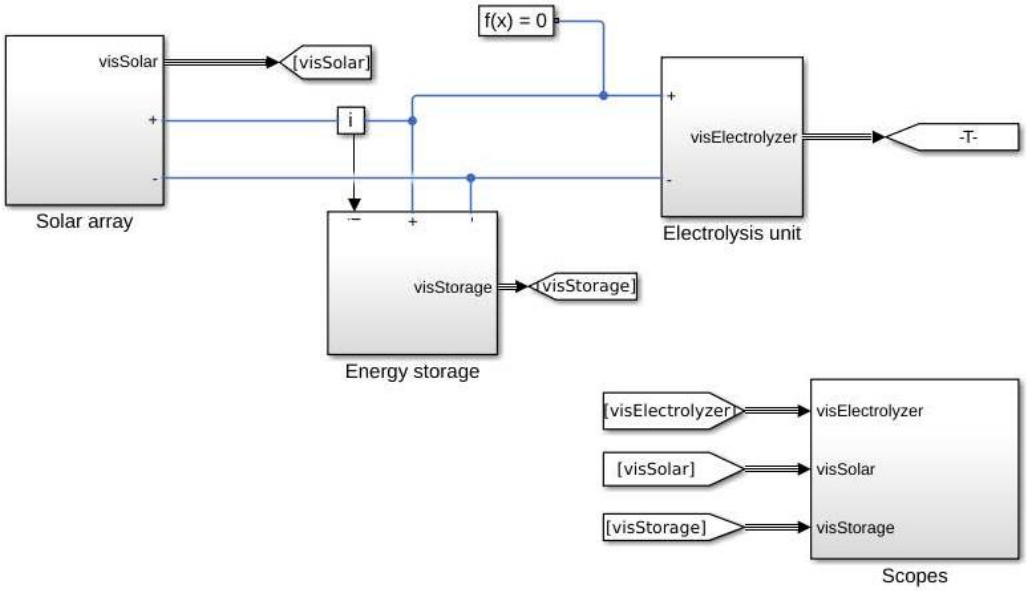


Fig.3 Reprezentarea microreţelei în Simulink Matlab

- Energia electrică produsă de panourile solare („Solar array”) este utilizată direct de electrolizor sau stocată în baterie („Energy storage”).
- Electrolizorul („Electrolysis unit”) transformă energia electrică în **hidrogen** prin procesul de electroliză a apei.
- Blocurile **visSolar**, **visStorage** și **visElectrolyzer** măsoară puterea în fiecare subsistem și trimit valorile la **Scopes** pentru vizualizare grafică.

In figura 5 este reprezentată schema care modelează un **sistem fotovoltaic** conectat la un convertor DC-DC controlat de un algoritm **MPPT (Puterea maximă emisă)**, cu performanță ridicată în valorificarea energiei.

- Energia solară este transformată în energie electrică de către panourile fotoelectrice (stânga).
- Un **bloc MPPT** monitorizează tensiunea și curentul electric (**VsSolar**, **Isolar**) pentru a ajusta **Duty Cycle-ul** convertorului DC-DC.
- Convertorul reglează tensiunea și curentul electric livrate către sarcină (spre ieșire).
- Senzorii de tensiune (**visSolar.v**) și curent electric (**visSolar.i**) sunt folosiți pentru monitorizare

In figura 4 este reprezentată modelarea unui **sistem complet de electroliză**, alimentat electric, în care apa este descompusă în hidrogen și oxigen.

