



Department: Electrical Engineering

Order N° : / 2024

Defense authorization N°/2024

DOCTORAL THESIS

3rd Cycle Doctoral (D-LMD)

Presented by

Younes DJABALLAH

With a view to obtaining the doctoral diploma in 3rd Cycle Doctoral (D-LMD)

Branch : Electrotechnic

Specialty: Electrical Control and Industrial Systems

Topic

Hybrid storage and energy management in an electric vehicle based on new power converter structures

Supported, on 24 /06 / 2024, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Lakhdar MAZOUZ	Professor	University of Djelfa	President
Mr Karim NEGADI	Professor	University of Tiaret	Supervisor
Mr Mohamed BOUDIAF	Professor	University of Djelfa	Co-Supervisor
Mr Tayeb ALLAOUI	Professor	University of Tiaret	Examiner
Mr Lakhmissi CHERROUN	Professor	University of Djelfa	Examiner
Mr Imad MERZOUG	MCA	University of Djelfa	Examiner

Djelfa University, FST - 2024



Département : Génie Electrique

N° d'Ordre : / 2024

Autorisation de Soutenance N°/2024

THESE DE DOCTORAT

Doctorat 3^{ème} Cycle (D-LMD)

Présentée par

Younes DJABALLAH

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en 3^{ème} Cycle D-LMD

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électriques et systèmes industriels

Thème

**Stockage hybride et gestion d'énergie dans un véhicule électrique basés sur les
nouvelles structures de convertisseurs de puissance**

Soutenu publiquement, le 24 /06 /2024, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Lakhdar MAZOUZ	Professeur	Université de Djelfa	Président
Mr Karim NEGADI	Professeur	Université de Tiaret	Directeur de thèse
Mr Mohamed BOUDIAF	Professeur	Université de Djelfa	Co Directeur de thèse
Mr Tayeb ALLAOUI	Professeur	Université de Tiaret	Examineur
Mr Lakhmissi CHERROUN	Professeur	Université de Djelfa	Examineur
Mr Imad MERZOUG	MCA	Université de Djelfa	Examineur

Université de Djelfa, FST, 2024

Remerciements

Louange à Allah Tout-Puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude au directeur du laboratoire (LAADI), Monsieur Ahmed Hafaifa, pour son précieux soutien et ses conseils lors de la préparation de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude au Président du comité de formation doctorale, Monsieur Lakhdar Mazouz, pour son précieux soutien et ses conseils lors de la préparation de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Pr. Karim Negadi de l'Université de Tiaret, pour la confiance qu'il m'a accordée, par sa présence toujours à mes côtés, par sa direction, sa modestie, ses conseils et ses remarques constructives pour le bon déroulement de ces travaux.

Je remercie le Pr. Mohamed Boudiaf de l'université de Djelfa pour m'avoir co-encadré, pour son orientation, sa disponibilité, son écoute et sa patience lors de la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'aident à améliorer mon travail. Et qui m'a fait une quelconque remarque qui m'a aidé à perfectionner ce manuscrit.

Enfin, j'exprime ma gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

Allah, envoie tes bénédictions sur ton noble messenger, sa famille et ses compagnons, et bénis-nous dans notre vie.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma mère,

mes frères et sœurs,

ma femme et mes enfants,

mes amis,

mes professeurs,

*ainsi qu'à tous ceux qui sont décédés tout en restant attachés à la
foi en Allah et à la tradition du Prophète...*

Younes Djaballah



ملخص

مؤخراً، شهدت استراتيجيات إدارة الطاقة للمركبات الكهربائية التي تعتمد على خلايا الوقود اهتماماً متزايداً، حيث تسعى جاهدة لتحسين تلك الاستراتيجيات بهدف تحقيق توزيع مثالي للطاقة بين مكونات النظام المتعددة. من أجل تعزيز فعالية استخدام الطاقة في المركبات الكهربائية، نعتد على نظام تخزين طاقة هجين. يتأسس هذا النظام على استخدام خلية الوقود كمكون رئيسي، ويضم بالإضافة إلى ذلك بطارية أيون الليثيوم ومكثف فائق كمكونات مساعدة. ومع ذلك، تواجه هذه الأنظمة تحديات متعددة، مثل ضبط اقتصاد الطاقة لخلية الوقود ومعالجة عدم استقرار جهد خط التيار المستمر، والحفاظ على مكونات التخزين على مدى عمرها، مع مراعاة حالة شحن البطارية، في ظل متغيرات الظروف التشغيلية المتنوعة. تم تطوير عدة استراتيجيات تركز على الذكاء الاصطناعي لإدارة الطاقة، وتشمل هذه الاستراتيجيات استخدام المنطق الضبابي من النوع ٢، واعتماد الشبكات العصبية الاصطناعية، بالإضافة إلى الاستراتيجية التي تعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية العميقة، مع مراعاة الاقتصاد في استهلاك طاقة خلية الوقود وثبات جهد خط التيار المستمر. وتم تقدير حالة شحن بطارية أيون الليثيوم بالاعتماد على استراتيجية هجينة تجمع بين مرشح كالمان الممتد والشبكة العصبية الاصطناعية العميقة. تم نمذجة ومحاكاة الاستراتيجيات المقترحة، بالإضافة إلى تقنيات التحكم وتدريب الشبكات العصبية والوصول إلى أقل خطأ ممكن باستخدام برنامج الماتلاب.

كلمات مفتاحية: المركبة الكهربائية، التخزين الهجين، البطاريات، المكثفات الفائقة، خلية الوقود، استراتيجيات التحكم التقليدية و المتقدمة.

Abstract

Recently, energy management strategies for fuel cells electric vehicles have witnessed increasing interest, with striving to improve those strategies with the goal of achieving optimal energy distribution among multiple system components. In order to enhance the energy efficiency of electric vehicles, we rely on a hybrid energy storage system. This system is based on the use of a fuel cell as the main component and additionally includes lithium-ion battery and supercapacitor as auxiliary components. However, these systems face multiple challenges, such as adjusting the energy economy of the fuel cell, dealing with DC Bus voltage stability, and maintaining the storage components throughout their lifetime, taking into account the battery state of charge, under diverse operating condition variables. Several artificial intelligence focused strategies are developed for energy management, including the use of type II fuzzy logic, the adoption of artificial neural networks, and the strategy based on deep artificial neural networks, taking into account fuel cell energy economy and DC Bus stability. The state of charge of the lithium-ion battery is estimated based on a hybrid strategy combining an extended Kalman filter and a deep artificial neural network. The proposed strategies, in addition to control techniques and neural network training, are modeled and simulated to achieve the lowest possible error using Matlab.

Key words: electric vehicle, hybrid storage, batteries, supercapacitors, fuel cell, conventional and advanced control strategies.

Résumé

Récemment, les stratégies de gestion de l'énergie pour les véhicules électriques à piles à combustible suscitent un grand intérêt, améliorant ces stratégies tout en obtenant une répartition optimale de l'énergie entre les composants du système. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules électriques, nous nous appuyons sur un système de stockage d'énergie hybride. Ce système est basé sur l'utilisation d'une pile à combustible comme composant principal et comprend en outre de batterie lithium-ion et de supercondensateur comme composants auxiliaires. Cependant, ces systèmes sont confrontés à de multiples défis, tels que l'ajustement de l'économie d'énergie de la pile à combustible, la stabilité de la tension du DC Bus et le maintien des composants de stockage tout au long de leur durée de vie, en tenant compte de l'état de charge de batterie, sous diverses variables de conditions de fonctionnement. Plusieurs stratégies axées sur l'intelligence artificielle ont été développées pour la gestion de l'énergie, notamment l'utilisation de la logique floue de type II, l'adoption de réseaux de neurones artificiels, ainsi que la stratégie basée sur les réseaux de neurones artificiels profonds, prenant en compte l'économie d'énergie de pile à combustible. Et la stabilité du DC Bus. L'état de charge de la batterie lithium-ion a été estimé sur la base d'une stratégie hybride combinant un filtre de Kalman étendu et un réseau neuronal artificiel profond. Les stratégies proposées, en plus des techniques de contrôle et d'entraînement des réseaux neuronaux, ont été modélisées et simulées pour obtenir l'erreur la plus faible possible à l'aide de Matlab.

Mots clés : véhicule électrique, stockage hybride, batteries, supercondensateurs, pile à combustible, stratégies de commande conventionnelles et avancées.

Sommaire

Liste des Travaux

Liste des symboles

Liste des abréviations

Liste des Figures

Liste de Tableaux

Introduction générale	1
Généralités	1
Système hybride	2
Gestion d'énergie	2
Revue de la littérature	3
1 Véhicule électrique et système de stockage d'énergie	7
1.1 Introduction	7
1.2 Véhicule électrique	8
1.3 Modélisation du moteur synchrone à aimant permanent	8
1.4 Commande vectorielle basée sur le MTPA avec Contrôle d'affaiblissement de champ	14
1.5 Modélisation de la pile à combustible	17
1.6 Modélisation du supercondensateur	22
1.7 L'unité de contrôle de puissance utilisée dans les véhicules électriques	23
1.7.1 Toyota Prius de première génération (1997-2003)	24
1.7.2 Toyota Prius de deuxième génération (2003-2010)	24
1.7.3 Toyota Prius de troisième génération (2010-2015)	25

1.7.4	Toyota Prius de quatrième génération (2015-2022)	25
1.7.5	Toyota Prius de cinquième génération (2022-présent)	26
1.8	Les convertisseurs utilisés dans les Toyota Prius	26
1.9	Conclusion	30
2	Estimation de l'état de charge d'une batterie lithium-ion	31
2.1	Introduction	31
2.2	Modélisation de la batterie	32
2.2.1	Modèle électrochimique d'une batterie	32
2.2.2	Modèle PNGV d'une batterie	33
2.3	Filtre de Kalman étendu	36
2.4	Estimation de l'état de charge basée sur EKF-DNN	38
2.4.1	Étape de prédiction	39
2.4.2	Étape de linéarisation	39
2.4.3	Étape de mise à jour	39
2.5	Résultats de simulation et analyse	41
2.6	Conclusion	44
3	Gestion d'énergie basé sur la logique floue de type 2	45
3.1	Introduction	45
3.2	Architecture du véhicule électrique	46
3.3	Modélisation et contrôle de convertisseur DC-DC de la pile à combustible	46
3.4	Modélisation et contrôle de convertisseur DC-DC de la batterie	48
3.5	Conception d'un système basé sur la logique floue de type 2	49
3.5.1	Structure de la logique floue de type 2	49
3.5.2	Créer des normes pour une stratégie de gestion de l'énergie à contrôle basée sur la logique floue de type 2	50
3.5.3	Structure pour blocs de simulation	53
3.5.4	Gestion d'énergie	54
3.6	Stratégie de gestion de l'énergie par la logique floue de type 2	55
3.7	Résultats de simulation et analyse	59
3.8	Conclusion	63
4	Gestion d'énergie basée sur le réseau de neurones	65
4.1	Introduction	65
4.2	Architecture du véhicule électrique	66

4.3	Modélisation et contrôle de convertisseur DC-DC de la pile à combustible et de la batterie	66
4.4	Stratégie de gestion de l'énergie	69
4.4.1	Stratégie de gestion de l'énergie basée sur un réseau de neurones	71
4.4.2	Stratégie de gestion de l'énergie basée sur un réseau de neurones profond	79
4.5	Conclusion	87
	Conclusion générale	88
	Références Bibliographiques	91

Liste des Travaux

Publication Internationale :

1. Younes D, Karim N, Boudiaf M (2023) Energy management based hybrid fuel cell/battery for electric vehicle using type 2 fuzzy logic controller. International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering 12(1).

Publié : 31.01.2023 Catégorie : B

2. Djaballah Y, Negadi K, Boudiaf M, et al (2023) Power management for a fuel cell/battery and supercapacitor based on artificial neural networks for electric vehicles. Przegląd Elektrotechniczny 8(1) :165–169.

Publié : 01.08.2023 Catégorie : B

3. Djaballah, Y., Negadi, K. & Boudiaf, M. Enhanced lithium-ion battery state of charge estimation in electric vehicles using extended Kalman filter and deep neural network. Int. J. Dynam. Control (2024). <https://doi.org/10.1007/s40435-024-01388-6>

Publié : 21.02.2024 Catégorie : B

4. Younes, D. Karim, N., & Mohamed, B. (2024). Power management strategy for hybrid energy storage in electric vehicles using deep neural network considering DC Bus stabilization and fuel cell power economy. International Journal of System Assurance Engineering and Management.

Sous révision :-.-. Catégorie : B

Liste des symboles

I_d :	Le courant du moteur est dans le sens de l'axe direct
I_q :	Le courant du moteur est dans le sens de l'axe vertical
θ :	Angle d'avance de phase
τ_M :	Le couple magnétique
Ψ_M :	Le flux magnétique total
Ψ_d :	Le flux magnétique dans le sens de l'axe direct
Ψ_q :	Le flux magnétique dans le sens de l'axe vertical
L_d :	L'inductance dans le sens de l'axe direct
L_q :	L'inductance dans le sens de l'axe vertical
τ_R :	Le couple de réluctance
I_S :	Le courant statorique du moteur
τ :	Le couple total
P :	Le nombre de paires de pôles
τ_{em} :	Le couple électromagnétique total du moteur
R_s :	La résistance des bobines du stator
V :	La Tension de la loi de faraday
ω :	La vitesse du champ magnétique
V_d :	La tension du moteur est dans le sens de l'axe direct
V_q :	La tension du moteur est dans le sens de l'axe vertical
R_C :	La résistance représente les pertes dans l'acier
J :	Moment d'inertie
τ_L :	Le couple de charge
ω_m :	La vitesse mécanique du moteur
β :	Angle d'avance de phase plus 90°
V_{DC} :	La tension du DC Bus
I_a :	Courant instantané statorique de phase a
I_b :	Courant instantané statorique de phase b
I_c :	Courant instantané statorique de phase c

H_2O	: Molécule d'eau
O_2	: Molécule d'oxygène
H_2	: Molécule d'hydrogène
U_{FCoc}	: Tension de cellule théorique
U_{FCoc}^0	: Tension de cellule aux conditions standards
R	: Constante de gaz universelle
n	: Numéro de charge
T	: Température de cellule
T^0	: Température de cellule de référence
F	: Constante de Faraday
Q_{FC}	: Constante d'équilibre
U_{FC}	: Tension de sortie de la pile à combustible
V_{act}	: Pertes activation de tension de la pile à combustible
V_{con}	: Pertes concentration de tension de la pile à combustible
V_{ohm}	: Pertes ohmiques de tension de la pile à combustible
ΔG	: Changement d'énergie de Gibbs
ΔG^0	: Changement d'énergie de Gibbs standard
ΔH	: Changement d'enthalpie
ΔH^0	: Changement d'enthalpie standard
ΔS	: Changement d'entropie
ΔS^0	: Changement d'entropie standard
a_{H_2O}	: Activité des espèces d'eau
a_{H_2}	: Activité des espèces d'hydrogène
a_{O_2}	: Activité des espèces d'oxygène
P_{H_2}	: Pressions partielles d'espèces d'hydrogène
P_{O_2}	: Pressions partielles d'espèces d'oxygène
P^0	: Pressions partielles d'espèces standard
Uf_{H_2}	: Utilisations d'hydrogène
Uf_{O_2}	: Utilisations d'oxygène
Uf_{O_2nom}	: Utilisations nominales d'oxygène
P_{fuel}	: Pressions d'alimentation de carburant
P_{air}	: Pressions d'alimentation d'air
x	: Pourcentages dans le carburant et l'air d'hydrogène
y	: Pourcentages dans le carburant et l'air d'oxygène
E_{oc}	: Tension en circuit ouvert de cellule

