



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA
DIN BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației**

Decizie nr. ____ din ZZ-LL-AAAA

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Ioan-Sorin ȘORLEI

**CONTROL, OPTIMIZARE, DIAGNOZĂ ȘI ÎNTREȚINERE
PREDICTIVĂ A SISTEMULUI ELECTRIC HIBRID DE
ENERGIE DIN VEICULE ELECTRICE CU PILE DE
COMBUSTIBIL**

**CONTROL, OPTIMIZATION, DIAGNOSIS AND
PREDICTIVE MAINTENANCE OF THE HYBRID
ELECTRIC POWER SYSTEM IN FUEL CELL ELECTRIC
VEHICLES**

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Gheorghe BREZEANU Univ. Politehnica din București	Președinte
Prof. Dr. Ing. Nicu BIZON Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
Prof. Dr. Ing. Radu-Emil PRECUP Univ. Politehnica Timisoara	Referent
Prof. Dr. Ing. AIORDACHIOAIEI Univ. Dunarea de Jos Galati	Referent
Prof. Dr. Ing. Dan Alexandru Stoichescu Univ. Politehnica din București	Referent

BUCUREȘTI 2025

Cuprins

1. Introducere	4
1.1. Prezentarea domeniului de doctorat	4
1.2. Scopul tezei	4
1.3. Conținutul tezei	4
2. Strategii de management energetic pentru principalele topologii de sisteme de propulsie pentru un vehicul electric cu pilă de combustibil.....	6
2.1. Topologiile sistemelor de propulsie cu pile de combustibil și ale convertoarelor DC/DC.....	6
2.1.1. Vehicule electrice cu pile de combustibil (FCEVs).....	6
2.1.2. Vehicule electrice hibride cu pile de combustibil (FCHEVs).....	6
2.1.3. Stadiul actual al tehnologiilor pilelor de combustibil, în industria auto.....	7
2.1.4. Convertoare DC/DC pentru Vehicule Electrice cu Pile de Combustibil.....	7
2.1.4.1. Convertoare DC/DC neizolate.....	7
2.1.4.2. Convertoare DC/DC izolate.....	8
2.1.4.3. Convertoare DC/DC – Noi topologii.....	8
2.2. Strategia de gestionare a energiei pentru vehiculele electrice cu pile de combustibil.....	8
2.2.1. Analiza strategiilor bazate pe reguli (Rule-Based Strategies) în FCEVs.....	8
2.2.2. Analiza strategiilor bazate pe optimizare (Optimisation-Based Strategies) în FCEVs	8
2.2.2.1. Strategia de optimizare globală (Global Optimization).....	8
2.2.2.2. Strategia de optimizare în timp real (Real-Time Optimization).....	9
2.2.3. Analiza strategiilor bazate pe învățare (Learning Based Strategies) în FCEVs	9
2.3. Discuții și Perspective.....	9
2.4. Rezumat și concluzii.....	9
3. Modelarea arhitecturii alese pentru vehiculul electric cu pilă de combustibil și analiza strategiilor de management energetic	11
3.1. Sistem de energie hibrid cu pilă de combustibil.....	11
3.1.1. Modelul sistemului pilei de combustibil (Fuel Cell Stack).....	11
3.1.1.1. Controlul fluxului de aer.....	11

3.1.1.2. Controlul fluxului de hidrogen.....	11
3.1.1.3. Controlul debitelor de alimentare.....	12
3.1.2. Sistem de stocare a energiei (ESS).....	12
3.1.2.1. Baterii.....	12
3.1.2.2. Condensatori și ultracondensatori.....	13
3.1.3. Sarcina variabilă (variable load) a FCHPS.....	13
3.1.4. Problema formulării funcției de optimizare.....	13
3.2. Strategia de gestionare a energiei pentru sistemul de putere hibrid cu pilă de combustibil.....	13
3.3. Rezumat și concluzii.....	14
4. Tehnici avansate de control, optimizare și diagnoza a sistemelor dintr-un vehicul electric cu pilă de combustibil – proiectare și simulare.....	15
4.1. Topologia arhitecturii FCHEV.....	15
4.1.1. Modelul grupului motopropulsor al vehiculului.....	15
4.1.1.1. Modelul de conducator auto.....	15
4.1.1.2. Motor electric de curent continuu (DC Motor).....	16
4.1.1.3. Ciclu european de conducere, în regim extra-urban (EUDC).....	16
4.1.2. Sistemul de pile de combustibil.....	16
4.1.3. Sistem de stocare a energiei (ESS).....	16
4.1.4. Strategia propusă pentru managementul energiei electrice.....	17
4.2. Rezultatele simulării arhitecturii FCHEV cu strategie de control GES în timp-real.....	17
4.3. Rezumat și concluzii.....	18
5. Algoritmi pentru reducerea consumului de hidrogen la vehiculele electrice cu pilă de combustibil – proiectare și testare.....	19
5.1. Algoritmi de reducere a consumului de combustibil în FCHEV.....	19
5.2. Rezultatele experimentale ale noului algoritm de comutare în timp real în cadrul ciclurilor europene de testare.....	21
5.3. Rezumat și concluzii.....	21
6. Perspective și limitări privind aplicabilitatea tehnicilor avansate de control și optimizare pe baza algoritmilor GES.....	22
6.1. Rezultatele experimentale ale sistemului de management energetic cu plă de combustibil de tip PEM de 30 kW.....	22
6.2. Rezultatele experimentale ale sistemului de management energetic cu plă de combustibil de tip PEM de 100 kW.....	23
6.3. Rezumat și concluzii.....	23
7. Concluzii generale.....	24

7.1. Rezultate obținute	24
7.2. Contribuții originale	25
7.3. Lista lucrărilor originale	26
7.4. Perspective de dezvoltare ulterioară	27
Bibliografie	28

Capitolul 1

Introducere

Contextul economic global, politicile de ecologizare, norma de poluare Euro 7, dar și aplicarea Standardului CAFE (Corporate Average Fuel Economy) au făcut ca marile companii de automobile să investească tot mai mult în Vehicule Electrice cu Pile de Combustibil (FCEV) pe lângă modele hibride, plug-in hibride și electrice.

În acest sens, lucrarea de față răspunde provocărilor de mai sus, prin implementare unor tehnici de control avansate pentru reducerea consumului de combustibil, a creșterii eficienței energetice globale și a durabilității sistemului.

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Teza de doctorat are ca domeniu de interes aplicațiile unor algoritmi software avansați în industria automotive de cercetare și dezvoltare a Vehiculelor Electrice cu Pilă de Combustibil pentru reducerea consumului de hidrogen, a îmbunătățirii eficienței energetice globale și a creșterii durabilității sistemelor de stocare a energiei.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Lucrarea de cercetare are ca scop principal dezvoltarea și testarea unui nou algoritm software, SWA_RTO, în vederea obținerii atât a unei economii de combustibil de hidrogen precum și a îmbunătățirii indicatorilor de performanță a sistemului electric hibrid, prin aplicarea unor strategii și tehnici de control în timp real într-un ciclu de conducere European, în regim extra-urban (EUDC).

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Această teză își propune să introducă noi tehnologii în ceea ce privește controlul și mecanismele de optimizarea și întreținerea predictivă a vehiculelor FCHEV luând în considerare strategiile de management energetic.

În acest sens, studiul din Capitolul 2 s-a bazat pe analiza cercetărilor recente în domeniu, pentru a reflecta asupra nevoii de implementare a noi algoritmi de optimizare

și control atât pentru reducerea consumului de combustibil, cât și pentru îmbunătățirea performanței vehiculelor cu pilă de combustibil.

Pentru a evidenția performanța sistemului, utilizând strategii de optimizare în timp real (RTO) pe baza algoritmului Global Extremum Seeking Control (GES), în Capitolul 3 s-a folosit analiza de sensibilitate a pragului de sarcină pentru a determina cele mai bune valori ale parametrilor calibrabili a funcției de optimizare și a algoritmului GES.

Contribuția principală a Capitolului 4 se axează pe dezvoltarea unui model de testare MIL (Model In The Loop) în aplicația software Matlab/Simulink pentru a testa performanța vehiculului în cadrul unui ciclu de conducere EUDC prin intermediul unui control inovator în timp real (SW_RTO), pentru economia de combustibil și optimizarea stării de încărcare a sistemului de stocare a energiei, format din baterii și ultracondensatori.