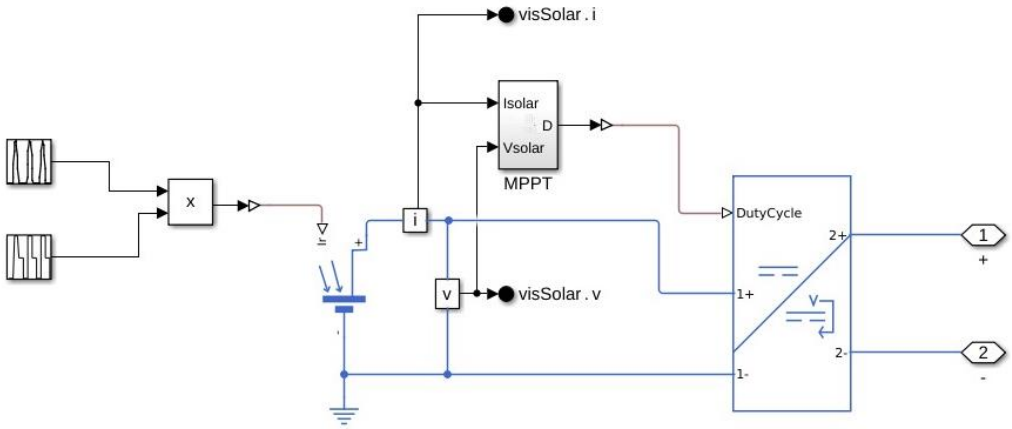


Fig. 4 Reprezentarea sistemului solar in Simulink Matlab

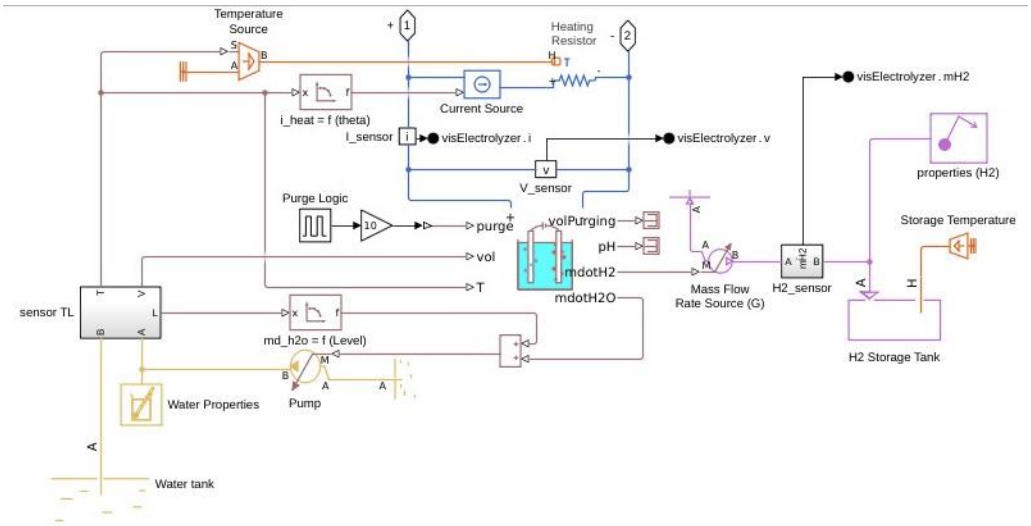


Fig.5 Reprezentarea electrolizorului în Simulink Matlab

- **Sursele de curent electric și tensiune** alimentează celula de electroliză.

- **Senzorii** (**I_sensor**, **V_sensor**) măsoară curentul electric și tensiunea aplicate electrolizorului (**visElectrolyzer.i**, **visElectrolyzer.v**).
- **Apa** este pompată din rezervorul de jos către celula electrolitică.
- **Electrolizorul** generează hidrogen (**mdotH2**) și evacuare (purging logică și pH).
- Hidrogenul este trimis către un **rezervor de stocare** (**H2 Storage Tank**), unde se măsoară masa produsă (**visElectrolyzer.mH2**).

In figura 7 este reprezentată schema care modelează un **sistem de stocare cu baterie** conectat printr-un convertor DC-DC, care controlează curentul electric în funcție de energia solară disponibilă și starea acumulatoarelor (SOC – State of Charge).

- Bateria este încărcată sau descărcată printr-un **convertor DC-DC** comandat de un semnal de referință **Iref**, calculat pe baza curentului electric solar și a energiei stocate (**Qbat**).
- Dacă SOC scade sub 30%, sistemul este oprit automat (**STOP**).
- Se măsoară: curentul electric (**visStorage.i**), tensiunea (**visStorage.v**) și starea bateriei (**visStorage.Qbat, visStorage.vBatt**).

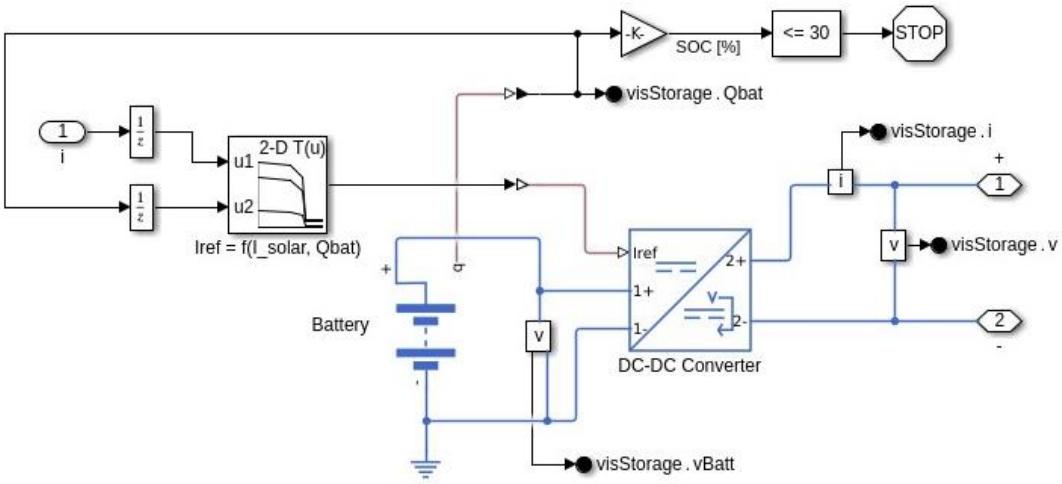


Fig. 6 Modelarea sistemului de stocare.

Rezultatele simulării

În Figura 7 sunt prezintate rezultatele obținute în urma simulării unui sistem de tip **microrețea** care produce **hidrogen** folosind energie solară și un sistem de stocare (baterie). Simularea a fost realizată în mediul **MATLAB/Simulink**, folosind biblioteca **Simscape**.