V_{fuel} :	Tension en circuit ouvert de Pressions d'alimentation de carburant
V_{air} :	Tension en circuit ouvert de Pressions d'alimentation d'air
i_{FC} :	Courant de cellule
i_0 :	Courant d'échange
R_{FC} :	Résistance de cellule
T_d :	Temps de stabilisation de cellule à un pas de courant
K_c :	Constante de tension
K_u :	Constante de sous-dépassement de tension
k :	Constante de Boltzmann
h :	Constante de Planck
∂ :	Coefficient de transfert de charge
ΔG_a :	Coefficient de transfert de taille de la barrière d'activation
C_T :	Capacité totale
C_H :	Capacité de Helmholtz
C_{GC} :	Capacité de Gouy-Chapman
N_e :	Nombre de couches d'électrodes
N_P :	Nombre de cellules de supercondensateur parallèles
A_i :	Zone interfaciale entre les électrodes et l'électrolyte
d :	Longueur de la couche de Helmholtz
ε :	Valeurs de permittivité de matériau électrolytique
ε_0 :	Valeurs de permittivité d'espace libre
U_{SC} :	Tension de Supercondensateur
i_{SC} :	Courant de Supercondensateur
R_{SC} :	Résistance du module Supercondensateur
c :	Concentration molaire
Q_C :	Charge électrique de cellule
Q_T :	Charge électrique totale
$U_{Boc\,discharge}$:	Tension de la batterie de décharge
$U_{Boc\,charge}$:	Tension de la batterie de charge
E_o :	Constante de tension de la batterie
K_b :	Constante de polarisation
Q_b :	Capacité de la batterie
A_b :	Amplitude de Zone exponentielle
B_b :	Constante de temps inverse de zone exponentielle
it :	Courant de charge réel

i^* :	Courant filtré
U_B :	Tension de la batterie
I_B :	Courant de la batterie
R_0 :	Résistance ohmique de la batterie
R_P :	Résistance de polarisation de la batterie
R_{int} :	Résistance interne de la batterie
U_1 :	Tension aux bornes de C_1
U_{OC} :	Tension de batterie idéal
I_{R1} :	Le courant d'écoulement de R_1
I_{C1} :	Le courant d'écoulement de C_1
R_0 :	Résistance ohmique
R_1 :	Résistance de polarisation
C_1 :	Condensateur
η :	Le rendement coulombien
Q_B :	La capacité nominale
SOC :	État de charge actuel
SOC_p :	État de charge précédent
c :	Constante arbitraire
$[Q]$:	La matrice de bruit de processus aléatoire
$[R]$:	La matrice de bruit de mesure
K_g :	Le gain de Kalman
U_{Bob} :	La tension de la batterie à la borne de l'observateur
V_O :	La tension de sortie
V_{ref} :	La tension de référence
L_{FC} :	Inductance de la pile à combustible
C_{DC_Bus} :	Capacitance de DC Bus
L_{Bat} :	Inductance de la batterie
V_{dc} :	Tension du DC Bus
V_{DC-ref} :	Tension référence du DC Bus
I_{Bat} :	Courant de la batterie
SOC_{Bat} :	État de charge de la batterie
C_{Bat} :	Condensateur de la batterie
P_{Load} :	La puissance de charge pour le moteur
P_{FC} :	La puissance de sortie de la pile à combustible
V_{OBoost} :	Tension de sortie de convertisseur boost

V_{OBuck} :	Tension de sortie de convertisseur buck
V_{IBoost} :	Tension d'entrée de convertisseur boost
V_{IBuck} :	Tension d'entrée de convertisseur buck
I_{IBoost} :	Courant d'inductance de convertisseur boost
I_{OBuck} :	Courant d'inductance de convertisseur buck
I_{OBoost} :	Courant de sortie de convertisseur boost
I_{IBuck} :	Courant d'entrée convertisseur buck
I_O :	Courant de sortie de convertisseur buck
D :	Cycle de service
η_{Boost} :	Efficacité de convertisseur boost (pile à combustible, batterie)
η_{Buck} :	Efficacité de convertisseur buck
R_{BB} :	Résistance des convertisseurs
L_{BB} :	Inductance des convertisseurs (boost, buck)
C_{BB} :	Condensateur des convertisseurs
i_{FC}^* :	Courant de référence du système de gestion de l'énergie de la pile à combustible
i_B^* :	Courant de référence du système de gestion de l'énergie de la batterie
S_B :	État de charge de la batterie
P_L :	La puissance de charge pour le moteur
P_{FC} :	La puissance de la pile à combustible
P_B :	La puissance de la batterie
P_{SC} :	La puissance du supercondensateur
P_{FC_min} :	La puissance minimale pour la pile à combustible
P_{FC_opt} :	La : puissance optimale pour la pile à combustible
P_{FC_max} :	La puissance maximale pour la pile à combustible
P_{B_charge} :	La puissance de charge pour la batterie
S_{B_min} :	État de charge minimum pour la batterie
S_{B_max} :	État de charge maximum pour la batterie

Liste des abréviations

DC Bus :	Bus de courant continu
PI :	Régulateur proportionnel et intégral
TD3 :	Un algorithme de gradient politique déterministe profond à double retard
MTPA :	Couple Maximum Par Ampère
MSAP :	Moteur synchrone à aimant permanent
FW :	Affaiblissement du champ magnétique
PEMFC :	Piles à combustible à membrane échangeuse de protons
PCU :	Unité de contrôle de puissance
Ni-MH :	Nickel-Métal-Hydrure
Li-ion :	Lithium-ion
Si :	Silicium
SiC :	Carbure de silicium
IGBT :	Transistor Bipolaire à Porte Isolée
SOC :	L'état de charge
BMS :	Système de gestion de batterie
PNGV :	Modèle de batterie du Partenariat pour une nouvelle génération de véhicules
EKF :	Le filtre de Kalman étendu
DNN :	Réseaux de neurones profonds
PWM :	Modulation de Largeur d'Impulsion
V2G :	véhicule vers le réseau

Liste des Figures

1.1	Structures des rotors des MSAP (a) aimants en surface, (b) aimants enterrés.	10
1.2	Calcule le couple de réductance.	11
1.3	Calcule le couple de réductance totale.	11
1.4	Type de changement Ψ : (a) change in amplitude, (b) change in direction.	12
1.5	Circuit équivalent de MSAP à aimants enterrés : (a) pour phase d , (b) pour phase q .	13
1.6	(a) Angle de couple, (b) Variation du couple en fonction de l'angle du courant I_s .	14
1.7	Caractéristique couple/vitesse sans FW.	16
1.8	(a) Schéma du contrôle de MSAP basé sur MTPA et FW, (b) Réglage de vitesse.	17
1.9	Circuit équivalent de la pile à combustible.	19
1.10	Circuit équivalent du supercondensateur.	22
1.11	Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 1ère génération.	24
1.12	Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 2ème génération.	25
1.13	Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 3ème génération.	25
1.14	Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 4ème génération.	26
1.15	Véhicule d'essai SiC.	27
1.16	Onduleur Toyota Prius de 4ème génération.	28
1.17	Modèle équivalent de l'onduleur de la Toyota Prius de 4ème génération.	28
1.18	Fonctionnement de l'onduleur vers l'entraînement du moteur.	29
1.19	Fonctionnement de l'onduleur vers l'entraînement du générateur.	29
1.20	contrôle du moteur : (a) le couple est contrôlé par le courant, (b) la vitesse est contrôlée par la fréquence.	30
2.1	Modèle électrochimique de circuit équivalent de la batterie lithium-ion.	33
2.2	Modèle PNGV de circuit équivalent à la batterie.	34
2.3	Étapes séquentielles du processus de conception du modèle EKF.	37

2.4	Processus de conception du modèle EKF-DNN, (a) étape de prédiction, (b) étape de linéarisation, (c) étape de mise à jour.	40
2.5	Courant de la batterie I_B	42
2.6	Tension de la batterie U_B	42
2.7	Comparaison entre l'EKF-DNN et la méthode de comptage coulomb pour déterminer l'état de charge.	43
2.8	L'erreur d'état de charge.	43
3.1	Architecture du système.	46
3.2	Modèle et contrôle du convertisseur de pile à combustible.	47
3.3	ARADEx Convertisseur de la pile à combustible.	48
3.4	Contrôle de la batterie.	49
3.5	Topologie de l'algorithme de type 2 de la logique floue.	50
3.6	Structure finale du système de gestion de l'énergie.	51
3.7	Membership function de l'entrée P_{Load}	51
3.8	Membership function de l'entrée SOC_{Bat}	52
3.9	Schéma du Système global de gestion de l'énergie hybride.	54
3.10	L'organigramme de la procédure de la logique floue de type 2.	55
3.11	Mode (1) de la stratégie de gestion de l'énergie.	57
3.12	Mode (2) de la stratégie de gestion de l'énergie.	57
3.13	Mode (3) de la stratégie de gestion de l'énergie.	58
3.14	Mode (4) de la stratégie de gestion de l'énergie.	58
3.15	Mode (5) de la stratégie de gestion de l'énergie.	58
3.16	Caractéristiques du moteur, (a) courants du stator du moteur, (b) Couple électromagnétique développé par le moteur, (c) vitesse mécanique du moteur.	60
3.17	Caractéristiques électriques des sources hybrides, (a) tension de la : pile à combustible, batterie (b) courant de la : pile à combustible, batterie.	61
3.18	Caractéristiques du DC Bus, (a) tension, (b) courant.	61
3.19	État de charge de la batterie.	62
3.20	La puissance de : pile à combustible, batterie et la charge demandée.	63
4.1	Architecture du système.	66
4.2	Contrôle du DC-DC, (a) convertisseur Boost, (b) convertisseur Buck.	68
4.3	Contrôle de tension du DC Bus.	70
4.4	Répartition de fréquence.	71

4.5	L'organigramme de gestion de l'énergie.	73
4.6	Structure de la programmation des réseaux neuronaux.	74
4.7	Caractéristiques du moteur, (a) courants du stator du moteur, (b) Couple électromagnétique développé par le moteur, (c) vitesse mécanique du moteur.	76
4.8	Caractéristiques électriques des sources hybrides, (a) tension de la pile à combustible, (b) courant de la pile à combustible, (c) tension de la batterie, (d) courant de la batterie.	77
4.9	Caractéristiques du DC Bus, (a) tension, (b) courant.	78
4.10	État de charge de la batterie.	78
4.11	La puissance de : pile à combustible, batterie, supercondensateur et la charge demandée.	79
4.12	La structure utilisée pour (a) le schéma de base de l'entraînement, (b) la fonction Matlab pour convertir le mode en courant de référence.	80
4.13	L'organigramme de gestion de l'énergie.	81
4.14	Principe du réseau de neurones profond dans notre système.	82
4.15	Caractéristiques du moteur, (a) courants du stator du moteur, (b) Couple électromagnétique développé par le moteur, (c) vitesse mécanique du moteur.	84
4.16	Caractéristiques électriques des sources hybrides, (a) tension de la pile à combustible, (b) courant de la pile à combustible, (c) tension de la batterie, (d) courant de la batterie.	85
4.17	Caractéristiques du DC Bus, (a) tension, (b) courant.	86
4.18	État de charge de la batterie.	86
4.19	La puissance de : pile à combustible, batterie, supercondensateur et la charge demandée.	87

Liste de Tableaux

1.1	Paramètres de MSAP.	14
1.2	Paramètres du modèle de la pile à combustible.	21
1.3	Paramètres du modèle du supercondensateur.	23
2.1	Paramètres du modèle électrochimique de la batterie.	33
2.2	Paramètres du modèle PNGV de la batterie.	34
3.1	Règles de gestion d'énergie du projet de véhicule électrique.	53
4.1	Paramètres des convertisseurs DC-DC.	69
4.2	Adaptation de la mesure avec les entrées du réseau neuronal.	74
4.3	Limites et plages d'entrée du réseau neuronal.	81

Introduction générale

Généralités

Les combustibles fossiles, notamment le charbon, le pétrole et le gaz, sont les principaux et les plus dangereux contributeurs au changement climatique mondial. La combustion des combustibles fossiles libère une grande quantité d'émissions de gaz nocifs. Ces émissions dans l'atmosphère entraînent la rétention de chaleur et un changement climatique. La Terre connaît une augmentation rapide des températures, ce qui affecte les conditions météorologiques et l'équilibre de l'environnement naturel, et comporte de nombreux risques pour la vie à la surface de la Terre. Pour faire face au changement climatique, nous devons abandonner notre dépendance aux combustibles fossiles et nous concentrer sur nos investissements dans des sources d'énergie propres, disponibles, durables et fiables [1].

Le véhicule électrique est une révolution dans l'industrie automobile et revêt aujourd'hui une grande importance. Il offre une solution prometteuse pour un transport respectueux de l'environnement et durable, et joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité de l'air et la réduction des effets du changement climatique [2]. Cela est dû au fait qu'il repose sur des éléments de stockage respectueux de l'environnement.

Le stockage d'énergie joue un rôle essentiel dans l'avancement de la technologie moderne, offrant une solution prometteuse pour répondre à nos futurs besoins énergétiques. Ces éléments comprennent la pile à combustible, la batterie lithium-ion et le supercondensateur. La pile à combustible est une source prometteuse d'énergie durable, car l'hydrogène est converti en électricité par des réactions chimiques, et la batterie lithium-ion se caractérise par sa densité énergétique élevée et sa capacité à stocker une grande quantité d'énergie dans un espace réduit, ce qui la rend idéale pour alimenter des appareils électroniques portables et des véhicules électriques. Quant au supercondensateur, il s'agit d'une technologie de stockage d'énergie rapide qui utilise une technologie de charge et de décharge rapide pour stocker l'énergie avec un rendement élevé. Tous ces éléments représentent un développement signi-

ficatif dans le domaine du stockage d'énergie, offrant des options diverses et efficaces pour répondre à nos futurs besoins énergétiques [3, 4].

Système hybride

Les systèmes de production hybrides sont généralement définis comme étant ceux qui combinent plusieurs sources pour produire et stocker de l'énergie électrique, ce qui peut inclure deux sources ou plus. Ces systèmes sont utilisés pour répondre de manière durable et efficace aux besoins en énergie électrique de charge. Avant de commencer à construire un système électrique hybride, il est essentiel de comprendre fondamentalement les exigences de la charge et de déterminer les sources d'énergie disponibles [5].

Gestion d'énergie

Le système de gestion de l'énergie doit être étudié et conçu avec le plus grand soin. En effet, le système doit fournir des commandes précises pour déterminer quand allumer, éteindre et ajuster les différents composants du système hybride. Le moment approprié pour effectuer ces opérations doit être déterminé avec précision, et les périodes de démarrage et d'arrêt doivent être soigneusement planifiées. Le système de gestion de l'énergie revêt donc une importance cruciale, car il influe directement sur les performances du système hybride. Il est le facteur clé pour assurer une coordination efficace entre les composants du système et garantir la continuité de l'alimentation électrique de la charge. De plus, le système de gestion de l'énergie contribue à diriger et à réguler en permanence le flux d'énergie entre les différentes sources afin d'assurer un fonctionnement optimal du système [6].