În cadrul Capitolului 5 au fost îmbunătățite rezultatele anterioare printr-un nou algoritm SWA_RTO, aplicat unui sistem de putere hibrid cu pile de combustibil în vederea obținerii unui consum mult mai redus de combustibil. Au fost efectuate teste de simulare pentru profilele: ciclul de conducere urban (ECE-15), ciclul de conducere extra-urban (EUDC) și ciclul de conducere urban + extra-urban (NEDC).

Capitolele 6 și 7 încheie lucrarea cu o serie de concluzii pozitive ce demonstrează capacitatea algoritmului GES de a-l integra într-o serie de strategii de optimizare în timp real, pentru îndeplinirea indicatorilor de performanță. Totodată, nu trebuie neglijate limitările pe care le are algoritmul, în a se adapta la noi unități de control, pentru sisteme cu pile de combustibil cu puteri diferite, limitări ce țin de partea de reglare și calibrare a parametrilor software.

Capitolul 2

Strategii de management energetic pentru principalele topologii de sisteme de propulsie pentru un vehicul electric cu pilă de combustibil

Vehiculele FCEV și vehiculele electrice hibride cu pilă de combustibil (FCHEV) utilizează o combinație între pilele de combustibil (FC), sistemul de baterii (B) și sistemul de ultracondensatori (UC). Pentru a crește densitatea de putere și pentru a satisface cererea de putere la încărcare, este necesar integrarea unui sistem de management energetic (EMS) [1].

2.1 Topologiile sistemelor de propulsie cu pile de combustibil și ale convertoarelor DC/DC

Toate vehiculele electrice (AEVs) utilizează numai energie electrică pentru sistemul de propulsie al autovehiculelor. Acestea pot folosi ca sursă de energie de rezervă (backup) un sistem de baterii, pile de combustibil sau o soluție hibridă.

2.1.1 Vehicule electrice cu pile de combustibil (FCEVs)

Sistemul de propulsie al FCEVs/FCHEVs poate fi realizat în trei moduri: pilă de combustibil + baterie (FC + B), pilă de combustibil + ultracondensator (FC + UC) și pilă de combustibil + baterie + ultracondensator (FC + B + UC) [2].

2.1.2 Vehicule electrice hibride cu pile de combustibil (FCHEVs)

Figura 2.2 prezintă tipul de configurație: pilă de combustibil + sistem de baterii + ultracondensatori pe care îl poate avea un vehicul de tip FCHEV.

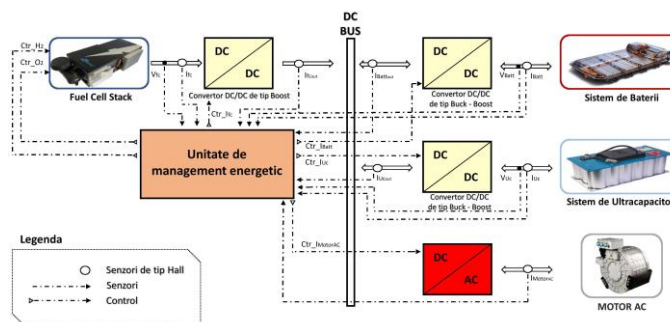


Figura 2.2 Topologia vehiculului electric hibrid cu pilă de combustibil (Topologia T5)

2.1.3 Stadiul actual al tehnologiilor pilelor de combustibil, în industria auto

De-a lungul timpului, diferiți producători de mașini din diferite țări au abordat dezvoltarea FCEVs după cum urmează [3]: Germania (Europa), Japonia, Coreea și China (Asia) și SUA (America de Nord) (vezi Figura 2.3).

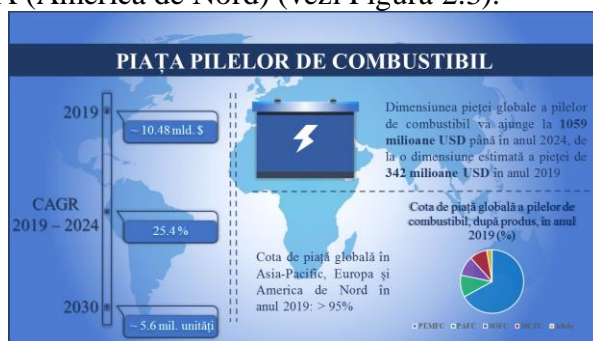


Figura 2.3 Piața pilelor de combustibil

2.1.4 Convertoare DC/DC pentru Vehicule Electrice cu Pile de Combustibil

Convertoarele DC/DC sunt echipamente electronice ce convertesc un nivel de tensiune electrică, de obicei instabil la intrare, într-o tensiune electrică stabilă la ieșire. În domeniul auto, tensiunea electrică utilă pentru propulsorul electric este în intervalul 400–700 V. Topologiile convertoarelor DC/DC sunt împărțite în două categorii: neizolate și izolate [4].

2.1.4.1 Convertoare DC/DC neizolate

Prima topologie a convertoarelor DC/DC neizolate este convertorul de tip boost cu o eficiență de aproximativ 95% potrivit pentru a servi ca interfață între pila de combustibil și magistrala DC. A doua topologie este convertorul DC/DC de tip buck - principala caracteristică este aceea de a produce o tensiune electrică mai mică la ieșire decât cea de intrare și este conceput pentru a asigura un curent de riplu redus la ieșire. A treia topologie este convertorul buck-boost – acesta crește sau scade tensiunea electrică de

ieșire și inversează polaritatea tensiunii de intrare. Pentru interfațarea surselor de energie regenerabile, convertorului DC/DC de tip cuk-cuk neizolat cu trei porturi este prezentat în lucrarea.

2.1.4.2 Convertoare DC/DC izolate

Convertoarele DC/DC izolate sunt convertoare care au un transformator integrat în structura lor pentru a obține izolarea DC între intrare și ieșire. Transformatorul funcționează la frecvența de comutare a convertorului până la valori de sute de kHz [5].

2.1.4.3 Convertoare DC/DC – Noi topologii

Odată cu dezvoltarea de noi tehnologii în domeniul auto pentru aplicațiile EV, HEV, FCEV, FCHEV și AEV, obiectivul principal al cercetătorilor este de a găsi noi soluții tehnologice pentru a răspunde provocărilor acestui segment. Există mulți factori care stau la baza creșterii performanței unui convertor, cum ar fi suprimarea zgomotului electric în sistem, valoare tensiunii de riplu scăzută a condensatorilor ($< 1\%$), valoarea curentului de riplu, pierderile de comutare sau implementarea de noi componente active sau pasive, crește eficiența sistemul [6].

2.2 Strategia de gestionare a energiei pentru vehiculele electrice cu pile de combustibil

Reducerea consumului de hidrogen prin optimizarea consumului de energie este subiectul multor cercetări. Totodată pe lângă evaluarea consumului de combustibil, strategiile de control au rol în prevenirea degradării sistemelor de stocare a energiei, baterii și ultracondensatori.

2.2.1 Analiza strategiilor bazate pe reguli (Rule-Based Strategies) în FCEVs

Controlul bazat pe seturi de reguli are o eficiență foarte bună în concordanță cu procesoarele integrate, dar în mod uzual ele se bazează pe legi empirice, iar rezultatele nu sunt dintre cele mai optime.

2.2.2 Analiza strategiilor bazate pe optimizare (Optimisation-Based Strategies) în FCEV

2.2.2.1 Strategia de optimizare globală (Global Optimization)

Strategiile de optimizare globale sunt adesea folosite pentru reducerea consumului de combustibil prin optimizarea fluxului de energie al sistemului de propulsie. Sunt evidențiate câteva exemple de implementare a unor algoritmi, utilizați pentru economia de combustibil, în sfera strategiilor de optimizare globale [7].

2.2.2.2 Strategia de optimizare în timp real (Real-Time Optimization)

Cea mai importantă caracteristică a strategiilor de optimizare în timp real este puterea de procesare a informațiilor colectate de la ESS, în scopul automatizării controlului energiei pentru a preveni îmbătrânirea componentelor. Chiar dacă proiectarea unor astfel de algoritmi este mai dificil de realizat, în comparație cu celelalte strategii de gestionare a energiei, strategiile în timp real sunt importante, deoarece dezvoltarea FCEV trebuie să aibă un final competitiv pe piața mondială [8].

2.2.3 Analiza strategiilor bazate pe învățare (Learning Based Strategies) în FCEV

Strategiile LB se bazează pe seturi mari de date cu informații istorice și date în timp real, pentru a obține un control optim. Principalul avantaj al acestor strategii este învățarea și capacitatea de adaptare, dar și controlul fără model [9].