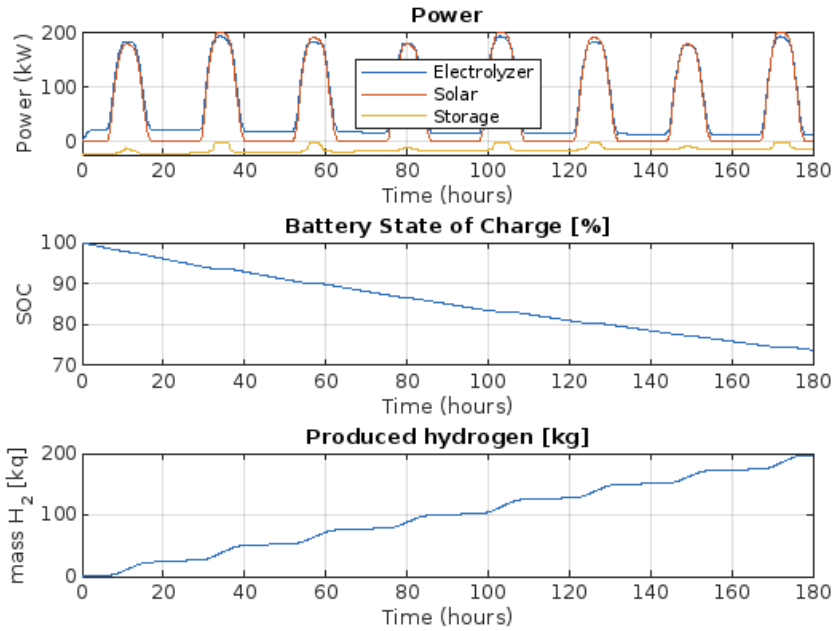


Fig. 7 Graficele reprezentative pentru rezultatele simulării

Conținutul graficelor:

- **Power (kW)** – arată cum variază puterea furnizată de panourile solare, bateria și puterea absorbită de electrolizor pe parcursul a 7 zile (168 ore).
- **Battery State of Charge (%)** – starea de încărcare a bateriei, care scade treptat deoarece energia stocată este folosită noaptea.
- **Produced hydrogen (kg)** – masa totală de hidrogen produsă de sistemul de electroliză, care crește pe măsură ce sistemul funcționează.

Power [kW] – Putere în funcție de timp

- Se observă **un ciclu zilnic clar** de producție solară (curba roșie), cu vârfuri în timpul zilei (~200 kW) și căderi aproape de zero noaptea.
- Electrolizorul (curba albastră) urmează aproape identic producția solară, ceea ce înseamnă că este activ doar când există energie solară disponibilă.
- Stocarea (curba galbenă) este activă doar intermitent și cu o contribuție relativ mică, fiind activă doar la mijlocul zilei.

Interpretare:

→ **Sistemul este proiectat să alimenteze electrolizorul direct din energia solară.**
→ **Stocarea are rol secundar, de stabilizare sau completare ușoară.**

Battery State of Charge [%] – Nivelul de încărcare al bateriei

- Nivelul de încărcare (SOC) **scade treptat** de la ~100% la ~72% pe parcursul celor 180 de ore (~7.5 zile).
- Nu există episoade de reîncărcare completă, doar o descărcare continuă, semn că energia solară nu este suficientă pentru a menține SOC constant.

Interpretare:

→ Bateriile sunt folosite constant pentru completarea consumului sau pentru momentele fără soare.
→ Sistemul ar putea deveni nesustenabil pe termen lung fără o reîncărcare mai eficientă

Produced hydrogen [kg] – Masa de hidrogen produs

- Curba este **crescătoare în trepte**, ceea ce indică o producție intermitentă, în funcție de disponibilitatea energiei.
- Se observă o producție **consistentă și liniară** în timpul zilelor cu soare.
- Se ajunge la ~200 kg hidrogen produs în 180 de ore.

Interpretare:

→Hidrogenul este produs eficient în timpul vârfurilor de producție solară.
→ Sistemul valorifică bine surplusul de energie în acele momente.

Simularea a fost efectuată pe o durată de 7 zile cu un **profil de radiație solară tipic pentru o zi însorită**. Se observă un ciclu zilnic clar:

- Producție maximă de energie ziua (panourile solare furnizează direct),
- Utilizarea bateriei în perioadele nocturne.

Condiții tehnice:

- Program utilizat: **MATLAB Simulink (Simscape)**
- Timp de simulare: **24×3600×7 secunde = 168 ore**
- Putere maximă solară: **200 kW**
- Capacitate stocare: **50 kWh**
- Energia produsă a fost folosită pentru alimentarea unui **electrolizor**, care generează hidrogen stocat într-un rezervor.

Analiza componentelor microrețelei folosind simulink-matlab

Managementul automat al surselor de energie, bazat pe date privind starea și disponibilitatea acestora, permite o alimentare sigură și stabilă a microrețelei. Cunoașterea modelelor matematice și a caracteristicilor surselor facilitează controlul rațional al acestora și al unor receptoare comandabile, asigurând în orice moment echilibrul cerere-ofertă energetică.

Instrumentele de calcul propuse pot fi integrate în modelul informatic al microrețelei, programate după algoritmul dezvoltat și ajustate pentru valorile reale, în vederea atingerii obiectivelor proiectului.

În cadrul studiului, cu ajutorul platformei Matlab Symulink s-a elaborat și analizat modelul matematic pentru :

- Instalația solară PV(abordare dinamică)
- Celula cu combustibil H2 (abordare dinamică)
- Bateria de acumulatoare
- Electrolizor
- Sistem de management al rețelei (GMS), iar în acest rezumat am sintetizat primele două componente.

Instalația solară PV(abordare dinamică)

Codul Matlab este indicat în continuare:

```
efficiency = 0.18;
panel_area = 1.6;
iradiance_levels = [800, 600, 400];

solar_power_output = zeros(size(iradiance_levels));

for i = 1:length(iradiance_levels)
    iradiance = iradiance_levels(i);
    solar_power_output(i) = efficiency * panel_area * iradiance;

    fprintf('Pentru o iradianta de %d W/m^2:\n', iradiance);
    fprintf(' - Puterea generata de panou: %.2f W\n\n',
solar_power_output(i));
end

figure;
plot(iradiance_levels, solar_power_output, 'r-o', 'LineWidth',
2);
xlabel('Iradianta solara [W/m^2]');
ylabel('Puterea generata [W]');
title('Puterea generata de panoul solar in functie de iradianta
solara');
grid on;
```

Rezultatele rulării codului sunt:

Rezultatele și graficul din figura 8 arată relația directă dintre iradianța solară si puterea generată de panoul solar:

- Pentru o iradianta de **800 W/m²**, panoul generează **230.40 W**.
- Pentru o iradianta de **600 W/m²**, panoul generează **172.80 W**.
- Pentru o iradianta de **400 W/m²**, panoul generează **115.20 W**.