La stratégie de gestion de l'énergie pour les trois éléments de stockage consiste à optimiser leur utilisation et leurs performances afin de garantir un stockage et une utilisation efficaces de l'énergie. Dans le cas d'une pile à combustible, l'attention se concentre sur la garantie d'une alimentation électrique continue en surveillant et en ajustant le débit de carburant et en maintenant des conditions de fonctionnement appropriées. Pour de batterie lithium-ion, la stratégie comprend la mise en œuvre d'algorithmes de charge et de décharge intelligents visant à maximiser la durée de vie de batterie et à améliorer l'efficacité énergétique. En ce qui concerne le supercondensateur, la stratégie de gestion de l'énergie se concentre sur des cycles de charge et de décharge rapides pour exploiter le potentiel d'économies d'énergie à des fréquences plus élevées. Dans l'ensemble, la stratégie de gestion de l'énergie pour

ces éléments vise à atteindre des performances optimales, à prolonger la durée de vie et à accroître l'efficacité énergétique [7].

Une stratégie de gestion de l'énergie pour les véhicules électriques revêt une grande importance pour garantir l'efficacité énergétique et des performances exceptionnelles. Cette stratégie vise à exploiter au maximum les éléments de stockage disponibles et à réduire la consommation d'énergie en adoptant des méthodes innovantes et efficaces [8, 9].

Revue de la littérature

(Souleman Njoya-M, Louis-A. Dessaint, Kamal Al-Haddad)[10]:

Cette étude de recherche présente une comparaison entre les différents systèmes de gestion de l'énergie suivants : stratégie de contrôle basée sur l'état, stratégie basée sur la logique floue, stratégie de contrôle PI classique, stratégie de séparation de fréquence et de logique floue, et stratégie de réduction de la consommation équivalente de carburant. Ces systèmes sont utilisés dans le cadre du système d'alimentation hybride de secours de l'avion, composé de la pile à combustible, de batterie et de supercondensateur. L'objectif principal de cette étude est de comparer l'efficacité de ces différents systèmes en ce qui concerne la gestion de l'énergie et la distribution entre les composants du système. L'article fournit une comparaison détaillée des performances de ces systèmes en termes d'efficacité énergétique et de leur capacité à répondre aux besoins du système dans des situations d'urgence. L'augmentation de la durée de vie de la batterie a été prise en compte, mais en négligeant l'économie d'énergie et la stabilité de la tension du DC Bus.

(Dezhi Xu, Qian Liu, Wenxu Yan, Weilin Yang)[11]:

Cette étude de recherche propose une technologie de contrôle adaptatif pour les systèmes de stockage d'énergie hybrides, composés de la pile à combustible, de batterie et de supercondensateur. L'objectif principal de cette recherche est de développer une stratégie de contrôle avancée : le contrôle adaptatif par mode glissant. Cette stratégie permet à ces systèmes de fonctionner de manière très efficace et d'améliorer leurs performances globales. L'objectif global de cette stratégie de contrôle avancée est d'améliorer les performances des systèmes de stockage d'énergie hybrides, d'augmenter leur efficacité et d'assurer une bonne distribution d'énergie en surveillant attentivement le courant des différents composants du système de stockage, tout en maintenant la stabilité de la tension du DC Bus. Cependant, l'économie

et la consommation énergétique ne sont pas prises en compte.

(Abderrezak B, Djaffar OA, Mohamed B, Fouad E, Nacereddine B)[12]:

Cet article présente une analyse et une évaluation d'un système de gestion de l'énergie pour les véhicules électriques alimentés par de la pile à combustible, de supercondensateur et de batterie. Une certaine technique basée sur la division de fréquence est démontrée et utilisée pour améliorer les performances du système de gestion de l'énergie. Dans l'ensemble, l'article vise à mieux comprendre comment améliorer la gestion de l'énergie dans les véhicules électriques grâce à la technologie de division de fréquence. Cette étude aborde la réduction de la fatigue de la batterie et les économies d'énergie, mais ne prend pas en compte la stabilité de la tension du DC Bus.

(Hasan Çınar, Ilyas Kandemir)[13]:

Cet article propose une méthodologie avancée de gestion de l'énergie active utilisant des algorithmes méta-heuristiques pour un système de stockage d'énergie hybride composé de la pile à combustible, de batterie et de supercondensateur, utilisé dans un système d'urgence d'avion. L'objectif est de fournir une approche avancée de gestion de l'énergie visant à minimiser la consommation d'énergie de la pile à combustible, sans prendre en compte la stabilité de la tension du DC Bus et la durée de vie de la batterie.

(Omer Abbaker Ahmed, Haoping Wang, Yang Tian)[14]:

Cet article présente une stratégie avancée de gestion de l'énergie pour les véhicules à pile à combustible. L'objectif principal de l'article est de développer une stratégie de contrôle basée sur des algorithmes de réseau neuronal pour améliorer les performances des véhicules et accroître l'efficacité de la consommation d'énergie. Dans l'ensemble, l'objectif est d'améliorer les performances des véhicules utilisant de la pile à combustible en économisant l'énergie de la pile à combustible, en prolongeant sa durée de vie et en maintenant la stabilité de la tension du DC Bus, tout en ne tenant pas compte de la durée de vie de la batterie.

(Kunang Li, Chunchun Jia, Xuefeng Han, Hongwen He)[15]:

Cet article présente une nouvelle stratégie de gestion de l'énergie utilisée dans les bus alimentés par de la pile à combustible et de batterie. Le coût d'exploitation de ces bus est optimisé grâce à un système basé sur un algorithme d'apprentissage par renforcement profond connu sous le nom de gradient profond de politique déterministe (TD3). En général, l'objectif est d'améliorer les performances des véhicules à pile à combustible en utilisant cet algorithme pour améliorer la gestion de l'énergie, fournir une stratégie de contrôle plus efficace et atteindre le coût le plus bas possible, mais sans prendre en compte la stabilité de tension du DC Bus.

Structure de la thèse

En introduction à la recherche, l'accent a été mis sur l'importance de la préservation de l'environnement et la nécessité de passer à des sources d'énergie respectueuses de l'environnement. Le rôle des systèmes hybrides dans ce contexte et la manière d'améliorer leur efficacité grâce à la gestion de l'énergie ont également été étudiés, en plus de donner un aperçu des recherches antérieures ainsi que de l'organisation et de la structuration de la thèse.

Au premier chapitre, nous découvrirons les concepts des véhicules électriques et des systèmes de stockage d'énergie, des principes de base à la modélisation et au contrôle. Nous passerons de l'étude du véhicule électrique en interne, plus spécifiquement au moteur synchrone qui y est utilisé, et nous aborderons également des sujets tels que la technologie de la pile à combustible et le supercondensateur. Nous étudierons également la structure et la configuration des convertisseurs actuellement utilisés dans le véhicule électrique et hybride.

Dans le deuxième chapitre, nous mettrons en évidence les technologie de la batterie lithium-ion et la manière d'estimer leur état de charge à partir de concepts de base et de modélisation. Nous présenterons également la stratégie proposée et discuterons des résultats obtenus.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la stratégie de gestion de l'énergie pour le véhicule électrique, qui repose sur une logique floue de type II et dépend à la fois de batterie et de la pile à combustible. Nous exposerons la stratégie proposée en commençant par la structuration et la modélisation du système étudié, puis nous discuterons des résultats obtenus.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons la stratégie de gestion de l'énergie du véhicule électrique utilisant un réseau de neurones artificiels. Cette stratégie repose sur de

batterie, une pile à combustible et de supercondensateur, en mettant l'accent sur l'obtention d'une tension constante du DC Bus et d'une économie d'énergie de la pile à combustible. Nous commencerons par analyser l'architecture du système étudié et présenterons des modèles complets, puis nous discuterons des résultats obtenus.

Enfin, cette thèse se terminera par une synthèse des travaux accomplis, suivie d'une discussion sur les orientations futures envisageables.

Chapitre 1

Véhicule électrique et système de stockage d'énergie

1.1 Introduction

L'utilisation de l'hydrogène dans les transports, en particulier dans les véhicules électriques, offre d'énormes opportunités du point de vue environnemental et économique. Elle contribue à la réduction des émissions de dioxyde de carbone et à la lutte contre le réchauffement climatique. De plus, la technologie de l'hydrogène joue un rôle de premier plan dans le transport de l'énergie, notamment à travers des applications telles que les piles à combustible.

En raison des fluctuations des prix du pétrole et des préoccupations concernant la sécurité des approvisionnements futurs en pétrole, l'intérêt pour la fabrication de véhicules à hydrogène augmente rapidement dans le monde entier. L'hydrogène a le potentiel de devenir le carburant du futur en raison de sa durabilité et de la diversité de ses sources de production. Il peut être obtenu à partir de plusieurs sources dont l'eau. Par conséquent, il joue un rôle essentiel dans le maintien de la sécurité énergétique [16, 17].

Afin de préserver l'environnement, le besoin a conduit à l'utilisation de véhicules électriques qui fonctionnent avec un moteur à courant alternatif. Ce moteur tire son énergie d'un système composé de la pile à combustible, de batterie et de supercondensateur via une ligne à DC Bus. L'ajout de supercondensateur à ce système améliore l'efficacité globale du système.

1.2 Véhicule électrique

Ces dernières années, en raison de la nécessité de disposer de véhicules respectueux de l'environnement et de la montée des coûts des carburants, il y a eu un développement considérable des véhicules électriques. Au départ, ces véhicules utilisaient principalement de batterie comme source d'énergie. Cependant, ils rencontraient des difficultés sur de longues distances et sur les autoroutes en raison des limitations de capacité de batterie. Cette situation a conduit à explorer une autre solution, à savoir l'utilisation de la pile à combustible.

Les piles à combustible constituent une source d'énergie plus durable et plus efficace pour les véhicules électriques, et elles sont également essentielles pour améliorer les performances des véhicules. Toutefois, sa portée reste encore limitée. C'est pourquoi les chercheurs ont commencé à explorer une troisième source d'énergie, à savoir le supercondensateur.

Le supercondensateur apporte une solution supplémentaire à ce défi. Ils sont efficaces pour stocker de l'énergie et peuvent être utilisés pour recharger la batterie, soit pour fournir une alimentation directe au système de propulsion. En conséquence, le supercondensateur joue un rôle crucial dans l'amélioration des performances des véhicules électriques et dans l'élargissement de leur utilisation.

Suite à ces développements, les véhicules électriques offrent de nombreux avantages, notamment un rendement élevé, l'absence de pollution, un faible niveau sonore avec un fonctionnement en douceur, l'utilisation de sources d'énergie propre variées, la disponibilité de diverses sources de stockage d'énergie et la possibilité de récupérer de l'énergie.

1.3 Modélisation du moteur synchrone à aimant permanent

Nous allons modéliser un moteur synchrone à aimant permanent qui est couramment utilisé dans les applications des véhicules électriques en raison de ses nombreux avantages. Étant donné que le rotor du moteur a une faible inertie et une basse température, le rendement est élevé. Avec les progrès significatifs de l'électronique de puissance et l'utilisation des ordinateurs pour le contrôle, la régulation de ce type de moteur est devenue plus facile [18].

Le processus de modélisation d'un moteur synchrone se réalise en étudiant la tension, le courant et le flux magnétique du rotor et du stator afin d'obtenir des équations expressives pour ce moteur. Avant d'entamer cette étude, nous avons recours à la réduction de l'ensemble des axes à trois dimensions à des axes à deux dimensions et tournés, grâce à la transformation

de Clarke-Park, car le système basé sur les axes à trois dimensions est très complexe.

Aborderons le système $d-q$. Cela signifie que nous manipulerons des quantités biphasées et continues au lieu de quantités triphasées et sinusoïdales. Ainsi, nous obtenons deux courants, I_d et I_q , en quantités continues au lieu de trois courants alternatifs. Par conséquent, I_d est parallèle au champ magnétique permanent, et I_q est perpendiculaire à ce champ. Les deux contribuent au couple total du moteur. De plus, en contrôlant la direction du courant I_d , nous pouvons renforcer ou affaiblir le champ magnétique. À partir de là, nous comprenons que le courant et le couple sont interconnectés, et l'optimisation de leur relation repose sur l'angle d'avance de phase θ . Il est déterminé par l'algorithme de Couple Maximum Par Ampère (MTPA).

Nous avons deux options pour les aimants permanents dans le rotor, où les aimants sont collés à la surface du rotor dans un moteur MSAP à aimants en surface, ou intégrés dans des fentes à l'intérieur du rotor, comme dans un moteur MSAP à aimants enterrés. Le champ magnétique se déplacera de chaque pôle nord vers le pôle sud successif, ainsi le champ magnétique se déplacera le long du chemin, et le courant traversant les enroulements du stator interrompra ce champ, entraînant un couple magnétique τ_M . On peut décomposer le courant traversant le fil en deux composantes, une composante parallèle au champ magnétique I_d et une composante perpendiculaire au champ magnétique I_q et cette composante est ce qui conduit à la production du couple magnétique τ_M . Il existe un flux magnétique supplémentaire émis en diagonale en raison du courant de la bobine du stator illustré à la Fig. 1.1. Il s'agit d'un phénomène intéressant. Ce flux magnétique traverse le rotor où il rencontre une réluctance [19] :

$$\vec{\tau}_M = \vec{I} \times \vec{\Psi}_M = I_q \Psi_M \quad (1.1)$$

Le courant provenant de la bobine du stator produit un flux magnétique secondaire différent du flux produit par un aimant permanent. Ce flux magnétique secondaire est émis en diagonale et dans une certaine direction selon la dent dont il provient. Il peut être analysé en deux composantes, dont l'une est parallèle à l'aimant permanent Ψ_d et l'autre composante lui est perpendiculaire Ψ_q . La réluctance que ce flux rencontrera dépend du milieu à travers lequel il passe. Dans le cas du MSAP à aimants en surface Fig. 1.1a, les réluctances dans les deux sens sont égales, car la réluctance le long du trajet de l'axe d est la même que le long du trajet de l'axe q, et cela est dû au fait que la perméabilité de l'aimant est presque égale à la perméabilité de l'air. Ceci est tout à fait différent dans le MSAP à aimants enterrés Fig. 1.1b, où la réluctance le long du trajet de l'axe d est supérieure à la réluctance le long du

trajet de l'axe q , car la réluctance de l'aimant ou de l'air est bien supérieure à la réluctance de l'acier [19, 20].

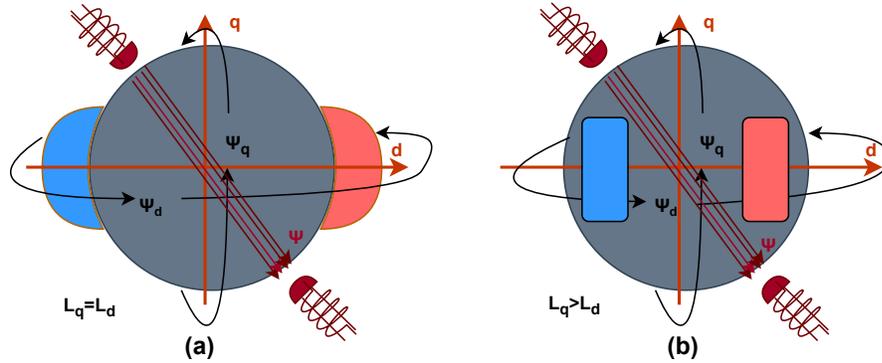


Figure 1.1: Structures des rotors des MSAP (a) aimants en surface, (b) aimants enterrés.