2.3 Discuții și Perspective

Ciclul de viață al unei stive de pile de combustibil poate fi clasificat din punct de vedere tehnico-economic într-o etapă de fabricație și o altă etapă reprezentată de utilizatorul final. Astfel, costul total al unui sistem de pile de combustibil de 80 kW_{net} este între 20 – 30 USD/kW.

Principalele provocări în adoptarea tehnologiilor FC ca sisteme de propulsie auto, sunt următoarele:

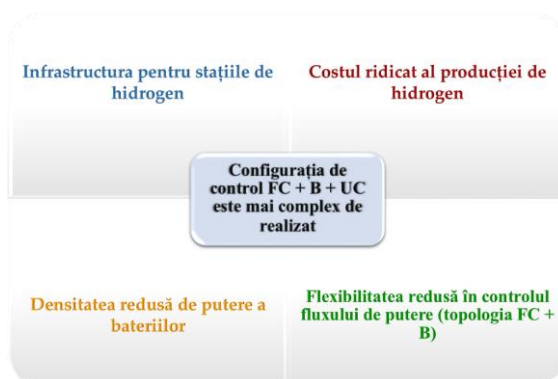


Figura 2.11 Principalele provocări în adoptarea tehnologiilor Fuel Cell (FC) ca sistem de propulsie auto

2.4 Rezumat și concluzii

Pentru a îmbunătăți performanța energetică, au fost analizată o serie de strategii de management energetic, prezentând principiile fundamentale ale tehnicilor existente cu avantajele și dezavantajele utilizării lor, obiectivele fiind acelea de reducere a consumului de hidrogen și prevenirea degradării sistemului ESS.

Astfel, progresul realizat de dezvoltatorii de software în domeniul inteligenței artificiale oferă cercetătorilor posibilitatea de a avea un potențial maxim în abilitățile

Capitolul 2 – Strategii de management energetic pentru principalele topologii de sisteme de propulsie pentru un vehicul electric cu pilă de combustibil

de proiectare ale noilor algoritmi de control, prin hibridizare cu tehnicile existente, pentru a elimina incertitudinile privind robustețea EMS

Capitolul 3

Modelarea arhitecturii alese pentru vehiculul electric cu pilă de combustibil și analiza strategiilor de management energetic

Problema optimizării performanței PEMFC este reprezentată de eficiența sistemului printr-o serie de parametri. Astfel, trebuie acordată o atenție deosebită fluxului de aer pentru a asigura o funcționare eficientă, durabilă și fiabilă. Parametrul definitoriu în răspunsul dinamic al debitului de aer variabil al sistemului este raportul de exces de oxigen (OER) [10].

3.1 Sistem de energie hibrid cu pilă de combustibil

Eficiența energetică globală a HPS FC/ESS ar putea fi maximizată prin identificarea celui mai bun grad de hibridizare și a strategiei adecvate de management a energiei a mai multor surse și sarcini.

3.1.1 Modelul sistemului pilei de combustibil (Fuel Cell Stack)

Pentru realizarea modelării arhitecturii alese s-a optat pentru un model prestabilit de stivă PEMFC de 6 kW – 45 V din toolbox-ul SimPowerSystem® al softului Matlab/Simulink.

3.1.1.1 Controlul fluxului de aer

Debitul de aer al PEMFC trebuie controlat rapid, dar robust și eficient. Urmărirea MPP folosind controlul ES (extremum seeking – căutarea extremului) bazat pe o schemă de calcul este folosită pentru a obține valoarea optimă a referinței stoichiometriei oxigenului [11].

3.1.1.2 Controlul fluxului de hidrogen

Puterea pilei de combustibil poate fi reglată direct prin controlul alimentării cu hidrogen. Reglarea curentă este limitată de dimensiunea pilei de combustibil (care

stabilește o impedanță internă minimă) și de domeniul dinamic al reguletoarelor debitului de masă. Buclele de control, ale alimentărilor cu reactanți trebuie să realizeze un răspuns rapid al FCHPS la modificările sarcinii.

3.1.1.3 Controlul fluxului de alimentare

În această lucrare, FuelFr și AirFr sunt intrările controlate de reguletoarele de combustibil (3.1) și, respectiv aer (3.2):

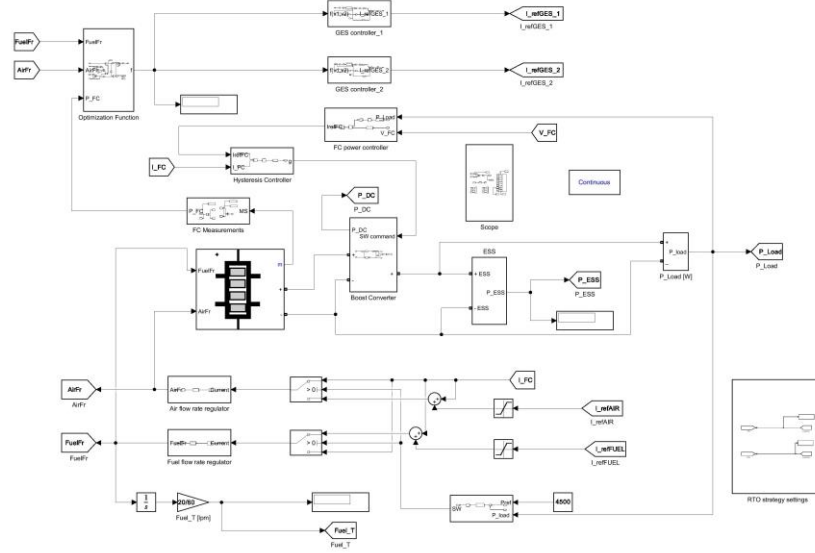


Figura 3.3 Arhitectura FCHPS bazată pe controlul global de căutare a extremului (GES)

$$I_{ref(Fuel)} = \begin{cases} I_{FC}, & \text{if } P_{DCreq} \leq P_{ref} \\ I_{FC} + I_{ref(GES_2)}, & \text{if } P_{DCreq} > P_{ref} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$I_{ref(Air)} = \begin{cases} I_{FC} + I_{ref(GES_1)}, & \text{if } P_{DCreq} \leq P_{ref} \\ I_{FC}, & \text{if } P_{DCreq} > P_{ref} \end{cases} \quad (3.4)$$

Pragul optim P_{ref} pentru cea mai bună economie de combustibil va fi găsit prin analiza de sensibilitate efectuată pentru acest parametru.

3.1.2 Sistem de stocare a energiei (ESS)

În acest studiu, topologia semi-activă ESS utilizează sistemul de baterii litiu-ion de 100 Ah (conectate direct la 200 V DC) și sistemul de ultracondensatori 50F (conectate printr-un convertor bidirecțional buck-boost).

3.1.2.1 Baterii

Pentru o baterie litiu-ion de 100 Ah capacitatea acesteia (C_{Bat}) poate fi estimată cu ecuația (3.11):

$$C_{Bat} = \frac{\Delta P_{load} * n_{cycle} * T_{cycle(Bat)}}{\Delta V_{Bat}} \quad (3.11)$$

, unde impulsul de energie stocat ($\Delta P_{load} \cdot T_{cycle(Bat)} = 4800 \text{ Ws}$) va da o scădere de tensiune până la ΔV_{Bat} ($= 1,5\% V_{Bat} = 3 \text{ V}$) în timpul fiecărui ciclu de încărcare ($n_{cycle}=100$).

3.1.2.2 Condensatorii and ultracondensatorii

Condensatorii și ultracondensatorii sunt utilizați pentru a atenua impulsurile de putere în timpul a 100 de cicluri de sarcină ($n_{cycle}=100$), compensând dinamic echilibrul instantaneu al fluxului de putere.

3.1.3 Sarcina variabilă a FCHPS

Cererea de sarcină variabilă se bazează pe un profil de tip treaptă (urcare și coborâre), cu niveluri de putere de 3000 W, 4000 W, 5000 W, 6000 W, 7000W, 6000 W, 5000 W, 4000 W, 3000 W sunt examinate pentru secvența de timp de 0–2 s, 2–4 s, 4–8 s, 8–10 s, 10–12 s, 12–14 s, 14–16 s, 16–18 s, 18–20 s.