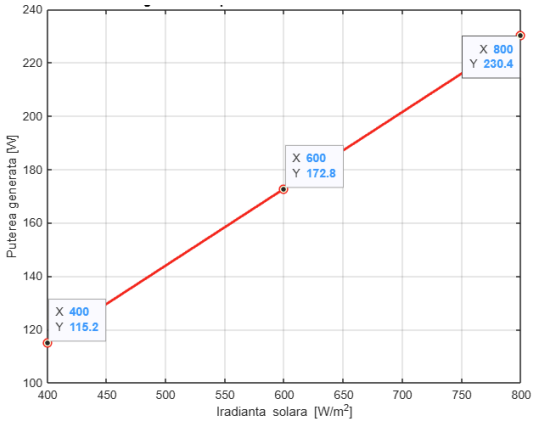


Fig. 8 Graficul putere generată funcţie de iradianţa solară

Graficul din figura 8 are forma unei linii drepte, ceea ce indică o creștere liniară a puterii generate pe măsură ce iradianța crește. Acest lucru este conform așteptărilor, deoarece puterea generată de un panou solar este direct proporțională cu nivelul de iradianță.

Simularea Simulink este indicată în figura 9.

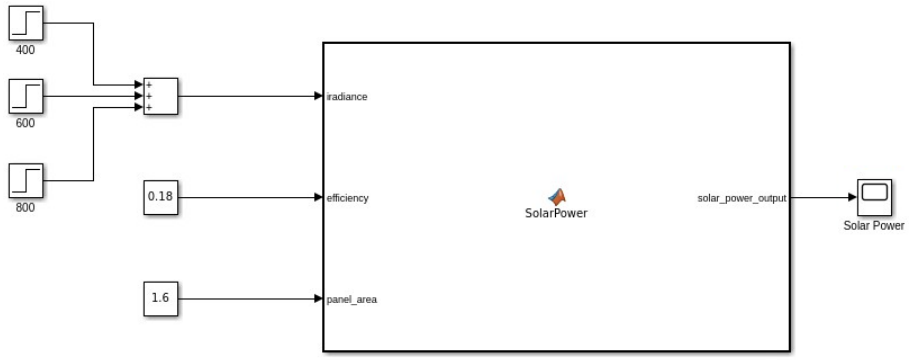


Fig.9 Simulare Simulink

Blocurile Step sunt configurate pentru a crește iradianța la diferite momente:

- La timpul 0, se setează iradianţa la 400 W/m².
- La timpul 10 secunde, iradianţa creşte cu 200 W/m², ajungând la 600 W/m².
- La timpul 20 secunde, crește din nou cu 200 W/m², ajungând la 800 W/m².

Blocul Sum combină aceste valori într-un semnal unic de iradianță variabilă, care este introdus în model.

Blocul SolarPower primește ca intrări iradianța variabilă, eficienţa panoului (0.18) și suprafața acestuia (1.6 m²). Acesta calculează puterea generată pe baza acestor parametri.

Blocul Display afișează rezultatul final solar_power_output, adică puterea generată de panoul solar pe măsură ce iradianța crește.

Celula cu combustibil H2 (abordare dinamică)

Codul Matlab este indicat în continuare.

```
PH = 3.31103e3;
Uc_nominal = 0.7;
N_cells = 10;

load_power_values = [2000, 4000, 6000];
hydrogen_consumption = zeros(size(load_power_values));

for i = 1:length(load_power_values)
    load_power = load_power_values(i);
    Ic = load_power / (Uc_nominal * N_cells);
    Uc = Uc_nominal * N_cells;

    hydrogen_consumption(i) = load_power / PH;

    fprintf('Pentru sarcina de iesire de %d W:\n', load_power);
    fprintf(' - Curent generat: %.2f A\n', Ic);
    fprintf(' - Tensiunea de iesire: %.2f V\n', Uc);
    fprintf(' - Consum de hidrogen: %.4f Nm^3/h\n\n',
hydrogen_consumption(i));
end

figure;
plot(load_power_values, hydrogen_consumption, 'b-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('Sarcina de iesire [W]');
ylabel('Consum de hidrogen [Nm^3/h]');
title('Consum de hidrogen in functie de sarcina de iesire');
grid on;
```

Pentru fiecare sarcină de ieșire, curentul electric generat de celula cu combustibil crește proporțional pentru a menține tensiunea constantă la 7 V. Consumul de hidrogen este direct proporțional cu sarcina:

- Pentru 2000 W, consumul este de 0,6040 Nm³/h.
- Pentru 4000 W, consumul este de 1,2081 Nm³/h.
- Pentru 6000 W, consumul ajunge la 1,8121 Nm³/h.

Graficul din figura 10 arată o relație liniară între sarcina de ieșire și consumul de hidrogen, ceea ce sugerează că pe măsura ce sarcina de ieșire crește și consumul de hidrogen crește proporțional. Această relație este utilă pentru evaluarea eficienței celulei de combustibil în condiții de sarcină variabilă, permițând dimensionarea adecvată a rezervoarelor de hidrogen în funcție de cererea de putere.