Nous savons que la réluctance est inversement proportionnelle à l'inductance, comme dans un MSAP à aimants en surface où nous trouvons que $L_d = L_q$. Cependant, dans un MSAP à aimants enterrés, nous trouvons que $L_d < L_q$, et le flux magnétique est directement proportionnel à l'inductance [21] :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d I_d \\ \Psi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (1.2)$$

Dans cette étude, nous exploiterons cette différence d'inductance, car nous travaillerons sur un MSAP à aimants enterrés. Il sera intéressant de noter que les réluctances dans les chemins d et q sont différentes, car le rotor et l'acier en particulier tentent de s'aligner dans la direction de moindre réluctance, en d'autres termes, ils tentent de s'aligner dans la direction de l'inductance maximale, et cela provoquera ce que nous appelons le couple de réluctance τ_R . Ce couple sera faible par rapport au couple magnétique τ_M , mais dans un véhicule électrique, on cherche à obtenir le maximum de performances possible. Par conséquent, cette petite quantité de couple de réluctance augmentera l'efficacité du moteur [22].

Le couple de réluctance est le produit vectoriel du flux magnétique et du courant, Fig. 1.2, Si $L_d = L_q$, alors $\tau_R = 0$, et c'est ce qui se passe dans un MSAP à aimants en surface. Cependant, dans un MSAP à aimants enterrés, la situation est différente car $L_d < L_q$ [21] :

$$\begin{cases} \vec{\tau}_R = \vec{I} \times \vec{\Psi} = (\vec{I}_d + \vec{I}_q) \times (\vec{\Psi}_d + \vec{\Psi}_q) = I_q \Psi_d - I_d \Psi_q \\ \tau_R = I_q L_d I_d - I_d L_q I_q = -(L_q - L_d) I_d I_q \end{cases} \quad (1.3)$$

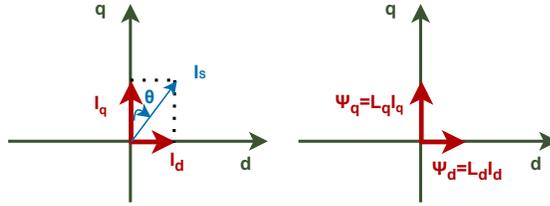


Figure 1.2: Calcule le couple de réluctance.

Nous allons maintenant examiner le couple total τ , composé du couple de réluctance τ_R et du couple magnétique τ_M . Nous savons que le flux de l'aimant permanent se situe uniquement le long de l'axe d, Fig. 1.3 :

$$\begin{cases} \vec{\tau} = \vec{I} \times \vec{\Psi} = (\vec{I}_d + \vec{I}_q) \times (\vec{\Psi}_d + \vec{\Psi}_q) = I_q \Psi_d - I_d \Psi_q \\ \tau = \tau_M + \tau_R \\ \tau = I_q (L_d I_d + \Psi_M) - I_d L_q I_q = I_q \Psi_M - (L_q - L_d) I_d I_q \end{cases} \quad (1.4)$$

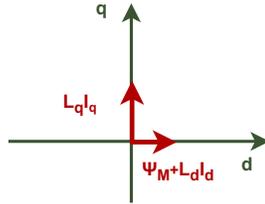


Figure 1.3: Calcule le couple de réluctance totale.

On a maintenant le couple magnétique positif. Sans changer sa signe, c'est-à-dire sans modifier son direction, nous allons orienter le couple de réluctance dans le même sens que le couple magnétique, ce qui implique de faire dans le même sens que le signal. La seule option est de rendre le courant I_d actuel négatif. Avec cette conception, nous obtenons un couple électromagnétique maximal. Ainsi, le MSAP à aimants enterrés est spécifiquement conçu à cet effet [23].

Le couple électromagnétique total du moteur τ_{em} , est déterminé en prenant en compte le nombre de paires de pôles P :

$$\tau_{em} = \frac{3}{2} P (I_q \Psi_M - (L_q - L_d) I_d I_q) \quad (1.5)$$

Lorsque le flux magnétique change, il engendre une force électromotrice. Plus le taux de variation du flux est élevé, plus l'amplitude de cette tension est importante. Cependant, la direction de cette force électromotrice s'oppose au changement naturel du flux magnétique. Cette tension cherche à supprimer le changement du flux magnétique. Ceci est régi par la loi de Faraday, qui se divise en deux aspects : la première partie traite de l'amplitude de la tension, tandis que la seconde concerne la direction de la tension. Parfois appelée loi de Lenz (correspondant à la deuxième partie de la loi de Faraday), elle découle de la nature de la conservation de l'énergie, où R_s est la résistance des bobines du stator [24] :

$$V = R_s \vec{I} + \frac{d\vec{\Psi}}{dt} \quad (1.6)$$

Comme nous l'avons appris précédemment, cette équation peut être simplifiée et exprimée en termes biphasés $d - q$. Le flux magnétique change de deux manières distinctes. La première consiste en un changement d'amplitude du flux, tandis que la seconde consiste en un changement de direction du flux. Il est essentiel de faire une distinction précise entre les deux, et ce qui influence le changement de l'amplitude, c'est le courant. Cela signifie que plus le courant augmente, plus le flux magnétique augmente, et vice versa. En ce qui concerne le changement de direction, il est causé par une modification de la direction du courant due à la rotation, ce qui implique qu'un changement de direction entraînera un déphasage de 90° , Fig. 1.4 [25] :

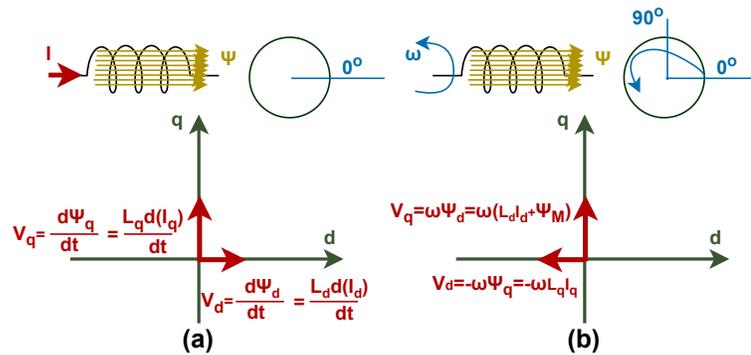


Figure 1.4: Type de changement Ψ : (a) change in amplitude, (b) change in direction.

$$\begin{cases} \vec{\Psi} = \Psi_d + j\Psi_q \\ \frac{d\Psi_d}{dt} = \frac{L_d d(I_d)}{dt} - \omega\Psi_q \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = \frac{L_q d(I_q)}{dt} + \omega\Psi_d \end{cases} \quad (1.7)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d I_d + \Psi_M \\ \Psi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (1.8)$$

Nous avons maintenant modélisé le moteur synchrone comme s'il s'agissait d'un moteur à courant continu excité indépendant. Cependant, il est important de noter que les variables restent interdépendantes plutôt que véritablement indépendantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{L_d d(I_d)}{dt} - \omega L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{L_q d(I_q)}{dt} + \omega L_d I_d + \omega\Psi_M \end{cases} \quad (1.9)$$

Nous pouvons maintenant représenter ce système à l'aide du circuit équivalent, comme illustré dans la Fig. 1.5. La résistance R_C représente les pertes dans l'acier et n'affecte pas la tension, mais plutôt le couple.

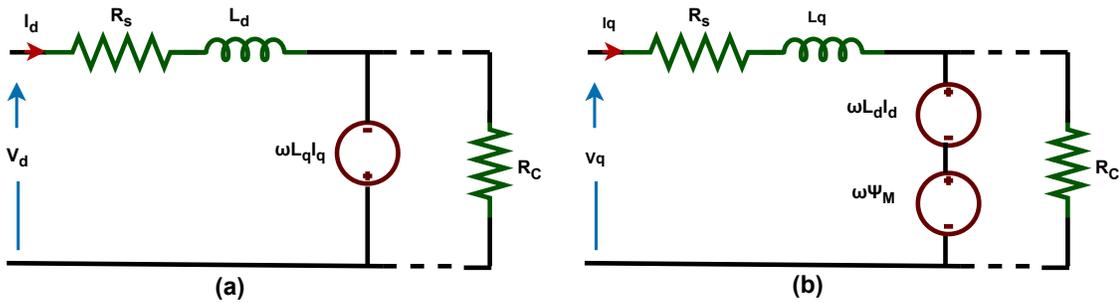


Figure 1.5: Circuit équivalent de MSAP à aimants enterrés : (a) pour phase d , (b) pour phase q .

Nous pouvons exprimer la relation entre la vitesse mécanique du moteur en termes de couple électromagnétique et de couple de charge comme suit [26] :

$$J \frac{d}{dt} \omega_m = \tau_{em} - \tau_L \quad (1.10)$$

La spécification du moteur utilisé dans cette étude est résumée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1: Paramètres de MSAP.

Paramètres	Symboles et valeurs
Paires de pôles	$P = 4$
Résistance du stator	$R_S = 0.0083\Omega$
Lien de flux	$\Psi = 0.0711wb$
Inductance de l'axe d	$L_d = 0.000174H$
Inductance de l'axe q	$L_q = 0.000292H$
Moment d'inertie	$J = 0.003kg.m^2$
Frottement visqueux	$f = 0.0002N.m.s^2$

1.4 Commande vectorielle basée sur le MTPA avec Contrôle d'affaiblissement de champ

Lorsque l'angle θ change, le couple magnétique τ_M et le couple de réluctance τ_R changeront, mais nous voulons maximiser le couple total. Autrement dit, comment puis-je déterminer l'angle θ tel que le couple total soit maximisé Fig. 1.6a [27] :

$$\begin{cases} I_d = I_s \sin \theta \\ I_q = I_s \cos \theta \\ \tau_{em} = \frac{3}{2}P (\Psi_M I_s \cos \theta - (L_q - L_d) I_s^2 \sin \theta \cos \theta) \end{cases} \quad (1.11)$$

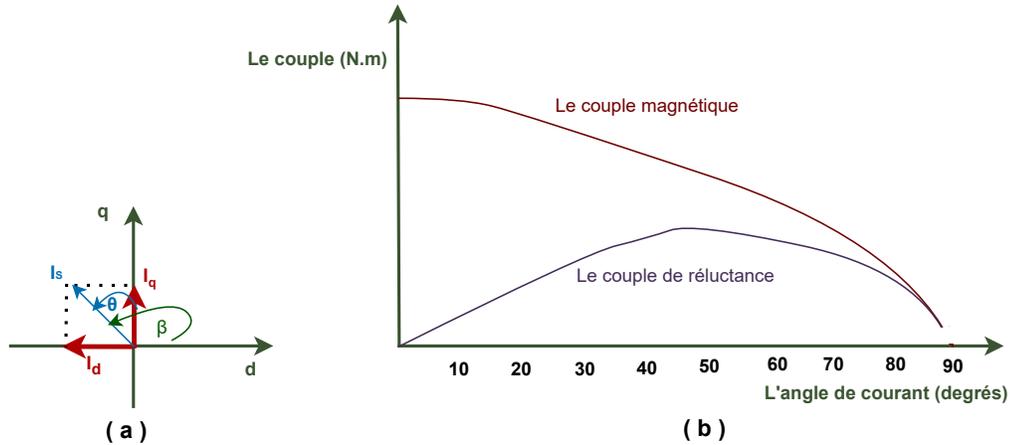


Figure 1.6: (a) Angle de couple, (b) Variation du couple en fonction de l'angle du courant I_s .

On remarque maintenant que le couple de réductance est proportionnel à l'angle θ et au carré du courant I_s^2 , tandis que le couple magnétique est proportionnel à l'angle θ et courant I_s . En utilisant l'équation suivante, nous voyons qu'à courant élevé I_d , l'angle θ s'approche de 45° , et à faible courant, l'angle θ s'approche de 0° . Cela signifie que nous mesurerons d'abord le courant, puis, sur cette base, nous déterminerons l'angle approprié (θ varie de 0° à 45°) Fig. 1.6b. Tout cela pour atteindre un couple maximal, connu sous le nom de stratégie MTPA :

$$\begin{cases} \tau_{em} = \frac{3}{2}P (\Psi_M I_s \cos \theta - (L_q - L_d) I_s^2 \sin 2\theta) = A I_s \cos \theta - B I_s^2 \sin 2\theta \\ A = \frac{3}{2}P \Psi_M \\ B = \frac{3}{2}P (L_q - L_d) \end{cases} \quad (1.12)$$

Pour déterminer les performances réelles du moteur, nous devons prendre en compte deux éléments fondamentaux : la limitation du courant et la limitation de la tension, car l'unité de commande du moteur est conçue dans ces limites. Si le courant dépasse la valeur admissible, la température augmentera à des niveaux inacceptables, entraînant des dommages aux appareils électroniques et au moteur. Le courant est proportionnel au couple, et la tension est proportionnelle à la vitesse.

À mesure que la vitesse du moteur augmente, la tension augmente, et ce qui provoque cette augmentation de la tension, c'est la force contre-électromotrice qui est proportionnelle à la vitesse. Cependant, nous avons des limites de tension. À mesure que la vitesse continue d'augmenter, la tension augmentera jusqu'à atteindre la tension maximale possible. Dans ce cas, la vitesse nominale devient la vitesse maximale, et à cette vitesse, nous obtiendrons la valeur nominale du couple. Si nous voulons augmenter la vitesse au-delà de la vitesse nominale, cela peut être réalisé en réduisant le courant, ce qui entraîne une diminution du couple. Ainsi, nous pouvons fournir la tension V , comme le montre l'équation suivante, où lors de la conception du moteur, nous cherchons à rendre la résistance R aussi petite que possible, car nous visons un couple plus élevé, étant donné que K est la constante de la force contre-électromotrice [28] :

$$V = RI + K\omega \quad (1.13)$$

Puisque la constante K est un grand nombre par rapport à la résistance R , cela signifie que si nous réduisons considérablement le courant, nous obtiendrons une petite augmentation de la vitesse ω , ce qui entraînera une diminution significative du couple moteur. Cela signifie

qu'une fois que la vitesse dépasse la vitesse nominale, le moteur devient très faible, ce qui n'est pas ce que nous souhaitons obtenir, comme illustré dans la Fig 1.7.