3.1.4 Problema formulării funcției de optimizare

Problema formulării funcției de optimizare pentru FCHPS este definită de relația (3.14):
Maximizare:

$$f(x, AirFr, FuelFr, P_{load}) = k_{net} * P_{FCnet} + k_{fuel} * Fuel_{eff} \quad (3.14)$$

unde P_{load} reprezintă puterea la sarcină, $AirFr$ și $FuelFr$ sunt debitele de alimentare cu combustibil ale pilei, P_{FCnet} este puterea netă a FC, $Fuel_{eff}$ este eficiența consumului de combustibil ($Fuel_{eff} = P_{FCnet} / FuelFr$), iar K_{net} și K_{fuel} sunt doi coeficienți de ponderare care pot fi selectați sau reglați pe baza obiectivului stabilit pentru Unitatea de management energetic (EMU).

3.2 Strategia de gestionare a energiei pentru sistemul de putere hibrid cu pilă de combustibil

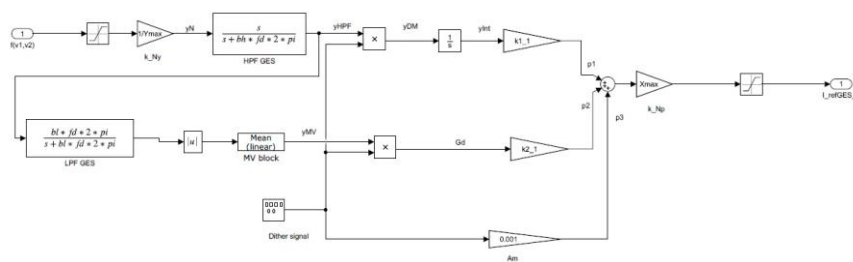


Figura 3.10 Controler GES (Global Extremum Seeking)

Bucula de urmărire a schemei GES propuse operează în timpul localizării optimului, MEP (Maximum Efficiency Point) pentru FCHPS. Pentru a arăta efectul coeficienților

de ponderare asupra consumului total de combustibil, vor fi analizate trei cazuri: cazul A ($K_{net}=0.5$, $K_{fuel}=20$), cazul B ($K_{net}=0.5$, $K_{fuel}=35$) și cazul C ($K_{net}=0.5$, $K_{fuel}=50$).

Tabelul 3.1 Stabilirea strategiilor RTO si a strategiei de referință sFF (Static Feed-Forward) pentru modelul sistemului de putere hibrid cu pila de combustibil

Strategie Referința	RTO_1	RTO_2	RTO_3	RTO_4	RTO_5	RTO_6	RTO_7	sFF
$I_{ref(Air)}$	I_{FC}	$I_{FC} + I_{GES1}$	I_{ref}	I_{FC}	I_{ref}	$I_{FC} + I_{GES2}$	$I_{FC} + I_{GES1}$	I_{FC}
$I_{ref(Fuel)}$	$I_{FC} + I_{GES1}$	I_{FC}	I_{FC}	I_{ref}	$I_{FC} + I_{GES2}$	I_{ref}	$I_{FC} + I_{GES1}$	I_{FC}
$I_{ref(Boost)}$	I_{ref}	I_{ref}	I_{GES1}	I_{GES1}	I_{GES1}	I_{GES1}	I_{ref}	I_{ref}

Optimul funcției de optimizare va fi urmărit de strategia RTO_1 – RTO_7 bazată pe GES în cazul a trei seturi de coeficienți de ponderare K_{net} și K_{fuel} : (0.5, 20), (0.5, 35) și (0.5, 50). Valoarea indicatorilor de performanță η_{sys} , $Fuel_{eff}$ și $Fuel_T$ folosind strategiile RTO, în comparație cu strategia sFF sunt prezentate în Tabelul 3.4.

Tabelul 3.4. Economia de combustibil a strategiilor RTO, în comparație cu strategia de referință sFF, pentru $t = 20$ s.

Knet = 0.5; GES ₁ =50 Hz; GES ₂ =100 Hz						
Nr. Crt.	K_{fuel}	$Fuel_{T_SFF}$ [litri/h]	$Fuel_{T_RTO}$ [litri/h]	Δ_{FuelT} [litri/h]	$Fuel_{eff}$ [W/lpm]	η_{sys} [%]
RTO_1	35	294	280.9	13.1	116	89.36
RTO_2	35	294	282.7	11.3	114.6	87.72
RTO_3	20	294	276.3	17.7	113.8	88.51
RTO_4	20	294	273.2	20.8	114.4	88.99
RTO_5	20	294	288.6	5.4	108.7	88.63
RTO_6	20	294	276.8	17.2	115.6	89.14
RTO_7	20	294	290	4	113.3	87.84

3.3 Rezumat și concluzii

Diferența în economia de combustibil ar putea fi de până la 20.8 litri în cazul ciclului de sarcină variabilă, în comparație cu strategia sFF, pentru strategiei RTO_4, totodată fiind susținută și de indicatorii de performanță η_{sys} și Δ_{FuelT}

Performanța în toți indicatorii depinde de valorile coeficienților de ponderare ca urmare a modificării funcției de optimizare și acest lucru poate reprezenta un avantaj pentru FCHPS, întrucât sistemul poate selecta strategia corespunzătoare legată de profilul de încărcare.

Capitolul 4

Tehnici avansate de control, optimizare și diagnoză a sistemelor dintr-un vehicul electric cu pilă de combustibil – proiectare și simulare

Noutatea și contribuția principală a acestui capitol se concentrează pe îmbunătățirea performanței vehiculului în ciclul de conducere EUDC prin intermediul unui control inovator, pentru economia de combustibil și optimizarea stării de încărcare a sistemului de stocare a energiei [12].

4.1 Topologia arhitecturii FCHEV

FCHEV este realizat din trei surse de energie: pila de combustibil cu membrană schimbătoare de protoni (PEMFC) ca sursă principală și sistemul de stocare a energiei (ESS) format din baterii Li-ion și ultracondensatori.

4.1.1 Modelul grupului motopropulsor al vehiculului

Pentru realizarea modelării grupului motopropulsor în programul Matlab/Simulink, s-a implementat un model de caroserie rigidă cu trei grade de libertate (3DOF) cu rigiditate configurabilă a osiilor pentru a calcula mișcarea longitudinală, verticală și de tangaj.

4.1.1.1 Modelul de conducător auto

Modelul de conducător auto implementează un controler de urmărire a vitezei longitudinale parametrice pentru generarea de comenzi de accelerare și frânare normalizate bazate pe viteze de referință și de feedback.

4.1.1.2 Motor electric de curent continuu (DC Motor)

Motorul electric utilizat în acest studiu este un motor/generator de curent continuu (*DC Motor*). Sunt luate în considerare condițiile statice de funcționare în domeniul liniar al motorului, model putând fi utilizat pentru simulări dinamice.

$$P_e = P_{mec} \eta^k \quad (4.10)$$

, unde P_e reprezintă puterea electrică, P_{mec} – puterea mecanică, η – eficiența conversiei puterii electrice din cererea de cuplu mecanic, iar k reprezintă:

$k = -1$, dacă se utilizează în modul motor ≥ 0 ,

$k = 1$, dacă se utilizează în modul generator < 0 .

4.1.1.3 Ciclu european de conducere, în regim extra-urban (EUDC)

Pentru a analiza performanța unui autovehicul urban, folosirea unui ciclu de conducere este inevitabil. Viteza maximă a ciclului EUDC este de 120 km/h, cu o durată totală de 400 s (6 minute 40 s secunde), iar distanța teoretică este de 6956 metri, cu o viteză medie de 62.6 km/h.

4.1.2 Sistemul de pile de combustibil

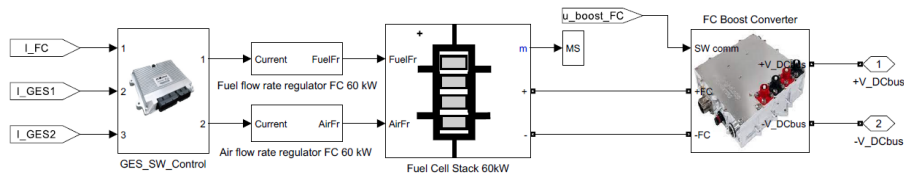


Figura 4.9 Modelul sistemului de pile de combustibil conectat la magistrala DC, printr-un convertor unidirecțional de tip boost

În vederea realizării unei model ce se apropie de condițiile reale ale unui vehicul cu pile de combustibil, a fost ales un sistem FC de 60 kW, ca sursă principală de putere.