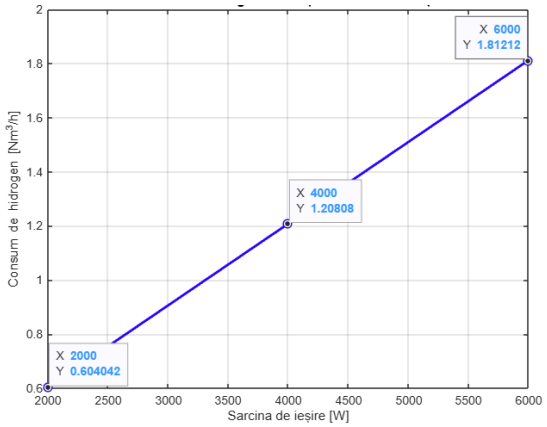


Fig.10 Graficul consum hidrogen funcție de sarcina de ieșire.

Simularea Simulink este indicată în figura 11.

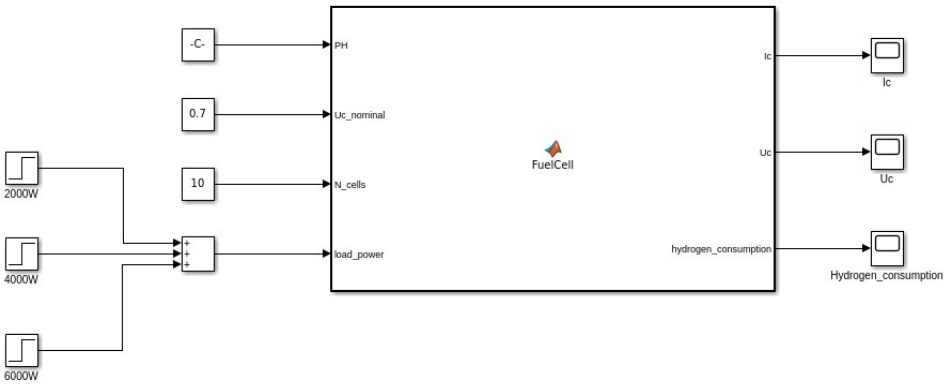


Fig.11 Simulare matlab celula combustibil

Blocurile Step de 2000W, 4000W și 6000W generează trepte de sarcină care sunt combinate cu un bloc **Sum**. Acestea simulează o creștere progresiva a sarcinii de ieșire.

Blocul FuelCell primește ca intrări:

- **PH**: puterea calorică a hidrogenului.

- **Uc_nominal**: tensiunea nominală pe celula.
- **N_cells**: numărul de celule.
- **load_power**: puterea combinată, obținută din blocurile Step.

Iesiri:

- **Ic**: curentul generat, afișat printr-un bloc Display.
- **Uc**: tensiunea de iesire a ansamblului de celule, afișată printr-un bloc Display.

Rezultatele simulării (rulare 30 secunde) sunt indicate în figura 12.

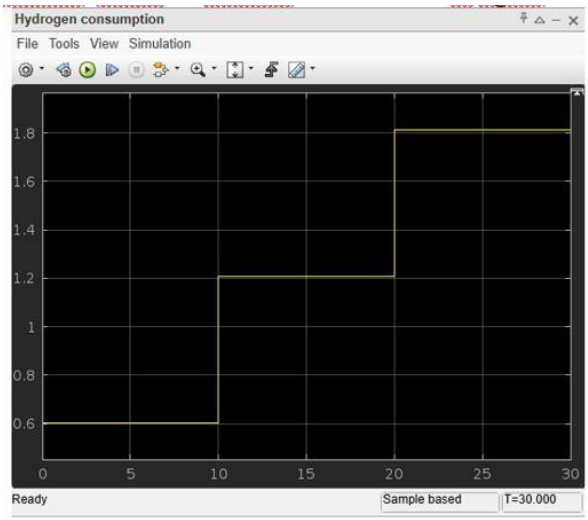


Fig.12 Grafic consum de hidrogen

Prioritizarea criteriilor de alimentare a consumatorilor

Cu ajutorul PLC-ului a fost realizată diagrama de funcționarea a consumatorilor iar echipamentul PLC Siemens 12XXDC/DC/RLY comunică prin protocolul Modbus.

Pentru simularea diferitelor scenarii a fost conectat la PLC un potențiometru variabil cu ajutorul căruia a fost reglată tensiunea, de exemplu pentru a simula nivelul de tensiune din acumulatoare iar pentru simularea închiderii anumitor circuite a fost conectat la PLC un întreruptor manual.

În figura 13 este indicat panoul de acțiuni la funcționarea sistemului de alimentare cu energie electrică.

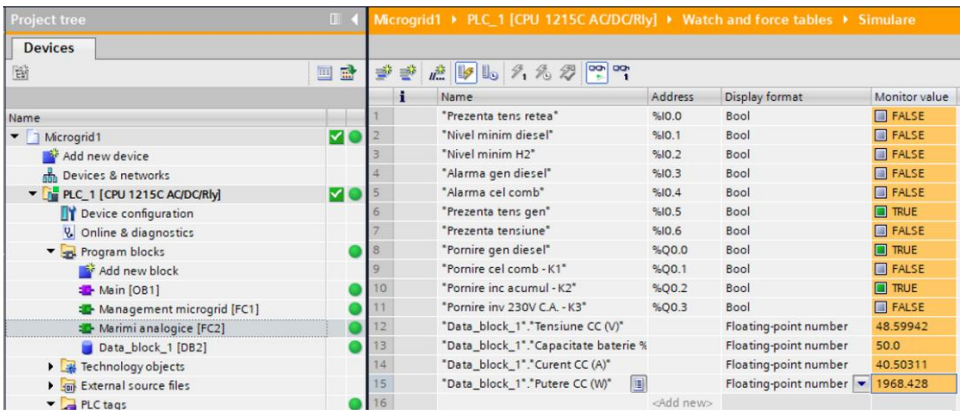


Fig. 13 Panou comandă acţiuni

În prezența tensiunii la rețea, toți consumatorii sunt alimentați din rețea: In lipsa tensiunii din rețea (dacă nivelul de combustibil din generator nu este minim) →Pornește generatorul care va alimenta toți consumatorii, aspect ilustrat în figura 14.