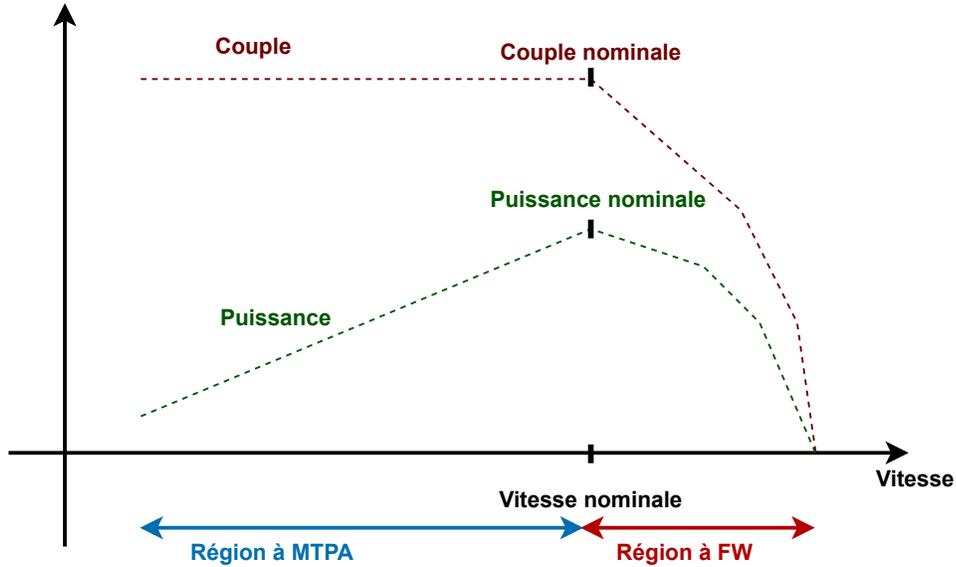


Figure 1.7: Caractéristique couple/vitesse sans FW.

La solution idéale consiste à réduire la force contre-électromotrice résultant de la grande variation du flux magnétique. Bien que les aimants permanents soient très puissants et fournissent un couple élevé, le problème réside dans la force contre-électromotrice élevée qu'ils génèrent. Par conséquent, notre objectif est de temporairement affaiblir l'effet des aimants permanents afin de réduire la force contre-électromotrice. Cela se réalise en augmentant le courant I_d (sans tenir compte du signe), ce qui entraîne également une augmentation de l'angle θ . Ainsi, nous affaiblissons le champ magnétique pour obtenir la tension nécessaire permettant d'atteindre des vitesses élevées tout en maintenant un bon couple moteur et, par conséquent, des performances élevées. Cette approche est connue sous le nom de stratégie d'affaiblissement du champ magnétique FW [27, 28].

Dans cette étude, nous allons combiner les stratégies MTPA et FW. En régulant la vitesse, nous déduisons le couple de référence τ_{em}^* et le flux magnétique de référence Ψ^* , c'est-à-dire si la vitesse est élevée ou normale. En combinant les deux stratégies, nous déduisons les courants de référence I_d^* et I_q^* . En utilisant la transformée inverse de Clarke-Park, nous déduisons les courants de référence triphasés. En régulant ensuite le courant, nous déduisons les signaux pour l'onduleur alimentant le moteur, comme illustré dans la Fig. 1.8 [23].

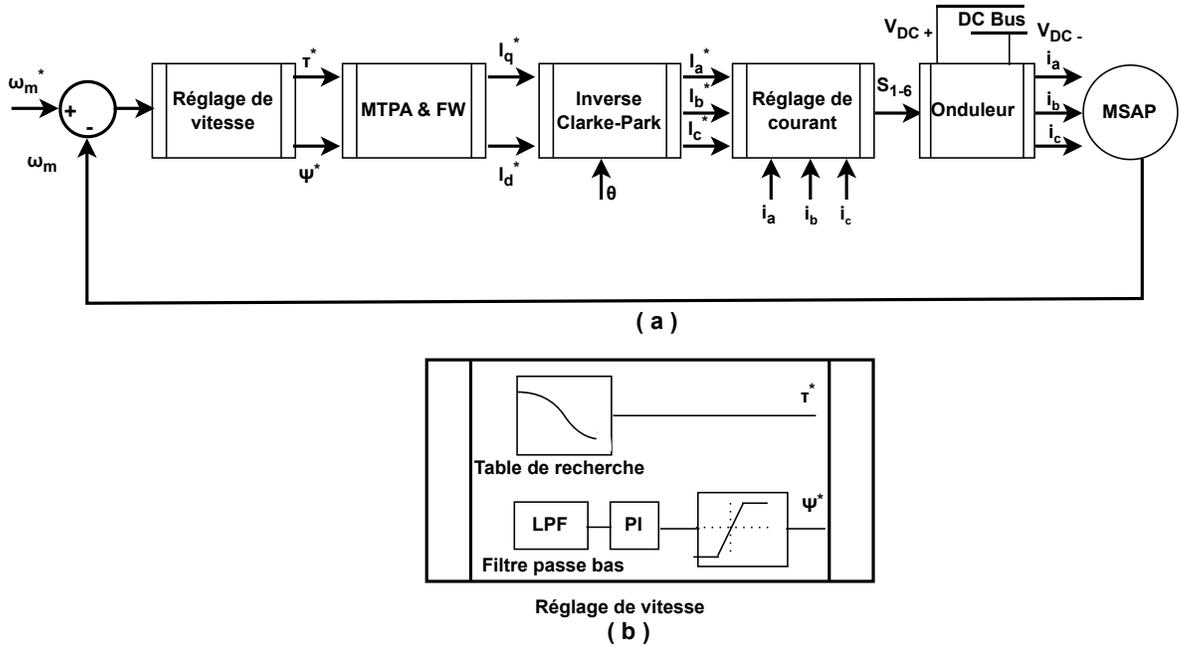
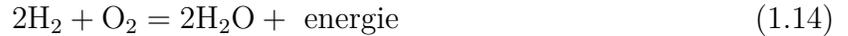


Figure 1.8: (a) Schéma du contrôle de MSAP basé sur MTPA et FW, (b) Réglage de vitesse.

1.5 Modélisation de la pile à combustible

L'énergie électrique peut être obtenue grâce à une pile à combustible, où se produit une réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Les résultats de cette réaction sont présentés dans l'équation suivante [29] :



Des modèles dynamiques des piles à combustible ont été développés dans le but de concevoir des stratégies de contrôle garantissant des performances précises et de haute qualité [30]. Les piles à combustible (PEMFC) à membrane échangeuse de protons sont les plus couramment utilisées dans les applications de véhicules électriques, principalement parce qu'ils peuvent fonctionner à des températures plus basses, ce qui permet un démarrage plus rapide [31]. Pour qu'une réaction se produise dans les cellules électrochimiques, un déséquilibre dans le système est nécessaire [32] :



L'équation de Nernst établit une relation entre la tension de cellule standard et la tension

non standard, en prenant en compte les variations des concentrations des solutions ioniques qui ne sont pas égales à 1 mole, ainsi que les changements de température [32, 33] :

$$\begin{cases} U_{FCoc} = U_{FCoc}^0 - \frac{RT}{nF} \ln(Q_{FC}) \\ Q_{FC} = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b} \end{cases} \quad (1.16)$$

Pour modéliser la pile à combustible, nous distinguons trois étapes comme suit : tout d'abord, modéliser ses performances idéales ; ensuite, calculer les pertes ; et enfin, déterminer les performances réelles en soustrayant les pertes aux performances idéales [32, 34, 35] :

$$U_{FC} = U_{FCoc} - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (1.17)$$

Pour améliorer les performances et l'efficacité des piles à combustible, il est essentiel de réduire les pertes. Cet objectif peut être atteint en apportant des modifications à la conception de la pile à combustible, notamment en optimisant les composants des électrodes, en améliorant la conception des électrodes de catalyseur, en augmentant la conductivité de l'électrolyte, en fonctionnant à des pressions et des températures plus élevées, et en réduisant la teneur en impuretés. L'un des défis auxquels sont confrontées les piles à combustible est la lenteur de la réaction des électrodes. Pour résoudre ce problème, des électrodes ayant une plus grande surface, généralement fabriquées à partir de matériaux carbonés, peuvent être utilisées. De plus, placer l'électrolyte en feuilles entre les électrodes à l'intérieur de la cellule peut réduire l'environnement à haute température pendant les réactions [32]. Le modèle de pile à combustible appliqué dans cette étude est représenté sur la Fig. 1.9, tel que proposé par [33]. Ce modèle est construit comme suit :

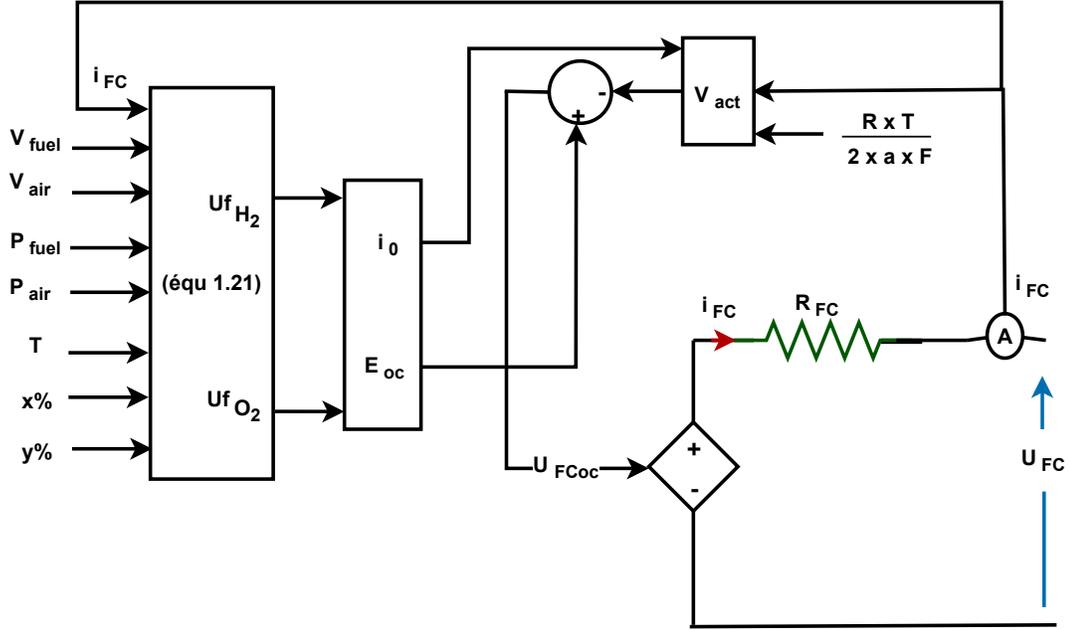


Figure 1.9: Circuit équivalent de la pile à combustible.

La tension théorique standard d'une pile à combustible peut être déterminée en prenant en considération les changements dans l'énergie de Gibbs [35, 36] :

$$\begin{cases} U_{FCoc}^0 = -\frac{\Delta G^0}{2F} \\ \Delta G^0 = \Delta H^0 - T^0 \Delta S^0 \\ U_{FCoc}^0 = -\frac{\Delta G^0}{2F} = -\frac{\Delta H^0 - T^0 \Delta S^0}{2F} = 1.2296 \end{cases} \quad (1.18)$$

La tension théorique pour la réaction cellulaire générale et les équations de Nernst peuvent être exprimées en termes de pressions partielles d'oxygène et d'hydrogène à n'importe quelle température donnée [37, 38] :

$$\begin{cases} U_{FCoc} = U_{FCoc}^0 + \frac{\partial U_{FCoc}}{\partial T} (T - T^0) \\ \left(\frac{\partial U_{FCoc}}{\partial T} \right)_p = \frac{\Delta S^0}{nF} \\ \Delta G = \Delta G^0 + RT \ln(Q_{FC}) \\ Q_{FC} = \left[\frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} \times \sqrt{a_{O_2}}} \right] \end{cases} \quad (1.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{FCoc} = U_{FCoc}^0 + \frac{\Delta S^0}{2F} (T - T^0) \\ \quad + RT \times \ln \left[\frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} \times \sqrt{a_{O_2}}} \right] \\ a_{H_2O} \simeq 1 \\ a_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P^0} = \frac{(1-Uf_{H_2})x\%P_{fuel}}{P^0} \\ a_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P^0} = \frac{(1-Uf_{O_2})y\%P_{air}}{P^0} \end{array} \right. \quad (1.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Uf_{H_2} = \frac{60000RTi_{FC}}{2FP_{fuel}V_{fuel}x\%} \\ Uf_{O_2} = \frac{60000RTi_{FC}}{4FP_{air}V_{air}y\%} \end{array} \right. \quad (1.21)$$

Après avoir pris en compte les pertes et exprimé la tension réelle des cellules, les résultats obtenus sont les suivants [37, 39] :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{FCoc} = E_{oc} - \frac{R \times T}{2 \times \partial \times F} \times \frac{1}{\frac{sT_d}{3} + 1} \times \ln \left(\frac{i_{FC}}{i_0} \right) \\ V_{act} = \frac{R \times T}{2 \times \partial \times F} \times \frac{1}{\frac{sT_d}{3} + 1} \times \ln \left(\frac{i_{FC}}{i_0} \right) \\ i_0 = \frac{2Fk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} \times e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \\ E_{oc} = K_c \times U_{FCoc} \end{array} \right. \quad (1.22)$$

La tension de Nernst finale peut être ajustée en tenant compte de l'impact de l'épuisement de l'oxygène sur la tension de sortie de la cellule [31, 38] :

$$\begin{aligned} U_{FCoc} = U_{FCoc}^0 + \frac{\Delta S^0}{2F} (T - T^0) + RT \times \ln(Q_{FC}) \\ - K_u (Uf_{O_2} - Uf_{O_2 \text{ nom}}) \end{aligned} \quad (1.23)$$

Tous les paramètres du modèle pour la pile à combustible sont présentés dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2: Paramètres du modèle de la pile à combustible.