Trebuie notat faptul că, pe lângă economia de combustibil ($Fuel = \int FuelFr(t)dt$) în timpul ciclului EUDC, modelul urmărește și alți indicatori de performanță, precum eficiența consumului de combustibil ($Fuel_{eff} = P_{FCnet}/FuelFr$) și eficiența electrică a sistemului FC ($\eta_{sys} = P_{FCnet}/P_{FC}$), unde P_{FC} este puterea FC și P_{FCnet} este puterea netă FC.

4.1.3 Sistem de stocare a energiei (ESS)

Topologia ESS este formată dintr-un sistem de baterii Li-ion de 232 Ah, 212 V și un sistem de ultracondensatori 38.5 F, 200V, conectate în paralel la magistrala DC prin 2 convertoare DC/DC bidirecționale de tip buck-boost, pentru a compensa dinamic puterea pe magistrala DC și a stabili tensiunea la 400 V.

4.1.4 Strategia propusă pentru managementul energiei

Strategia de management energetic și control (Figura 4.13) a fost dezvoltată pentru a minimiza consumul de combustibil, în cadrul unui ciclu EUDC, pentru a extinde durata de viață a sistemului ESS și pentru a maximiza eficiența generală a FCHEV.

Algoritmului de management al puterii, ce generează cuplul motor de comandă, pentru controlul pilei de combustibil de tip PEM, implementează un controler de tip LFC pentru a menține întreaga gamă a cererii de putere, astfel încât variația energiei bateriei și ultracondensatorilor să fie permanent într-o bandă îngustă, funcționând în modul de încărcare susținută (CS). Așadar, curentul de comandă al sistemului FC este

$$I_{FCCurrCmd} \cong \frac{P_{veh,MV}}{\eta_{FCboost} V_{FCMV}}.$$

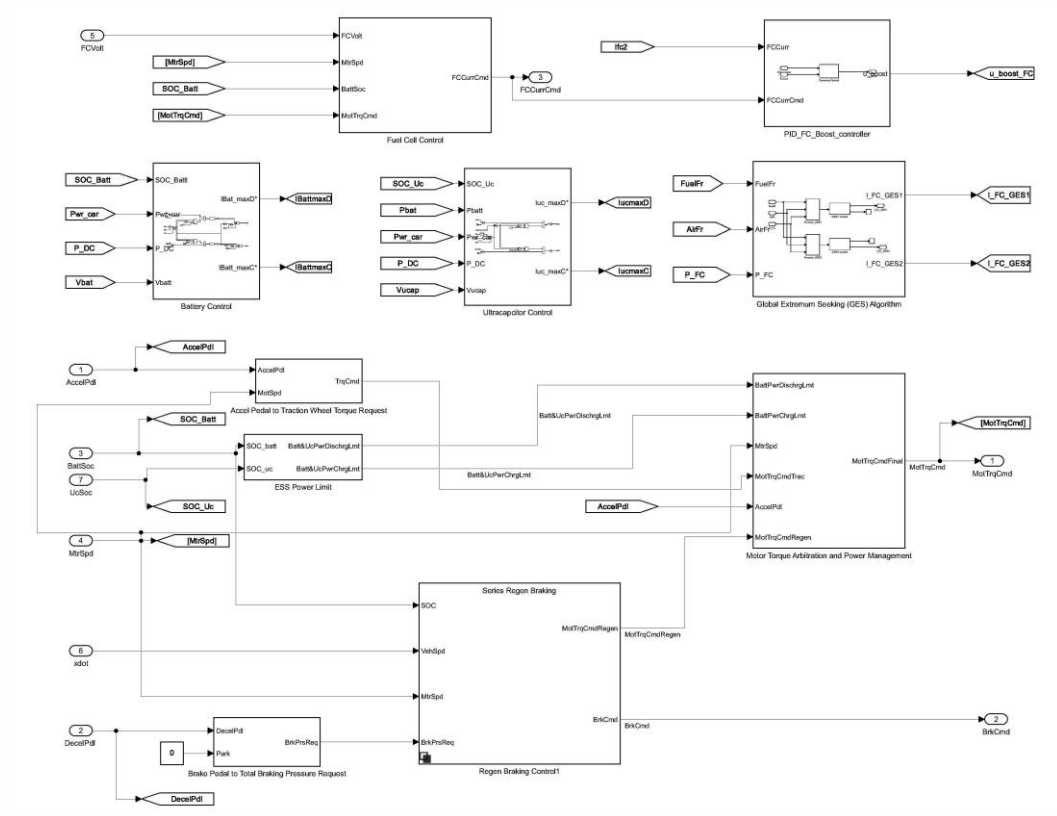


Figura 4.13 Strategia de management energetic și control pentru sursele de energie ale FCHEV

4.2 Rezultatele simulării arhitecturii FCHEV cu strategie de control GES în timp-real

Optimul funcției de optimizare va fi urmărit de strategia GES-RTok cu un semnal sinusoidal de cautare $S_d = \sin(\omega t)$, unde $\omega = 2\pi f_d$ ($f_{d1} = 500 \text{ Hz}$ și $f_{d2} = 1000 \text{ Hz}$) pentru a compara economia de combustibil obținută pentru FCHPS în cadrul strategiilor sFF, RTO_1, RTO_2, RTO_3, SW_RTO_1/2 (cu cinci valori ale $P_{ref} =$

[11 kW; 21 kW; 31 kW; 41kW; 51 kW]).. Coeficienții de pondere k_{net} și k_{fuel} au fost setați la 0.5, respectiv [20; 37].

Economia de combustibil este obținută în acest studiu pentru toate strategiile GES_RTO în comparație cu strategia de referință sFF, și validează rezultatele obținute pentru cererea de sarcină variabilă în ciclul extra-urban.

Tabelul 4.8 Economia de combustibil a strategiilor RTO, în comparație cu strategia de referință sFF, pentru ciclul EUDC ($t = 400$ s).

Knet = 0.5; GES ₁ =500 Hz; GES ₂ =1000 Hz						
Nr. Crt.	K _{fuel}	Fuel _{T_sFF} [litri/h]	Fuel _{T_RTO} [litri/h]	Δ_{FuelT} [litri/h]	Fuel _{eff} [W/lpm]	η_{sys} [%]
RTO_1	20	1753.33	1721.11	32.22	100.8	98.14
RTO_2	37	1753.33	1741.11	12.22	111.9	98.64
RTO_3	20; 37	1753.33	1713.33	40.00	108.7	98.81
SW_RTO_1/2	20; 37	1753.33	1702.22	51.11	105.0	98.71

Figura 22 prezintă strategia cu cea mai buna economie de referință SW_RTO_1/2, $P_{ref} = 21$ kW, în cadrul ciclului extra-urban EUDC și profilurile de putere ale $P_{veh.}$, P_{FC} , P_{Bat} și P_{UC} .

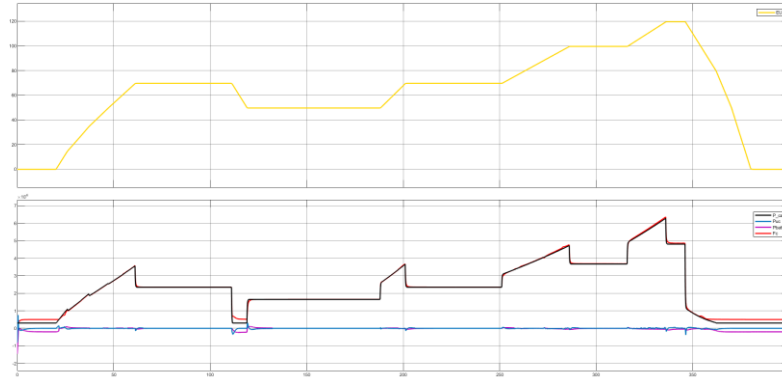


Figura 4.22 Profilurile de putere ale $P_{veh.}$, P_{FC} , P_{Bat} și P_{UC} , în cadrul unui ciclu extra-urban EUDC, pentru strategia SW_RTO_1/2, $P_{ref} = 21$ kW

Trebuie reținut faptul că, strategiile RTO_3 și SW_RTO_1/2 folosesc două controlere GES, în loc de un controlere pentru strategiile RTO_1 și RTO_2, astfel că primele variante sunt mai complex de implementat.

4.3 Rezumat și concluzii

Strategia de comutare este propusă pentru a crește și mai mult economia de combustibil pentru un profil extra-urban. Astfel, cea mai buna economie s-a realizat pentru $P_{ref} = 21$ kW, cu prag superior de comutare 2.5 kW și prag inferior de 1 kW.