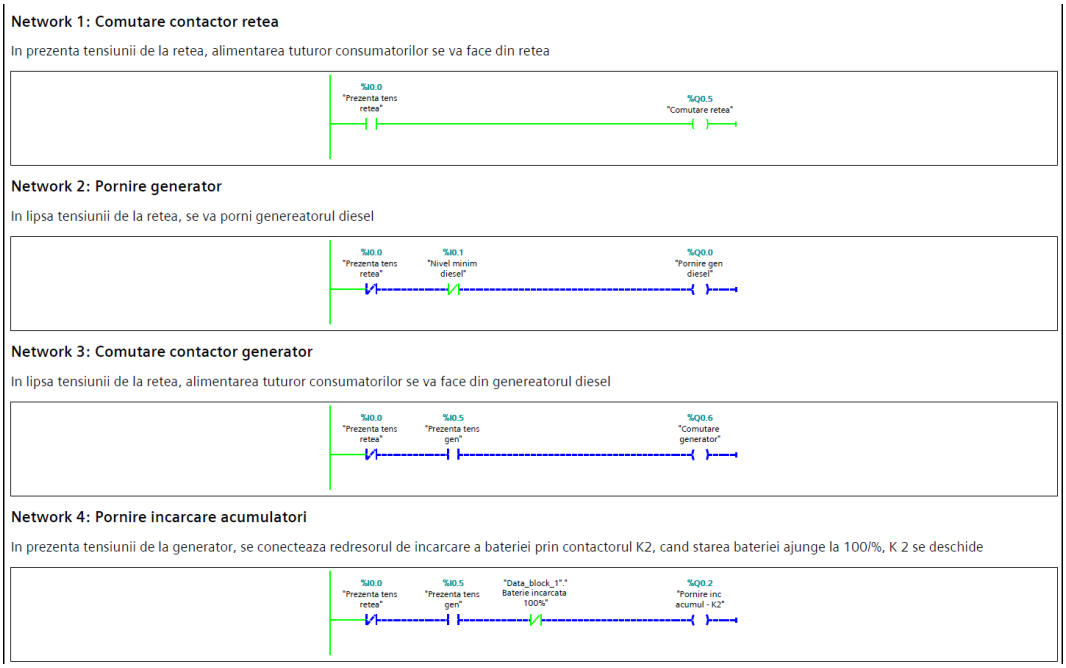


Fig. 14 Exemplu de comutare a echipamentelor la rețea.

Echipamentele folosite în timpul experimentului au fost : Laptop, PLC Siemens 12XXDC/DC/RLY, analizor de rețea Janitza, potențiometru, aparat măsurare, diverse softuri, fig.15.

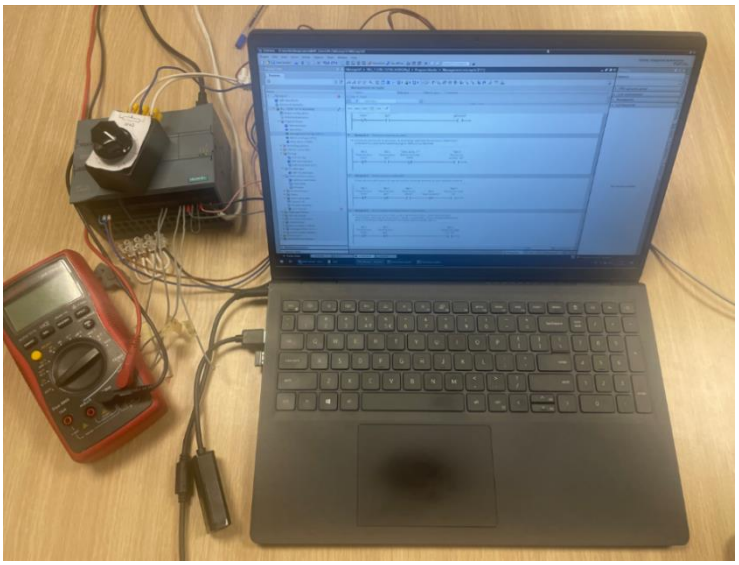


Fig.15 Echipamentele folosite în timpul simulării

Comparație Diesel vs Hidrogen. Studiu de caz

Pentru a putea evidenția costurile și randamentul utilizării hidrogenului a fost efectuat un studiu ce a constat în alimentarea cu energie electrică a unui consumator din cadrul microrețelei, din doua surse distincte, independente:

- Combustibil Diesel
- Hidrogen

Varianta 1. Sistemul având ca sursa de energie electrica generatorul Diesel.

Costuri si caracteristici tehnice:

Ipoteza de calcul a costului pentru o funcționare independentă (sursă primară de energie) a generatorului pentru o perioada de 7 zile (o săptămână, 168 ore).