Paramètres	Symboles et valeurs
Espèces chimiques et coefficients de stoechiométrie dans l'équation équilibrée	A, B, C, D, a, b, c, d
Tension de cellule théorique et aux conditions standards	$U_{FCoc}, U_{FCoc}^0 = 1.2296 V$
Constante de gaz universelle, numéro de charge	$R = 8.31451 J/mol K, n = 2$
Température de cellule et référence	$T = 318, T^0 = 298 K$
constante: de Faraday, d'équilibre	$F = 96485 C/mol, Q_{FC}$
Tension de sortie de pile à combustible, pertes de tension de pile à combustible : activation, concentration, ohmique	$U_{FC}, V_{act}, V_{con}, V_{ohm}$
Changement d'énergie de Gibbs et standard	$\Delta G, \Delta G^0$
Changement d'enthalpie et standard	$\Delta H, \Delta H^0 = 241.83 \times 10^3 J/mol$
Changement d'entropie et standard	$\Delta S, \Delta S^0 = -44.43 mol K$
Activité des espèces d'eau, hydrogène et oxygène	$a_{H_2O} = 1atm, a_{H_2}, a_{O_2}$
Pressions partielles de : espèces d'hydrogène, d'oxygène et standard	$P_{H_2}, P_{O_2}, P^0 = 101325 pa$
Utilisations d'hydrogène, d'oxygène et nominales d'oxygène	$Uf_{H_2}, Uf_{O_2}, Uf_{O_2nom} = 42.88\%$
Pressions d'alimentation de carburant et air	$P_{fuel} = 1.16 pa, P_{air} = 1 pa$
Pourcentages dans le carburant et l'air de : hydrogène, oxygène	$x = 99.95\%, y = 21\%$
Tension en circuit ouvert de cellule, Pressions d'alimentation de : carburant, air	$E_{oc}, V_{fuel}, V_{air}$
Cell Courant de cellule, courant d'échange, résistance de cellule, temps de stabilisation de cellule	$i_{FC}, i_0, R_{FC} = 0.024535\Omega, T_d$
Constante de: tension, sous-dépassement de tension, Boltzmann et Planck	$K_c = 45.686, K_u$ $k = 1.35 \times 10^{-23} J/K$ $h = 6.626 \times 10^{-23} J.s$
Coefficient de transfert de charge, taille de la barrière d'activation	$\partial, \Delta G_a$

1.6 Modélisation du supercondensateur

Les supercondensateurs, également appelés condensateurs électrolytiques à double couche, offrent l'avantage de stocker plus d'énergie en raison de leur capacité plus élevée [31]. Nous intégrons des supercondensateurs dans les systèmes de stockage hybrides pour gérer les pics de puissance élevés et éviter la dégradation des performances. Dans des conditions de fonctionnement variables, il devient essentiel de modéliser le comportement du supercondensateur pour prédire sa capacité [40]. Le modèle Stern-Tafel est un outil précieux pour comprendre et décrire le comportement des supercondensateurs proposés, qui présentent des caractéristiques dynamiques non linéaires. Ce modèle contribue au développement de stratégies de contrôle et à l'amélioration des performances du système dans diverses applications [41]. Le modèle de circuit équivalent se compose d'une source de tension contrôlée et d'une résistance interne, comme le montre la Fig. 1.10 [31, 42]. Ce modèle est utilisé pour représenter la capacité non linéaire, servant de modèle électrochimique pour comprendre la capacité liée à la dynamique de diffusion non linéaire dans la double couche [42–44] :

$$\begin{cases} C_T = \left(\frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \right)^{-1} \\ C_H = \frac{N_e \epsilon \epsilon_0 A_i}{d} \\ C_{GC} = \frac{F Q_C}{2 N_e R T} \times \sinh \left(\frac{Q_C}{N_e^2 A_i \sqrt{8 R T \epsilon \epsilon_0 C}} \right) \end{cases} \quad (1.24)$$

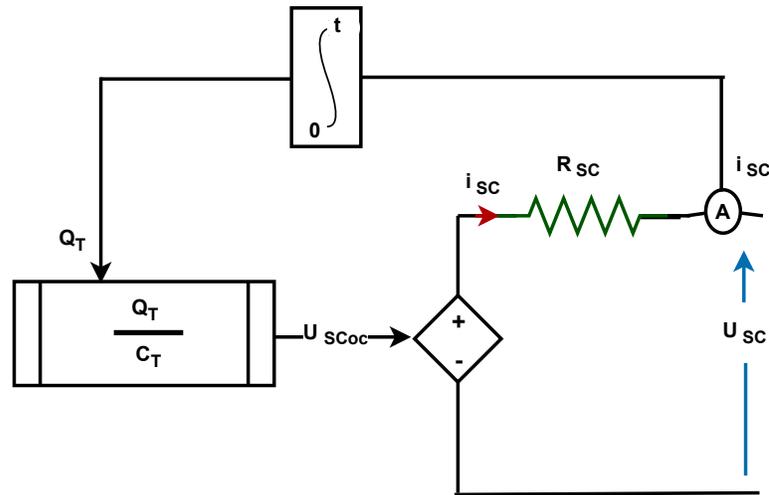


Figure 1.10: Circuit équivalent du supercondensateur.

La tension de sortie du supercondensateur est calculée en prenant en compte les pertes

ohmiques [42, 45, 46] :

$$\begin{cases} U_{SC} = \frac{Q_T}{C_T} - R_{SC}i_{SC} \\ Q_T = N_p Q_C = \int_0^t i_{SC} dt \end{cases} \quad (1.25)$$

Tous les paramètres du modèle pour le supercondensateur sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3: Paramètres du modèle du supercondensateur.

Paramètres	Symboles et valeurs
Capacité : totale, de Helmholtz, de Gouy-Chapman	C_T, C_H, C_{GC}
Zone Nombre de : couches d'électrodes, cellules de supercondensateur parallèles	$N_e = 6, N_P = 1$
Zone interfaciale entre les électrodes et l'électrolyte, longueur de la couche de Helmholtz	$A_i, d = 1 \times 10^{-9}m$
Valeurs de permittivité de : matériau électrolytique, espace libre	$\epsilon = 6.0208 \times 10^{-10} F/m$ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$
Tension, courant, résistance du module de supercondensateur	$U_{SC}, i_{SC}, R_{SC} = 0.15\Omega$
Concentration molaire, charge électrique: de cellule, totale	c, Q_C, Q_T

1.7 L'unité de contrôle de puissance utilisée dans les véhicules électriques

Dans de nombreux véhicules électriques et la plupart des véhicules hybrides, on intègre l'onduleur, le convertisseur, l'unité de contrôle de puissance (PCU) et même le système de refroidissement au sein d'une seule unité. Ce système global représente l'une des bases du design des véhicules modernes, permettant une interaction fluide entre ces éléments pour assurer une performance exceptionnelle et une haute efficacité. Nous aborderons ici une étude de ce système dans les véhicules Toyota Prius, fabriqués par le leader japonais du secteur. Ce modèle unique marque le début de Toyota dans le domaine des véhicules hybrides, avec sa production initiale débutant en 1997 et évoluant à travers cinq générations successives jusqu'à nos jours. L'analyse de ce système dans la Prius révèle les avancées technologiques et les innovations introduites par Toyota au fil des ans, contribuant à améliorer les performances du véhicule et à accroître son efficacité énergétique. Cela reflète le succès continu de l'entreprise dans la fourniture de technologies novatrices dans ce domaine.

1.7.1 Toyota Prius de première génération (1997-2003)

La Toyota Prius est apparue pour la première fois en 1997 et a continué jusqu'en 2003. Son objectif principal à l'époque était d'atteindre une dualité de sources d'énergie entre l'essence et l'électricité. La Fig. 1.11 montre les caractéristiques principales du système électrique, composé de la batterie, de l'onduleur et du moteur synchrone à aimants permanents. Bien que la première génération ait été un véhicule pionnier en son temps, elle n'était pas exempte de quelques défauts qui ont été améliorés dans les générations suivantes. La batterie utilisée dans cette génération est de type Ni-MH, composée de 240 cellules, et la tension d'une seule cellule est de 1,2 V. Par conséquent, la tension du DC Bus est de 288 V [47, 48].

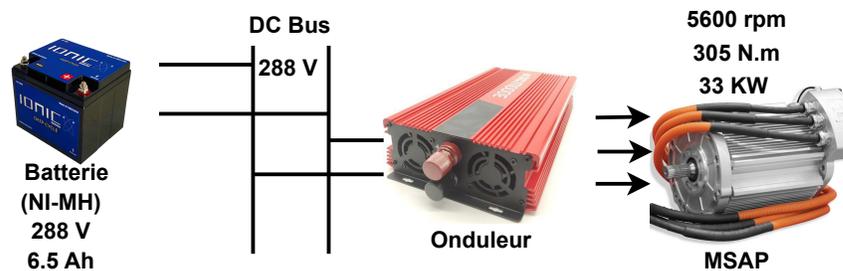


Figure 1.11: Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 1ère génération.

1.7.2 Toyota Prius de deuxième génération (2003-2010)

La deuxième génération de la Toyota Prius a été introduite en 2003 et a persisté jusqu'en 2010, avec pour objectif principal d'améliorer les performances en termes de consommation d'énergie. La Fig. 1.12 présente les caractéristiques clés du système électrique amélioré, auquel a été ajouté un convertisseur lié à la batterie pour maintenir la stabilité de la tension du DC Bus et exploiter l'énergie du freinage et du ralentissement pour recharger la batterie au lieu de la perdre sous forme de chaleur, améliorant ainsi l'efficacité énergétique. Malgré plusieurs améliorations apportées à cette génération, elle n'était pas dépourvue de certaines limitations qui ont été corrigées dans les générations suivantes. Ce véhicule s'est distingué dans cette génération par ses performances puissantes et efficaces en termes de consommation de carburant, ainsi que par son caractère plus respectueux de l'environnement par rapport à la première génération. La batterie utilisée dans cette génération est du type Ni-MH, composée de 168 cellules, avec une tension de 1,2 V par cellule. Par conséquent, la tension de sortie de la batterie est de 201,6 V [48, 49].

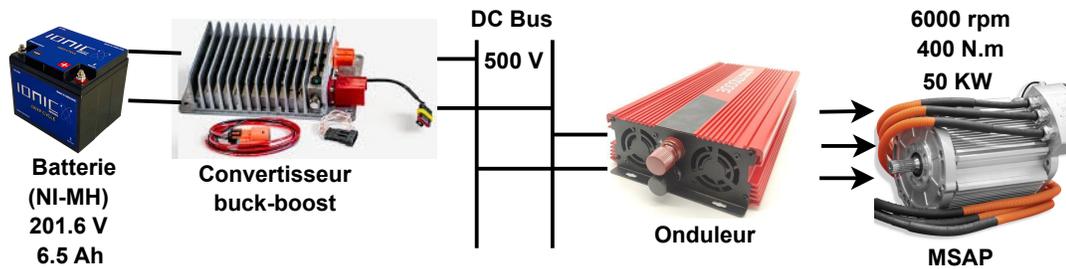


Figure 1.12: Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 2ème génération.

1.7.3 Toyota Prius de troisième génération (2010-2015)

La troisième génération de la Toyota Prius a été lancée en 2010 et a été produite jusqu'en 2015, avec pour objectif principal d'améliorer l'efficacité de la consommation de carburant. La Fig. 1.13 présente les caractéristiques clés du système électrique amélioré. Bien que la troisième génération ait été meilleure que ses prédécesseurs, elle n'était pas exempte de certaines limitations qui ont été corrigées dans les générations suivantes. Ce véhicule s'est distingué dans cette génération par ses performances puissantes et efficaces en termes de consommation de carburant. La batterie utilisée dans cette génération est de type Ni-MH, composée de 168 cellules, avec une tension de 1,2 volt par cellule. Par conséquent, la tension de sortie de la batterie est de 201,6 V [48, 50].

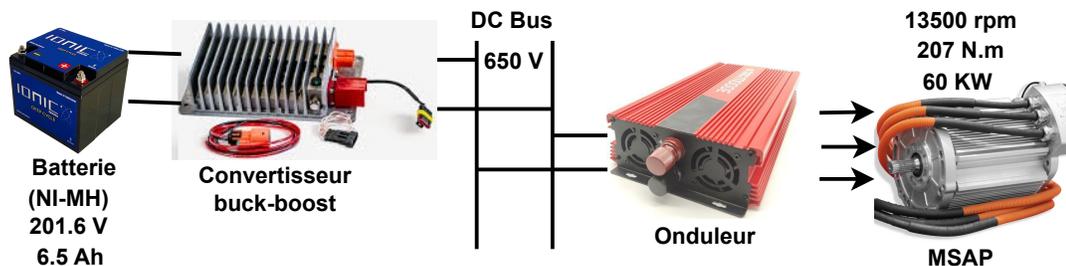


Figure 1.13: Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 3ème génération.

1.7.4 Toyota Prius de quatrième génération (2015-2022)

La quatrième génération de la Toyota Prius a été lancée en 2015 et a été produite jusqu'en 2022. Son objectif principal à l'époque était de réduire les coûts et la taille, en plus d'améliorer l'efficacité de la consommation de carburant. La Fig. 1.14 présente les caractéristiques clés du système électrique amélioré. Malgré toutes les améliorations apportées à ce modèle, il n'était

pas exempt de certaines imperfections qui ont été corrigées dans la génération ultérieure. Ce véhicule s'est distingué dans cette génération par son poids plus léger et des performances meilleures en termes de consommation de carburant et de confort. La batterie utilisée dans ce modèle est de type Li-ion, composée de 56 cellules, avec une tension de 3.6 V par cellule. Par conséquent, la tension de sortie de la batterie est de 201.6 V [48].

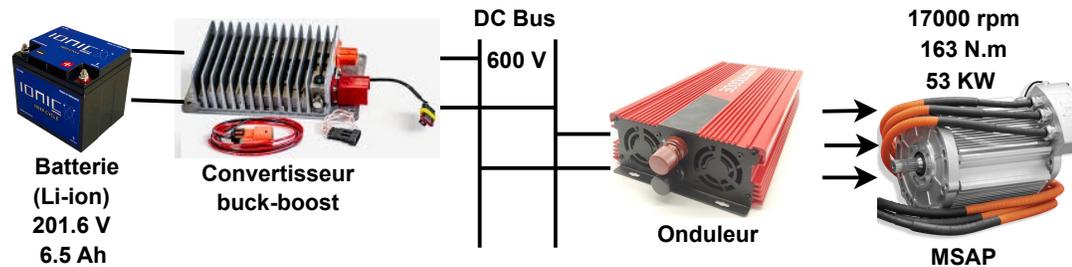


Figure 1.14: Unité de commande de puissance de la Toyota Prius de 4ème génération.

1.7.5 Toyota Prius de cinquième génération (2022-présent)

La cinquième génération de la Toyota Prius a été lancée à la fin de l'année 2022. Son objectif principal à cette époque était de réduire les coûts et la taille, tout en adoptant des technologies modernes pour le contrôle de l'énergie et le système de refroidissement. Ce véhicule s'est distingué dans cette génération par son poids plus léger, sa rigidité accrue, ses performances améliorées, ainsi que sa consommation de carburant optimisée, en la positionnant comme la plus respectueuse de l'environnement. La batterie utilisée dans ce modèle est plus légère que celle des générations précédentes.

1.8 Les convertisseurs utilisés dans les Toyota Prius

L'optimisation de l'efficacité en réduisant les pertes et l'économie d'énergie restent toujours des éléments fondamentaux dans la conception des véhicules électriques et hybrides. Dans cette optique, les générations futures adopteront des semi-conducteurs fabriqués à partir de SiC (carbure de silicium) au lieu de Si (silicium), comme illustré dans la Fig. 1.15. Ce type de semi-conducteurs a été développé par Toyota en collaboration avec Denso pour une utilisation dans les véhicules électriques et hybrides. L'utilisation du carbure de silicium signifie une réduction de la taille des bobines et des condensateurs, et donc une réduction de la taille de l'unité de contrôle de puissance (PCU). Les semi-conducteurs en carbure

de silicium présentent une perte d'énergie réduite lors de la mise en marche et à l'arrêt, permettant ainsi un flux efficace du courant même à des fréquences élevées. De plus, des transistors IGBT ont été adoptés en raison de leur capacité à supporter des tensions et des courants élevés [51, 52].



Figure 1.15: Véhicule d'essai SiC.

L'unité de contrôle de puissance, parfois appelée groupe d'onduleurs dans la quatrième génération, comme illustré dans la Fig. 1.16, représente l'un des composants essentiels du système électrique chargé de la distribution et de la régulation de l'énergie dans les véhicules électriques et hybrides. Ce système comprend plusieurs éléments, notamment l'onduleur du moteur, l'onduleur du générateur, l'onduleur du compresseur, en plus d'un convertisseur bidirectionnel de haute tension pour abaisser et augmenter la tension, ainsi qu'un convertisseur unidirectionnel pour abaisser la tension à basse tension. Cette unité complète ses performances en utilisant des capteurs avancés et un processeur dédié au contrôle, contribuant à réaliser un équilibre efficace entre tous les composants pour garantir une performance exceptionnelle et une haute efficacité de ce système. Le modèle équivalent détaillé est illustré dans la Fig. 1.17.