Capitolul 5

Algoritmi pentru reducerea consumului de hidrogen la vehiculele electrice cu pilă de combustibil – proiectare și testare

În acest capitol au fost îmbunătățite rezultatele anterioare printr-un nou algoritm SWA_RTO, prin calculul algoritmic al unui factor A, ce selectează cea mai buna strategie de optimizare, aplicate unui sistem de putere hibrid cu pile de combustibil în vederea reducerii consumului de combustibil.

5.1 Algoritmi de reducere a consumului de combustibil în FCHEV

Algoritmul SWA_RTO, comută între controlerile de oxigen și hidrogen ale pilei FC, în funcție de puterea totală de pe magistrala DC (P_{car}) și de puterea de referință setată (P_{ref}).

Evaluarea consumului total de combustibil pentru strategia SWA_RTO (cu parametrii $K_{fuel} = 20$, $K_{net} = 0.5$, $f_{GES1} = 500$ Hz, $f_{GES2} = 1000$ Hz) utilizând FCHPS cu setările corespunzătoare menționate, s-a realizat în două etape și ține cont de o serie de cazuri pentru determinarea celor mai bune valori ale vectorului A.

Tabelul 5.2 Etapa 1 a strategiei SWA_RTO și determinarea vectorului A, în fiecare caz, pentru ciclul EUDC ($t = 400$ s).

P_{car1} [kW]	3	6	12	18	21	24	30	36	42	48	54	60	A
Case1	RTO1			RTO1			RTO1			RTO2			[20 10 5 3.33 2.85 2.5 2 1.66 1.43 0.0625 0.0555 0.05]
Case2	RTO1			RTO1			RTO2			RTO2			[20 10 5 3.33 2.85 2.5 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case3	RTO1			RTO2			RTO2			RTO2			[20 10 5 0.167 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case4	RTO1			RTO2			RTO1			RTO2			[20 10 5 0.167 0.143 0.125 2 1.66 1.43 0.0625 0.0555 0.05]
Case5	RTO1			RTO2			RTO2			RTO1			[20 10 5 0.167 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 1.25 1.11 1]
Case6	RTO2			RTO2			RTO2			RTO1			[1 0.5 0.25 0.167 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 1.25 1.11 1]

Case7	RTO2	RTO2	RTO1	RTO1	[1 0.5 0.25 0.167 0.143 0.125 2 1.66 1.43 1.25 1.11 1]
Case8	RTO2	RTO1	RTO1	RTO1	[1 0.5 0.25 3.33 2.85 2.5 2 1.66 1.43 1.25 1.11 1]
Case9	RTO2	RTO1	RTO2	RTO1	[1 0.5 0.25 3.33 2.85 2.5 0.1 0.083 0.071 1.25 1.11 1]
Case10	RTO2	RTO1	RTO1	RTO2	[1 0.5 0.25 3.33 2.85 2.5 2 1.66 1.43 0.0625 0.0555 0.05]

Tabelul 5.3 Etapa 2 a strategiei SWA_RTO și determinarea vectorului A, în fiecare caz, pentru ciclul EUDC ($t = 400$ s).

P_{car2} [kW]	11	13	15	17	19	21	A
Case1	RTO1	RTO1	RTO2	RTO2	RTO1	RTO1	[20 10 5.45 4.62 0.2 0.176 3.16 2.86 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case2	RTO1	RTO2	RTO2	RTO2	RTO1	RTO1	[20 10 5.45 0.23 0.2 0.176 3.16 2.86 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case3	RTO1	RTO1	RTO2	RTO2	RTO2	RTO1	[20 10 5.45 4.62 0.2 0.176 0.158 2.86 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case4	RTO1	RTO2	RTO2	RTO2	RTO2	RTO1	[20 10 5.45 0.23 0.2 0.176 0.158 2.86 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case5	RTO1	RTO2	RTO1	RTO2	RTO1	RTO2	[20 10 5.45 0.23 4 0.176 3.16 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case6	RTO2	RTO2	RTO1	RTO1	RTO2	RTO2	[20 10 0.27 0.23 4 3.53 0.158 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case7	RTO2	RTO1	RTO1	RTO1	RTO2	RTO2	[20 10 0.27 4.62 4 3.53 0.158 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case8	RTO2	RTO2	RTO1	RTO1	RTO1	RTO2	[20 10 0.27 0.23 4 3.53 3.16 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case9	RTO2	RTO1	RTO1	RTO1	RTO1	RTO2	[20 10 0.27 4.62 4 3.53 3.16 0.143 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]
Case10	RTO2	RTO1	RTO2	RTO1	RTO2	RTO1	[20 10 0.27 4.62 0.2 3.53 0.158 2.86 0.125 0.1 0.083 0.071 0.0625 0.0555 0.05]

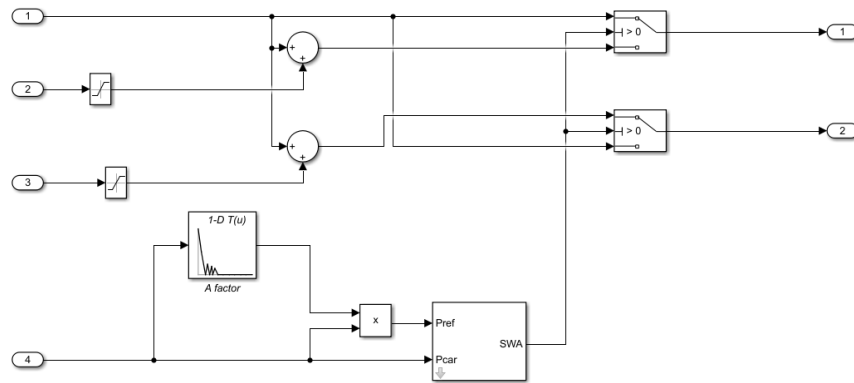


Figura 5.3 Algoritmul SWA_RTO, în timp real, pe bază de GES (Global Extremum Seeking)

Valoarea pragului P_{ref} este stabilit optim pentru două etape de calcul diferite: prima etapă (Et.1) definește vectorul A pe intervale în întreaga gamă de putere, 3 – 60 [kW], iar a doua etapă (Et.2) definește vectorul A pe intervale, în gama de putere, 11 – 21 [kW].

5.2 Rezultatele experimentale ale noului algoritm de comutare în timp real în cadrul ciclurilor europene de testare

Pe baza rezultatelor pozitive obținute pe ciclurile europene de testare, pentru strategia SW_RTO_1/2, s-a validat noua strategie SWA_RTO, respectând aceeași parametrii pentru căutarea optimului funcției de optimizare: $K_{fuel} = 20$, $K_{net} = 0.5$, $f_{GES1} = 500$ Hz, $f_{GES2} = 1000$ Hz.

Tabelul 5.8 Economia de combustibil pentru strategia SWA_RTO, pentru ciclul EUDC ($t = 400$ s), în Etapa 1

Caz	Fuel _{T,FF} [litri/h]	Fuel _{T,SWA_RTO} [litri/h]	Δ_{FuelT} [litri/h]
Caz 1	1753.33	1721.11	32.22
Caz 2	1753.33	1701.11	52.22
Caz 3	1753.33	1701.11	52.22
Caz 4	1753.33	1716.67	36.67
Caz 5	1753.33	1720.00	33.33
Caz 6	1753.33	1721.11	32.22
Caz 7	1753.33	1761.11	-7.78
Caz 8	1753.33	1743.33	10
Caz 9	1753.33	1728.88	24.45
Caz 10	1753.33	1721.11	32.22

Tabelul 5.9 Economia de combustibil pentru strategia SWA_RTO, pentru ciclul EUDC ($t = 400$ s), în Etapa 2

Caz	Fuel _{T,FF} [litri/h]	Fuel _{T,SWA_RTO} [litri/h]	Δ_{FuelT} [litri/h]
Caz 1	1753.33	1700.00	53.33
Caz 2	1753.33	1700.00	53.33
Caz 3	1753.33	1700.00	53.33
Caz 4	1753.33	1701.11	52.22
Caz 5	1753.33	1701.11	52.22
Caz 6	1753.33	1700.00	53.33
Caz 7	1753.33	1701.11	52.22
Caz 8	1753.33	1701.11	52.22
Caz 9	1753.33	1700.00	53.33
Caz 10	1753.33	1700.00	53.33

5.3 Rezumat și concluzii

În concluzie, noua strategie de comutare propusă în această lucrare îmbunătățește economia de combustibil a sistemului de pile de combustibil și crește durata de viață a sistemului de stocare a energiei (ESS), pe întreg ciclul extra-urban EUDC. Soluția aleasă a demonstrat rezultate încurajatoare în economia de hidrogen și poate fi extrapolată pe toate ciclurile de conducere: NEDC, WLTP, FTP, etc.