- Cost achiziție generator 6.000 Euro (30.000 lei).
- Preț 1 L motorină 8 lei
- Consum combustibil (motorină)/ora 4 l
- Consum combustibil/ săptămână (4 L * 24h) x 7 = 672 L
- Cost total motorină/ săptămână (672 L * 8 **lei) = <u>5.376 lei</u>.**

Varianta 2. Sistemul având ca sursă de energie electrică doar Hidrogenul

Ipoteza de calcul a costului pentru o funcționarea independentă a celulelor de combustibil cu hidrogen pentru o perioada de 7 zile (o săptămână, 168 ore). A fost analizat un modul de hidrogen tip 3.8, având un volum de gaz de 106,8 m^3, o masă brută de 1009,505 kg și o masă netă de 950,5 kg, cu un preț de 12,00 €/m^3.

S-au luat în considerație următoarele caracteristici luate in calcul

- temperatura de lucru 14 K (-259,15 °C);
- temperatura de fierbere 20,38 K (-252,77 °C);

- temperatura critică 33,24 K (-239,91 °C);
- căldura latentă de fuziune 58,2 kJ/kg ;
- densitatea relativă la 15 °C; 0,1 MPa 0,069.
- energia generată de 1 Nm3 hidrogen este de aproximativ 3,5 kWh.
- Puterea estimată a sistemului : 10 kW
- Timp de funcționare al sistemului proiectat : 7 zile × 24 ore = 168 ore
- Energie necesara test : 168 ore × 10 kWh = 1680 kWh
- Energie generată de hidrogen : aproximativ 3,5 kWh/Nm3
- Capacitate/Nr.de butelii (12 butelii a 50 l; presiune îmbuteliere 20 MPa), : 106,80 Nm3.
- Necesarul de hidrogen :1680 kWh : 3,5 kWh/Nm3 = aproximativ 480 Nm3.

Pentru asigurarea necesarului de hidrogen a fost propusă utilizarea unui sistem de butelii, cu caracteristici indicate în tabelul 1.

Tabelul 1 Caracteristici butelii hidrogen 3.0

Hidrogen 3.0	Butelie 50 l; 30 MPa	Grup 12 butelii 50 l; 30 MPa	Grup 2×12 butelii 50 l; 30 MPa
Energie	≅ 18 kWh	≅ 216 kWh	≅ 432 kWh
Masa H_2	1,1 kg	13,2 kg	23,4 kg
Durata de funcționare la 2,5 kW	7,2 ore	86,4 ore	172,8 ore
Durata de funcționare la 5 kW	3,6 ore	43,3 ore	86,4 ore
Durata de funcționare la 10 kW	1,8 ore	21,6 ore	43,2 ore
Masa	80 kg	1460 kg	2920 kg

Pentru a asigura continuitatea alimentarii cu hidrogen, aceste butelii ar trebui legate într-un sistem/stație de reducere a presiunii . În acest caz, din punct de vedere tehnic soluția optima constă în utilizarea bateriilor de hidrogen 3.8 (puritate 99,98%).

Costuri aproximative pentru funcționarea sistemului timp de o săptămână folosind exclusiv celulele de combustibil cu Hidrogen:

480 mc H2 × 12 Euro/mc= 5.760 Euro;

Aproximativ <u>28.512 lei.</u>

NOTA: Nu au fost luate în calcul cheltuielile operaționale , de transport etc

Concluzii

- Realizarea unui microgrid funcțional impune o analiză atentă a surselor de energie care pot acoperi necesarul receptoarelor din rețea. În cazul existenței unor receptoare care nu acceptă întreruperi în alimentarea cu energie electrică se pune un accent deosebit pe realizarea unei scheme în care prin configurație sau prin rezervare să se asigure o alimentare neîntreruptibilă. Desigur că o atenție specială este acordată utilizării surselor locale, solare și eoliene, utilizate în mod obișnuit împreună cu un mediu de stocare a energiei pentru a compensa generarea meteodependentă a energiei electrice. O soluție din ce în ce mai utilizată o

reprezintă implementarea celulelor cu combustibil care își procură hidrogenul din electrolizoare proprii sau din exterior.

- Digitalizarea proceselor de monitorizare și control prin utilizarea platformelor SCADA, IoT și algoritmi de inteligență artificială permite optimizarea în timp real a fluxurilor energetice, anticiparea dezechilibrelor și creșterea eficienței operaționale a microrețelei.
- Participarea activă a utilizatorilor finali în procesul decizional și investițional al microrețelei contribuie la consolidarea unui model energetic descentralizat, transparent și sustenabil, în care beneficiarii devin co-proprietari ai infrastructurii energetice locale.
- Managementul surselor de energie, realizat în mod automat pe baza datelor obținute privind starea și disponibilitatea energetică a surselor poate asigura o alimentare sigură și fiabilă a microrețelei. În acest sens, cunoașterea modelului matematic al surselor de energie și a caracteristicilor lor permite managementului rețelei să controleze în mod rațional sursele și unele receptoare comandabile pentru ca, în fiecare moment, să se acopere necesarul de energie.
- Microrețeaua analizată, funcționând izolat față de rețeaua electrică publică asigură acoperirea necesarului de energie electrică a receptoarelor: Ziua**:** solar → electrolizor → H_2 produs. Noaptea/dimineața devreme: baterii → consum. Pe termen lung, nivelul energiei stocate în baterii scade → este necesară o strategie de echilibrare (ex: mai multe panouri, perioade de consum mai reduse sau reîncărcare din rețea).
- Alimentarea sistemului energetic cu ajutorul celulelor cu hidrogen devine rentabile doar in condițiile în care hidrogenul (electroliza) ar fi realizată cu ajutorul energiei provenită din surse regenerabile RES. Utilizarea strict a hidrogenului pentru alimentarea sistemului propus este extrem de costisitoare în raport cu utilizarea altor surse de energie.
- Stabilirea schemei electrice de alimentare a unui utilizator precum și structura sistemului electroenergetic intern se face pe baza caracteristicilor de alimentare a utilizatorului și a exigențelor sale privind calitatea serviciului de alimentare.
- Pentru receptoarele critice, întrucât nu pot să accepte riscul întreruperii alimentării cu energie electrică, se vor folosi UPS-uri locale și sisteme de stocare a energiei electrice.
- Alături de PLC-uri, dispozitivele de conectare automată și releele inteligente reprezintă componente de bază în managementul și controlul microrețelelor.