Le responsable principal de la gestion et de la distribution de l'énergie dans ce système est le processeur, où même les stratégies les plus avancées peuvent être simplement mises en œuvre en écrivant des lignes de code exécutées par ce processeur. La Fig. 1.18 illustre clairement la vision la plus simple du processus de génération d'ondes triphasées utilisées pour alimenter le moteur du véhicule, tandis que la Fig. 1.19 montre la génération d'énergie électrique récupérée de la charge lors du ralentissement ou du freinage. Cela est réalisé en contrôlant l'allumage et l'extinction du réseau de transistors.

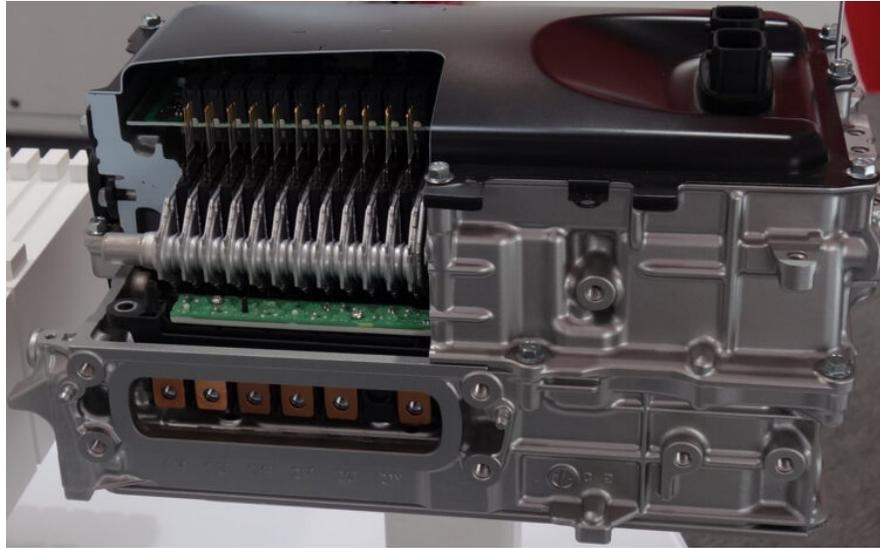


Figure 1.16: Onduleur Toyota Prius de 4ème génération.

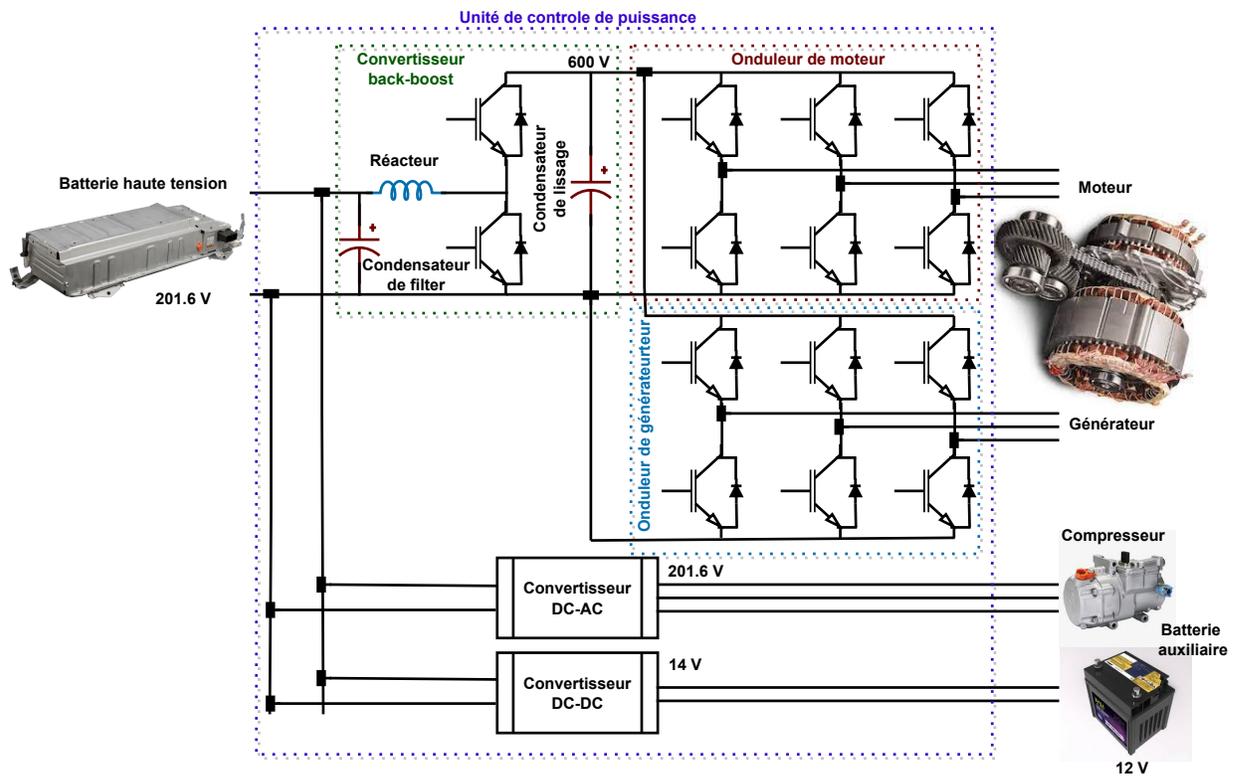


Figure 1.17: Modèle équivalent de l'onduleur de la Toyota Prius de 4ème génération.

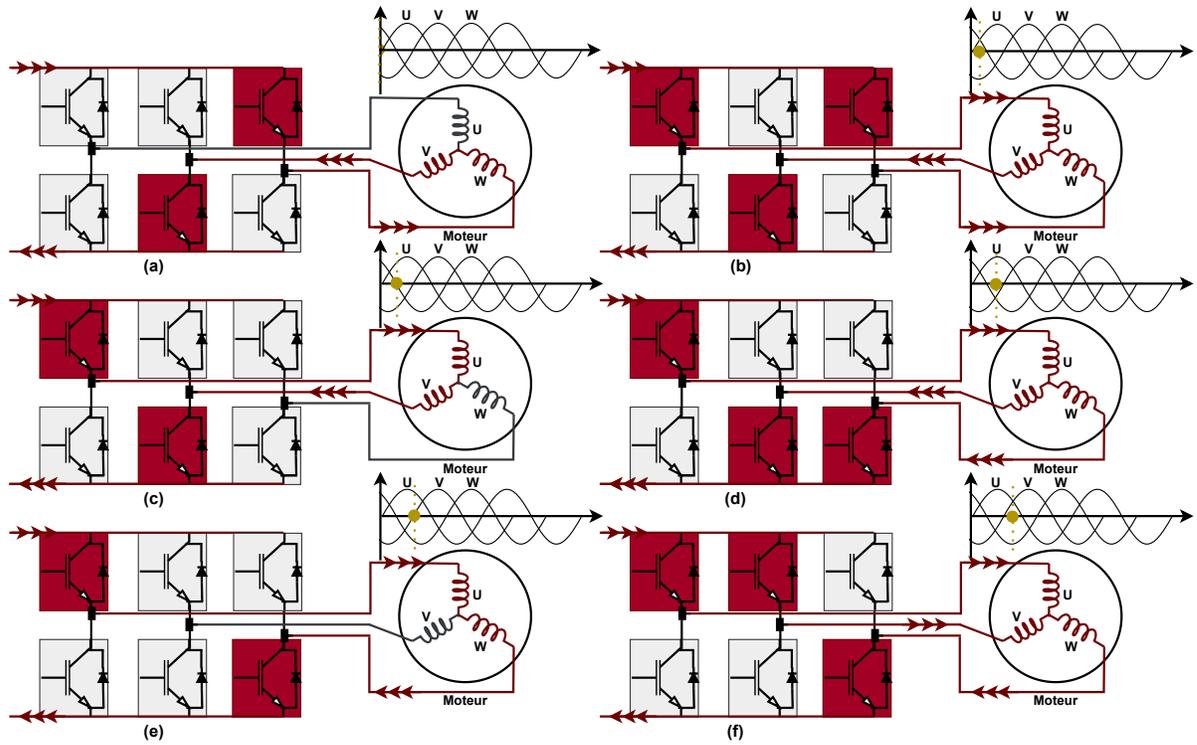


Figure 1.18: Fonctionnement de l'onduleur vers l'entraînement du moteur.

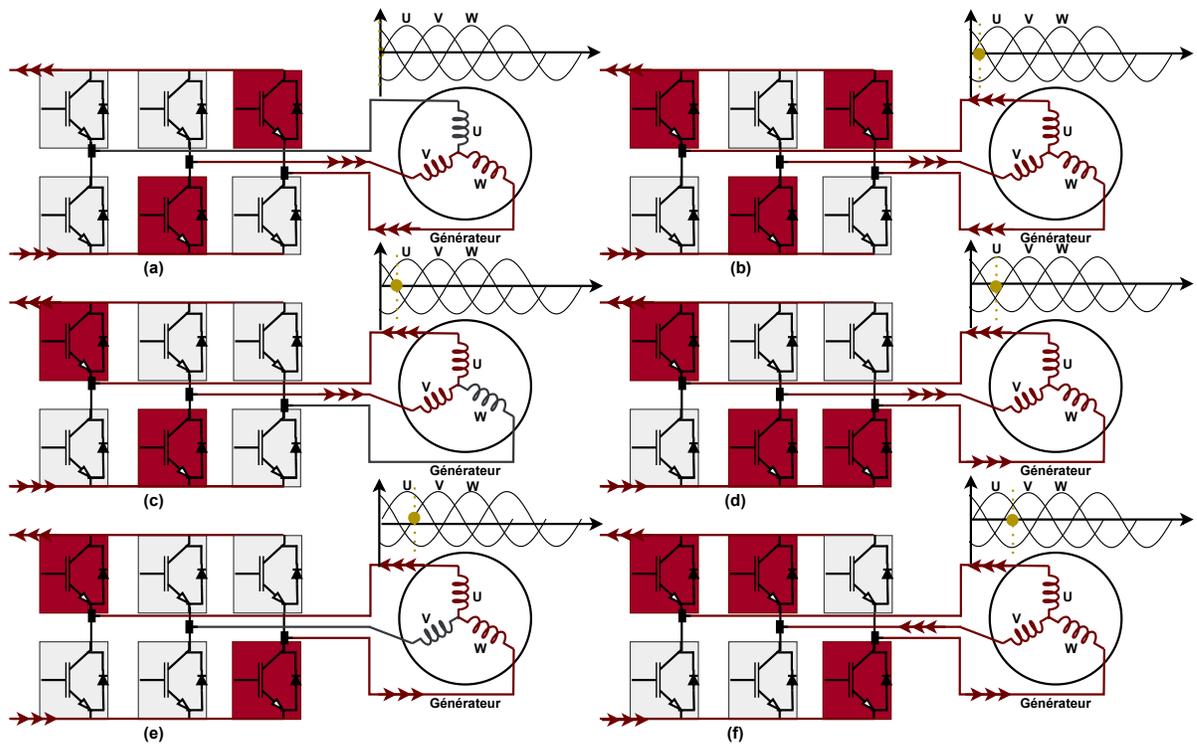


Figure 1.19: Fonctionnement de l'onduleur vers l'entraînement du générateur.

Nous contrôlons le couple de rotation du moteur en régulant le courant, tandis que la vitesse est ajustée en modifiant la fréquence. La Fig. 1.20 illustre clairement les ondes triphasées lors du changement de fréquence et du changement de couple.

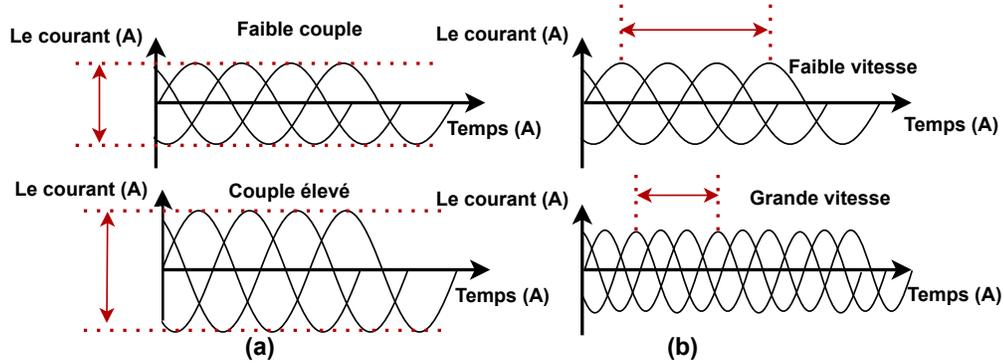


Figure 1.20: contrôle du moteur : (a) le couple est contrôlé par le courant, (b) la vitesse est contrôlée par la fréquence.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous concevons un moteur synchrone à aimant permanent dans le but d'un contrôle radial en vue d'atteindre une efficacité maximale. Nous nous engageons toujours à obtenir les meilleures performances dans un véhicule électrique, c'est pourquoi nous avons élaboré un modèle de commande en ayant à l'esprit une efficacité maximale. De plus, les sources d'énergie, à savoir la pile à combustible et le supercondensateur, sont modélisées pour prédire la puissance et garantir de bonnes performances. Et finalement, la structure et la technologie des convertisseurs utilisés actuellement dans le véhicule électrique et hybride ont été présentées.

Chapitre 2

Estimation de l'état de charge d'une batterie lithium-ion

2.1 Introduction

La détermination de l'état de charge (SOC) représente un élément essentiel au sein d'un système de gestion de batterie (BMS) et revêt une importance cruciale pour diverses raisons. Cela inclut l'extension de la durée de vie de la batterie, l'amélioration de l'efficacité de son utilisation, la prévention des décharges profondes et le maintien global de la santé de la batterie. Une estimation précise du SOC est particulièrement essentielle dans les applications des véhicules électriques, où elle contribue de manière significative à l'amélioration des performances et de l'efficacité du véhicule. De plus, elle permet une meilleure utilisation de la batterie en fournissant des informations précises sur le montant réel de la charge. Une meilleure utilisation de la batterie peut en effet être obtenue lorsque la quantité de charge réelle est connue avec précision [53–55].

Ce chapitre aborde l'estimation de l'état de charge en utilisant le filtre de Kalman étendu comme principal moyen d'obtenir des résultats précis et fiables. Bien que le filtre de Kalman étendu puisse gérer des systèmes non linéaires, il requiert une conception et une modélisation précises du système. Afin de surmonter les défis liés à une non-linéarité élevée, même sans une connaissance explicite de la précision du modèle du système, l'intégration d'un réseau neuronal profond s'avère nécessaire pour améliorer les performances. L'ajout d'un réseau neuronal profond revêt une importance cruciale dans cette recherche, car il permet une gestion efficace des complexités et des changements non linéaires du modèle. Doté de la capacité d'absorber des informations et d'apprendre des modèles complexes, un réseau neuronal pro-

fond contribue à améliorer la précision de l'estimation de l'état de charge et à gérer plus efficacement ses fluctuations. Ainsi, cette stratégie augmente la qualité et la fiabilité des résultats, ce qui se traduit par d'excellentes performances pour le modèle d'estimation de l'état de charge [40, 56].