Capitolul 6

Perspective și limitări privind aplicabilitatea tehnicilor avansate de control și optimizare pe baza algoritmilor GES

Pentru evaluarea și analiza limitărilor pe care le poate avea sistemul de management energetic, au fost selectate, spre comparație cu sistemul FCS de 60 kW, două sisteme de pile de combustibil de tip PEM de 30 kW și respectiv 100 kW.

6.1 Rezultatele experimentale ale sistemului de management energetic cu pilă de combustibil de tip PEM de 30 kW

Pentru evaluarea performanțelor sistemului s-a folosit un sistem PEMFC de 24 kW/80 V poate furniza cererea de sarcină la o scară de până la o putere de 30 kW.

Economia de combustibil, în cadrul ciclului EUDC, pentru strategiile RTO selectate în Tabelul 6.4 nu este îndeplinită la toate criteriile în comparație cu strategia de referință sFF, rezultatele cele mai bune fiind prezentate de strategia RTO_2 și SW_RTO_1/2. Se poate observa faptul că, există un ΔFuel_T mai mare atât pentru strategiile RTO_1 și RTO_3.

Tabelul 6.4 Economia de combustibil a strategiilor RTO, în comparație cu strategia de referință sFF, pentru ciclul EUDC ($t = 400$ s) și PEMFC de 30 kW.

Knet = 0.5;						
GES ₁ =500 Hz; GES ₂ =1000 Hz						
Nr. Crt.	K _{fuel}	Fuel _{T_sFF} [litri/h]	Fuel _{T_RTO} [litri/h]	Δ_{FuelT} [litri/h]	Fuel _{eff} [W/lpm]	η_{sys} [%]
RTO_1	37	8757	10170	-1413	99.02	97

RTO_2	37	8757	8744	13	112.4	98.24
RTO_3	20; 37	8757	10200	-1443	117.4	96.13
SW_RTO_1/2	20; 37	8757	7714	1043	105.9	96.74

6.2 Rezultatele experimentale ale sistemului de management energetic cu pilă de combustibil de tip PEM de 100 kW

În acest subcapitol, studiul a continuat cu implementarea unui sistemul PEMFC de 85.5 kW/300 V ce poate furniza cererea de sarcină la o scară de până la o putere de 100 kW.

Economia de combustibil $Fuel_{T(SW_RTO_1/2)}$, este prezentată în Tabelul 6.9 și arată că cea mai bună economie se obține pentru valoare $P_{ref} = 71 \text{ kW}$. Se poate observa că, există un $\Delta Fuel_T$ mai mare atât pentru strategiile RTO_1 și RTO_3.

Tabelul 6.9 Economia de combustibil a strategiilor RTO, în comparație cu strategia de referință sFF, pentru ciclul EUDC ($t = 400 \text{ s}$) și PEMFC de 100 kW.

Knet = 0.5;						
GES ₁ =500 Hz; GES ₂ =1000 Hz						
Nr. Crt.	K _{fuel}	Fuel _{T,sFF} [litri/h]	Fuel _{T,RTO} [litri/h]	Δ_{FuelT} [litri/h]	Fuel _{eff} [W/lpm]	η_{sys} [%]
RTO_1	37	4002	4612	-610	67.2	95.14
RTO_2	37	4002	3984	18	82.7	94.41
RTO_3	20; 37	4002	4614	-612	66.39	94.84
SW_RTO_1/2	20; 37	4002	3970	32	82.62	94.06

6.3 Rezumat și concluzii

În concluzie, strategia de comutare în timp real, propusă în această lucrare, îmbunătățește considerabil economia de combustibil a sistemului PEMFC și crește durata de viață a sistemului de stocare a energiei (ESS), pe întreg ciclul extra-urban EUDC. Perspectivile viitoare țin de noi soluții de îmbunătățite a algoritmul actual prin hibridizare cu algoritmi pe bază de învățare de tip Machine Learning, pentru a asigura un timp de dezvoltare și implementare mai scăzut, fără a crea diversitate și de a avea un cost redus, pentru a îndeplini obiectivele principale ale acestui studiu, economia de combustibil și îmbunătățirea performanțelor sistemelor PEMFC și ESS printr-un mod optim și predictiv.

Capitolul 7

Concluzii generale

Asigurarea performanțelor generale ale sistemului de propulsie hibrid din FCHEV s-a realizat cu ajutorul unor noi strategii de management energetic și a unui nou algoritm SWA_RTO, de comutare pe intervale, prin determinarea factorului A, în funcție de cererea de putere totală de pe magistrala DC (P_{car}) și de puterea pragului de referință (P_{ref}) stabilit în mod optim. Noul algoritm de comutare a utilizat cea mai bună strategie GES_RTO, ajustând nivelurile de putere pe întreg ciclul de conducere, pentru regulatorul de aer și regulatorul de combustibil, oferind cea mai bună economie, demonstrând astfel eficiența și capacitatea de integrare la nivel software pe orice unitate de management energetic.

Perspectivile viitoare privind îmbunătățirea strategiei actuale, SWA_RTO pe baza algoritmului GES se va realiza prin hibridizare cu algoritmi pe bază de învățare de tip Machine Learning, pentru a asigura implementare pe orice tip de vehicul hibrid cu pilă de combustibil.

7.1 Rezultate obținute

Rezultate obținute sunt prezentate în cele ce urmează, cu obiective atinse pe fiecare capitol, îndeplinind scopul acestei lucrări de cercetare, din cadrul Scolii Doctorale de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, SD-ETTI:

- O1. Analiza cercetărilor recente în domeniu, pe baza lucrărilor de referință selectate**
- O2. Alegerea și prezentarea strategiilor de management energetic pe baza analizei din Capitolului 2**
- O3. Proiectarea și simularea unui model de testare MIL, în vederea evaluării FCHEV în cadrul unui ciclu european de conducere EUDC**
- O4. Proiectarea și testarea unui nou algoritm de comutare pentru reducerea consumului de hidrogen**
- O5. Perspective și limitări privind aplicabilitatea strategiilor de optimizare în timp real pe baza algoritmilor GES**

7.2 Contribuții originale

Contribuțiile principale realizate în Capitolul 2 sunt următoarele:

1. Analiza și descrierea topologiilor FCEV/FCHEV, cu accent pe avantaje/dezavantaje, tip de control și aplicații [2S];
2. Studiu de caz, în vederea clasificării strategiilor de management energetic EMS și caracterizare în funcție de performanțele și beneficiile fiecărei strategii [2S];

Contribuțiile principale realizate în Capitolul 3 sunt următoarele:

1. Modelarea arhitecturii FCHPS bazată pe controlul global de căutare a extremului (GES) [1S], [8S], [9S];
2. Analiza de sensibilitate pentru a indentifica cele mai bune valori ale coeficienților de pondere a funcției de optimizare și a influenței frecvenței generatorului sinusoidal pentru consumul total de combustibil [6S], [7S], [10S];
3. Simularea strategiilor de optimizare în timp real și identificarea, pe baza indicatorilor de performanță și a economiei de combustibil, a celor mai bune strategii de implemetare în EMS [10S], [11S];

Contribuțiile principale realizate în Capitolul 4 sunt următoarele:

1. Proiectarea și simularea unui model de testare în buclă închisă, MIL, pentru validarea unității de management energetic și a strategiilor RTO cu cele mai bune rezultate identificate în Capitolul 3 [12S];
2. Propunerea unei strategii de comutare SW_RTO între cele mai bune strategii RTO indentificate pentru a crește și mai mult economia de hidrogen într-un ciclu extra-urban de testare EUDC [12S];

Contribuțiile principale realizate în Capitolul 5 sunt următoarele:

1. Proiectarea și testarea unei strategii în timp real, SWA_RTO, ce se bazează pe un algoritm de calcul al unui factor A ce face comutarea între cele mai bune strategii pe baza algoritmilor GES [13S];
2. Analiza de sensibilitate pentru a identifica cel mai bun factor de comutare între modurile de operare ale strategiilor cu cele mai bune rezultate în Capitolul 4 [13S];

Contribuțiile principale realizate în Capitolul 6 sunt următoarele:

1. Modificarea modelului FCHEV cu două sisteme FC de 30 kW, respectiv 100 kW, pentru a demonstra capacitatea de adaptabilitate la o serie de sisteme cu diferite valori ale puterii electrice generate sistemului de propulsie hibrid.
2. Analiza limitărilor pe care le impune modelul și evaluarea perspectivelor de îmbunătățire atât la nivel de algoritm de optimizare, GES, cât și la nivel de reglare și calibrare software.