În cadrul unui microgrid, utilizarea unui grup electrogen aduce beneficii esențiale:

- Furnizează inerție naturală prin masa rotorică, contribuind la stabilizarea frecvenței imediat după o perturbare.
- Asigură continuitatea alimentării în lipsa rețelei centrale sau a surselor regenerabile intermitente.
- Îmbunătățește reziliența microgridului, permițând funcționarea în mod insular (off-grid) în condiții critice.
- Completează sursele regenerabile, care nu oferă inerție, echilibrând sistemul în momentele de tranziție sau variații de sarcină.
- Permite tranziții line între surse regenerabile și backup

- Grupul electrogen nu este doar o rezervă de energie, ci un element activ de stabilitate și protecție într-un microgrid modern.

Studiul efectuat demonstrează că, în pofida riscurilor tot mai sofisticate, este posibilă construirea unor mecanisme eficiente de detecție și protecție, chiar și în infrastructuri critice complexe. În același timp, nevoia de evoluție constantă a acestor sisteme este evidentă, având în vedere dinamica amenințărilor cibernetice și integrarea tot mai profundă a digitalului în energetică.

Așadar, securitatea cibernetică nu mai este opțională în domeniul energetic. Este o condiție fundamentală pentru reziliența sistemului energetic național și pentru protejarea infrastructurilor critice. Soluțiile există, însă trebuie adaptate, testate și integrate responsabil, cu o viziune pe termen lung.

Prin înlocuirea surselor clasice de iluminat urban cu sistemele de iluminat modern se obțin avantaje privind următoarele aspect:

- Financiar, prin (reducere a necesarului de energie, mentenanță preventivă și corectivă
- Confort sporit/creștere calitate viață
- Rentabilitate a investiției (ROI) și un sistem de management care oferă predictibilitatea costurilor și economii la buget.
- Sistemele actuale de iluminat stradal prevăzute cu surse moderne de iluminat dar și cu un sistem informatic de urmărire a traficului pot determina reduceri importante de energie electrică fără a reduce serviciul pentru care au fost dimensionate.
- Iluminatul LED cu telegestiune este superior tehnologiei cu sodiu HPS din punct de vedere al eficienței energetice, longevității, calității luminii și capacității de control inteligent, costurilor operaționale reduse, siguranței in trafic și al îmbunătățirii calității vieții.

Contribuţii personale

O parte din rezultatele cercetării pe care le-am prezentat în această lucrare au fost publicate anterior sub forma unor articole științifice, contribuind la diseminarea și validarea academică a concluziilor obținute.

Astfel am redactat și publicat următoarele articole științifice, care reflectă etapele și direcțiile principale ale studiului:

În studiu am analizat o serie de soluții tehnice menite să îmbunătățească fiabilitatea, eficiența și continuitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor critici integrați într-un microgrid.

Așadar, am configurat echipamentele în funcție de scenarii prestabilite, iar validarea rezultatelor am realizat-o prin simulări software. Arhitectura sistemului am proiectat-o în jurul unui controler logic programabil (PLC), în care am implementat logica de comutare, obținându-se timpii doriți și o comutare secvențială optimizată a surselor de alimentare ale consumatorilor.

În cadrul studiului am obținut timpi de comutare foarte mici. În caz de defect al rețelei de distribuție, realimentarea din acumulatoare se realizează într-un interval de maximum 10 ms, acesta reprezentând timpul de comutare al întreruptorului rapid. Dacă și această sursă devine indisponibilă, celula cu combustibil intervine și alimentează microgridul în maxim 20 ms. O alta sursă de alimentare rapidă o reprezintă acumulatoarele.

De asemenea, am evidențiat faptul că prezența grupului electrogen în componența microgridului este esențială, întrucât acesta contribuie la asigurarea inerției sistemului prin masa sa rotorică, având un rol important în creșterea rezilienței operaționale a microgridului.

În ansamblu, soluțiile pe care le-am analizat şi implementat au fost validate prin simulări software şi contribuie la crearea unui cadru tehnologic robust, capabil să susțină alimentarea neîntreruptă a consumatorilor critici, în conformitate cu cerințele actuale de fiabilitate și eficiență energetică.

Rezultatele obținute confirmă fezabilitatea și eficiența soluțiilor pe care le-am analizat si proiectat, evidențiind capacitatea arhitecturii dezvoltate de a asigura o alimentare continuă și fiabilă a consumatorilor critici în condiții de funcționare perturbată a rețelei.

Astfel, studiul contribuie la consolidarea fundamentelor tehnice pentru implementarea microrețelelor inteligente, adaptate cerințelor actuale de reziliență, eficiență energetică și securitate în alimentarea cu energie electrică.

O parte din rezultatele cercetării pe care le-am prezentat în această lucrare au fost publicate anterior sub forma unor articole științifice, contribuind la diseminarea și validarea academică a concluziilor obținute.