7.3 Lista lucrărilor originale

Articole publicate în reviste din fluxul științific internațional principal, redau activitatea de cercetare în domeniul tezei de doctorat, printr-o participare activă atât la conferințe naționale și internaționale, cât și publicarea în reviste de specialitate indexate/cotate ISI.

7.3.1 ISI WoS:

- [1S]. Bizon, N., Oproescu, M., Thounthong, P., Varlam, M., Carcadea, E., Culcer, M., ... & Sorlei, I. S. (2020). Improving the fuel economy and battery lifespan in fuel cell/renewable hybrid power systems using the power-following control of the fueling regulators. *Applied Sciences*, 10(22), 8310. <https://doi.org/10.3390/app10228310>
- [2S]. Sorlei, I. S., Bizon, N., Thounthong, P., Varlam, M., Carcadea, E., Culcer, M., ... & Raceanu, M. (2021). Fuel cell electric vehicles—A brief review of current topologies and energy management strategies. *Energies*, 14(1), 252. <https://doi.org/10.3390/en14010252>
- [3S]. Appasani, B., Mishra, S. K., Jha, A. V., Mishra, S. K., Enescu, F. M., Sorlei, I. S., ... & Bizon, N. (2022). Blockchain-enabled smart grid applications: Architecture, challenges, and solutions. *Sustainability*, 14(14), 8801. <https://doi.org/10.3390/su14148801>
- [4S]. Iordache, M., Oubraham, A., Sorlei, I. S., Lungu, F. A., Capris, C., Popescu, T., & Marinioiu, A. (2023). Noble metals functionalized on graphene oxide obtained by different methods—new catalytic materials. *Nanomaterials*, 13(4), 783. <https://doi.org/10.3390/nano13040783>
- [5S]. Oubraham, A., Ion-Ebrasu, D., Vasut, F., Soare, A., Sorlei, I. S., & Marinioiu, A. (2023). Platinum-functionalized graphene oxide: One-pot synthesis and application as an electrocatalyst. *Materials*, 16(5), 1897. <https://doi.org/10.3390/ma16051897>
- [6S]. Hoarcă, I. C., Bizon, N., Sorlei, I. S., & Thounthong, P. (2023). Sizing design for a hybrid renewable power system using HOMER and iHOGA simulators. *Energies*, 16(4), 1926. <https://doi.org/10.3390/en16041926>

7.3.2 Baze de date recunoscute de CNADCU

- [7S]. Bizon, N., Sorlei, S., Carcadea, E., Culcer, M., Iliescu, M., & Raceanu, M. (2020, June). Sensitivity Analysis Based on the Defined Load Threshold for a new Fuel Economy Strategy used in Fuel Cell Vehicles. In *2020 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI50035.2020.9223181>
- [8S]. Oproescu, M., Bizon, N., Carcadea, E., Culcer, M., Iliescu, M., Raceanu, M., & Sorlei, S. (2020, June). Performance of the load-following control switched to the air and hydrogen regulators of the fuel cell system. In *2020 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI50035.2020.9223155>
- [9S]. Bizon, N., Oproescu, M., Carcadea, E., Raceanu, M., Raboaca, M. S., & Sorlei, S. (2021, July). Performance of the Fuel Economy Strategies for Fuel Cell Systems under Power Tracking Control. In *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515176>

- [10S]. Bizon, N., Carcadea, E., Iliescu, M., Raboaca, M. S., Manta, I., & Sorlei, S. I. (2021, July). Estimation of hydrogen consumption for proton-exchange membrane fuel cells systems. In *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515021>
- [11S]. Bizon, N., Takorabet, N., Thounthong, P., Carcadea, E., Raboaca, M. S., & Sorlei, S. I. (2022, June). Power-following strategy for microgrids based on multiple renewable/fuel cells systems. In *2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI54874.2022.9847467>
- [12S]. Sorlei, I. S. (2024, June). Fuel economy and overall efficiency optimization of a Fuel Cell Electric Vehicle in a European Extra-Urban Drive Cycle (EUDC). In *2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI61503.2024.10607408>
- [13S]. Sorlei, I. S., Bizon, N., Varlam, M., Raceanu, M., Carcadea, E., & Raboaca, M. S. (2025, June). Performance Evaluation of a New Efficient Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles In *2025 17th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. xx). IEEE. (Acceptată – în curs de publicare)

7.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Perspectivile viitoare privind îmbunătățirea strategiei actuale cu cea mai bună reducere de combustibil, SWA_RTO pe baza algoritmului GES, sunt prezentate în cele ce urmează:

- Îmbunătățirea performanței algoritmului de adaptabilitate prin hibridizare cu algoritmi pe bază de învățare de tip Machine Learning, pentru a asigura implementare pe orice tip de vehicul hibrid cu pilă de combustibil;
- Testarea modelului pe cicluri de conducere WLTP, cu o caracteristică mai reală a drumului în timp real, pentru determinarea dinamică a factorului A, întrucât ciclurile testate nu au surprins pe deplin toate scenariile dinamice operaționale;
- Creșterea durabilității pe termen lung atât a sistemului FC, cât și a sistemului ESS prin îmbunătățirea detecțiilor defectelor ce pot apărea la nivelul membranei pilei sau la nivelul celulelor electrochimic ale bateriilor și ultracondensatorilor.
- Crearea unui executabil software a unității de management energetic și control și integrarea pe un ECU pentru a fi testat pe o platforma HIL (Hardware In The Loop) pentru reliabilitate și validare.

Bibliografie

- [1] Yue, M., Jemei, S., Gouriveau, R., & Zerhouni, N. Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies. *Int. J. Hydrog. Energy* 2019, 44, 6844–6861.
- [2] Basimalla, V.K.; Velisala, V. A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles. *Int. J. Energy Res.* 2018, 42, 4263–4283.
- [3] Agarwal, S., & Gupta, A. (2025). Fuel cell market size - by product (PEMFC, DMFC, SOFC, PAFC & AFC, MCFC), by application (Stationary, portable, transport), by fuel, by size, by end use, 2025 - 2034. In *Global Market Insights Inc.* <https://www.gminsights.com/industry-analysis/fuel-cell-market>
- [4] Kabalo, M., Blunier, B., Bouquain, D., & Miraoui, A. State-of-the-art of DC-DC converters for fuel cell vehicles. In Proceedings of the 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference: Lille, France, 1–3 September 2010; pp. 1–6.
- [5] Huangfu, Y., Guo, L., Ma, R., & Gao, F. An Advanced Robust Noise Suppression Control of Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicle. *IEEE Trans. Transp. Electr.* 2019.
- [6] Fernández, R. Á., Caraballo, S. C., Cilleruelo, F. B., & Lozano, J. A. Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 81, 655–668.
- [7] Chen, H., Chen, J., Liu, Z., & Lu, H. Real-time optimal energy management for a fuel cell/battery hybrid system. *Asian J. Control* 2019, 21, 1847–1856.
- [8] Reddy, N. P., Padeloup, D., Zadeh, M. K., & Skjetne, R. An Intelligent Power and Energy Management System for Fuel Cell/Battery Hybrid Electric Vehicle Using Reinforcement Learning. *Proceedings of the 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Novi, MI, USA, 19–21 June 2019*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 1–6.
- [9] Li, J., Geng, J., & Yu, T. Multi-objective optimal control for proton exchange membrane fuel cell via large-scale deep reinforcement learning. *Energy Reports*, 2021, 7, 6422–6437.
- [10] Becherif, M. P. P. T., & Hissel, D. MPPT of a PEMFC based on air supply control of the motocompressor group. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(22), 12521–12530.
- [11] Lü, X., Wu, Y., Lian, J., Zhang, Y., Chen, C., Wang, P., & Meng, L. Energy management of hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112474.
- [12] Bizon, N., & Hoarcă, I. C. Hydrogen saving through optimized control of both fueling flows of the Fuel Cell Hybrid Power System under a variable load demand and an unknown renewable power profile. *Energy conversion and management*, 2019, 184, 1–14.