2.2 Modélisation de la batterie

2.2.1 Modèle électrochimique d'une batterie

Les batteries lithium-ion sont un composant essentiel des systèmes électriques, notamment ceux utilisés dans les véhicules électriques. Lors de la conception de systèmes de véhicules électriques, la batterie lithium-ion est souvent représentée par un modèle qui prend en compte divers attributs pour améliorer les performances globales du système [57]. Le courant de décharge/charge, la température, le nombre de cycles (vieillessement), les changements dans l'environnement, les dommages physiques (tels que les chocs et les vibrations), la durée de vie de l'électrolyte, la corrosion des électrodes, la formation et la dégradation de l'interface électrolytique solide, la formation de dendrites, les réactions chimiques indésirables, et le vieillissement indésirable de l'électrolyte [58–61]. Il est important de noter qu'il existe une relation non linéaire dans la tension des cellules de la batterie, car la tension de charge diffère de la tension de décharge [31, 57] :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{Boc_discharge} = E_o - K_b \left(\frac{Q_b}{Q_b - it} \right) (it + i^*) \\ \quad + A_b e^{-B_b \times it} \\ U_{Boc_charge} = E_o - K_b \left(\frac{Q_b}{Q_b - it} \right) \times it \\ \quad - K \left(\frac{Q_b}{it - 0.1Q_b} \right) \times i^* + A_b e^{-B_b \times it} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Dans ce modèle, un composant de polarisation de tension a été ajouté pour mieux représenter l'effet de l'état de charge de la batterie. De plus, le courant filtré de la batterie a été utilisé à la place du courant réel pour garantir la stabilité de la simulation, comme le montre la Fig. 2.1 [31, 57, 62–64].

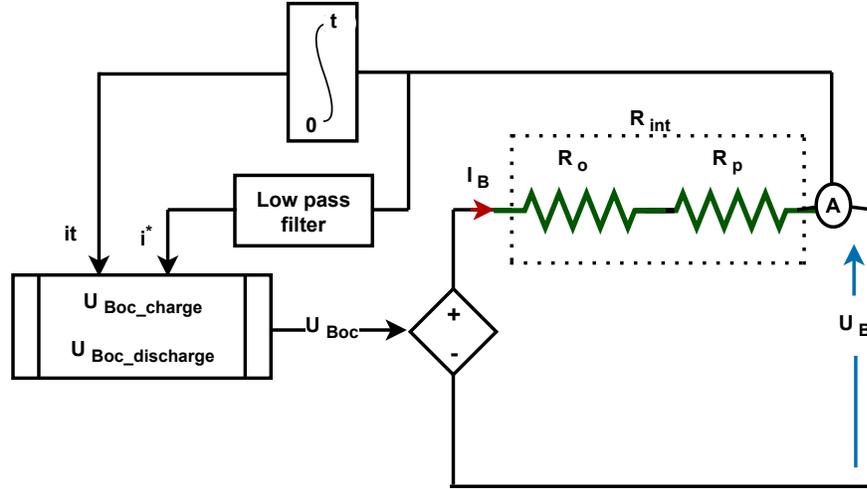


Figure 2.1: Modèle électrochimique de circuit équivalent de la batterie lithium-ion.

Tous les paramètres du modèle électrochimique pour la batterie sont présentés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Paramètres du modèle électrochimique de la batterie.

Paramètres	Symboles et valeurs
Tension de la batterie : décharge, charge, constante	$U_{Boc_discharge}$, U_{Boc_charge} , $E_o = 52.049 V$
Constante de polarisation, capacité de la batterie	$K_b = 0.0089902$, $Q_b = 40 Ah$
Zone exponentielle : amplitude, constante de temps inverse	$A_b = 4.0308$, $B_b = 1.5265$
Courant : de charge réel, filtré	it , i^*
Tension, courant de la batterie	U_B , I_B
Résistance : ohmique, polarisation, interne de la batterie	R_o , R_p , $R_{int} = 0.012 \Omega$

2.2.2 Modèle PNGV d'une batterie

Le modèle PNGV de batterie est une représentation fondamentale du comportement des batteries utilisées dans les véhicules électriques. Ce modèle se compose d'un ensemble d'éléments électroniques et électriques qui représentent les détails les plus fins du comportement de fonctionnement de la batterie. Il permet d'incorporer diverses influences liées à des facteurs tels que la température de la batterie, l'état de santé, et les différentes conditions de fonctionnement. En raison de sa simplicité et de sa précision, ce modèle est largement utilisé pour

estimer l'état de charge des batteries des véhicules électriques, ce qui est crucial pour comprendre et surveiller les performances des batteries, garantir leur sécurité et optimiser leur efficacité pendant leur utilisation [65–68].

Le modèle développé est une extension de Thévenin, constituant un circuit RC du premier ordre. Un condensateur, noté C_0 , est incorporé pour représenter une tension variable dans le circuit, et c'est le but de son ajout. La direction de décharge est considérée comme positive pour le courant, comme illustré sur la Fig. 2.2, avec les paramètres du modèle détaillés dans le tableau 2.2. Ce modèle a été choisi pour l'étude en raison de ses caractéristiques précieuses, qui englobent des considérations sur les changements de température, les différences de tension et l'état de charge. Le condensateur ajouté contribue à la variation globale de la tension dans le circuit. De plus, le modèle offre l'avantage d'un temps de simulation court [58, 61].

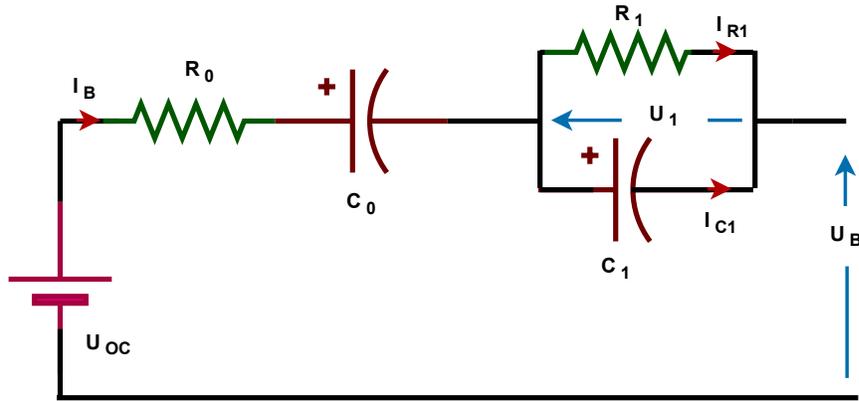


Figure 2.2: Modèle PNGV de circuit équivalent à la batterie.

Tableau 2.2: Paramètres du modèle PNGV de la batterie.

Paramètres	Symbole
Tension : borne de la batterie, aux bornes de C_1 et batterie idéal	U_B, U_1, U_{OC}
Le courant d'écoulement de la batterie, R_1 et C_1	I_B, I_{R1}, I_{C1}
Résistance ohmique, Polarisation et condensateur	R_0, R_1, C_1
Le rendement coulombien, la capacité nominale	η, Q_B
État de charge : actuel et précédent	SOC, SOC_p
Constante arbitraire	c

Sur la base de la loi des courants de Kirchhoff, de la loi d'Ohm et du comportement du

courant traversant le condensateur, l'équation suivante peut être exprimée :

$$I_B = \frac{U_1}{R_1} + C_1 \frac{dU_1}{dt} \quad (2.2)$$

En résolvant l'équation différentielle précédente, on trouve :

$$\begin{cases} U_1(t) = ce^{-\frac{t}{\tau}} + R_1 I_B(t) \\ \tau = R_1 C_1 \end{cases} \quad (2.3)$$

Sur la base de la loi des tensions de Kirchhoff et du comptage de Coulomb, l'équation suivante peut être exprimée :

$$\begin{cases} U_B = U_{OC} - R_0 I_B - U_1 \\ SOC(t) = SOC_p - \int \frac{\eta I_B(t)}{Q_B} dt \end{cases} \quad (2.4)$$

En appliquant les équations d'état en temps discret, on obtient l'équation suivante :

$$\begin{cases} SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\eta \Delta t}{Q_B} I_B(k) \\ U_1(k+1) = U_1(k) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} + R_1 I_B(k) (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}) \end{cases} \quad (2.5)$$

Enfin, nous pouvons représenter ce système avec les équations d'état comme suit :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ x(k) = \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \end{bmatrix} \\ u(k) = I_B(k) \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{Q_B} & 0 \\ 0 & R_1 (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.7)$$

On remarque que U_B est une fonction non linéaire. Pour le linéariser, nous devons effectuer un développement de Taylor autour des variables d'état du système. Ce processus nous permettra d'obtenir l'équation de sortie du système [56] :

$$\begin{cases} U_B(k+1) = U_{OC}(k) - R_0 I_B(k) - U_1(k) \\ \quad \quad \quad = g(x(k), u(k)) \\ U_{OC}(k+1) = h(SOC(k)) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} y(k+1) = Cx(k) \\ C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial SOC} & \frac{\partial g}{\partial U_1} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial SOC} & -1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.9)$$

2.3 Filtre de Kalman étendu

Le filtre de Kalman est un prédicteur idéal, car il calcule les valeurs d'état du système qui minimisent le carré de l'erreur entre la prédiction et l'état correct. Ce filtre résout le problème de l'observateur, c'est-à-dire qu'il tente d'estimer l'état du système uniquement sur la base de ses sorties. En conséquence, le filtre de Kalman est largement utilisé et salué dans divers domaines. Cette popularité est attribuée à ses nombreux avantages, notamment son caractère séquentiel, le rendant adapté aux applications informatiques, et son gain variable dans le temps, le rendant constamment corrigé. En plus de donner des résultats précis et bons, il est parfait [69, 70].

Le modèle de la batterie proposé ne simule pas tous les scénarios et réactions électrochimiques réels qui se produisent à l'intérieur d'une cellule de batterie. Et malgré inexactitudes potentielles dans les valeurs attribuées aux éléments électriques dans ce modèle. De plus, déterminer avec précision les valeurs initiales des variables d'état pose un défi. Pour résoudre ces problèmes, l'utilisation d'un filtre de Kalman est devenue cruciale [71, 72].

Parfois, les variables d'état que nous cherchons à estimer et à contrôler sont régies par des équations non linéaires. De plus, les valeurs des paramètres du circuit équivalent de la batterie changent avec l'état de charge. Par conséquent, nous avons besoin d'une stratégie capable de gérer les systèmes qui présentent des changements en fonction du temps. Cela implique que le système ne peut pas être traité efficacement à l'aide d'un filtre de Kalman standard. Par conséquent, le filtre de Kalman étendu a émergé, spécialement conçu pour traiter les systèmes non linéaires et variables dans le temps. L'algorithme non linéaire de Kalman est basé sur l'approximation du processus à la linéarité via le développement de Taylor [70, 73–75].

Le filtre de Kalman étendu comporte essentiellement trois étapes principales, permettant une estimation plus précise de l'état et des variables du système. La première étape est la prédiction, où un modèle dynamique du système est utilisé pour estimer son état futur. Vient ensuite la deuxième étape, connue sous le nom de linéarisation, dans laquelle le modèle non linéaire est approché par un modèle linéaire local à chaque pas de temps. Enfin, la troisième étape implique une mise à jour où les mesures réelles du système sont comparées

aux prédictions dérivées de la première étape, et l'estimation est corrigée sur la base de cette comparaison. Ces trois étapes permettent collectivement au filtre de Kalman étendu de gérer efficacement les systèmes non linéaires, contribuant ainsi à améliorer les performances de contrôle et d'estimation d'état [63, 76].

Dans ces conditions, le système non linéaire est représenté par l'équation suivante [63, 77] :

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = f(\hat{x}(k), u(k)) + Q \\ y(k) = g(\hat{x}(k), u(k)) + R \end{cases} \quad (2.10)$$

Ici, R représente la matrice de bruit de mesure et Q est la matrice de bruit de processus aléatoire.

Pour chaque pas de temps, le filtre de Kalman étendu calcule les attentes d'état $\hat{x}(k)$ et $\hat{x}(k-1)$ ainsi que les matrices de covariance $p(k)$ et $p(k-1)$. Le filtre passe par trois étapes, comme illustré sur la Fig. 2.3 [76–78] :

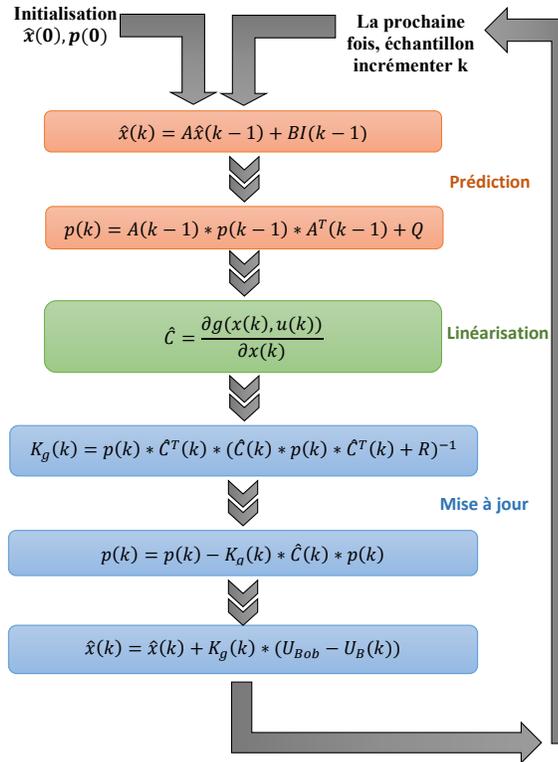


Figure 2.3: Étapes séquentielles du processus de conception du modèle EKF.

Ici, K_g représente le gain de Kalman et U_{Bob} désigne la tension de la batterie à la borne de l'observateur.

La première étape implique la prédiction, où la prédiction d'état $\hat{x}(k)$ et la matrice de covariance $p(k)$ sont calculées :

$$\begin{cases} \hat{x}(k) = A\hat{x}(k-1) + BI(k-1) \\ p(k) = A(k-1) * p(k-1) * A^T(k-1) + Q \end{cases} \quad (2.11)$$

La deuxième étape est la linéarisation, au cours de laquelle la matrice de sortie \hat{C} est calculée :

$$\hat{C} = \frac{\partial g(x(k), u(k))}{\partial x(k)} \quad (2.12)$$

La troisième étape implique la mise à jour, où le gain de Kalman $K_g(k)$, l'estimation d'état mise à jour $\hat{x}(k)$, et la matrice de covariance mise à jour $p(k)$ sont calculés :

$$\begin{cases} K_g(k) = p(k) * \hat{C}^T(k) * (\hat{C}(k) * p(k) * \hat{C}^T(k) + R)^{-1} \\ \hat{x}(k) = \hat{x}(k) + K_g(k) * (U_{Bob} - U_B(k)) \\ p(k) = p(k) - K_g(k) * \hat{C}(k) * p(k) \end{cases} \quad (2.13)$$

2.4 Estimation de l'état de charge basée sur EKF-DNN

Dans certains cas, le filtre de Kalman non linéaire rencontre des défis, tels que des approximations inexactes lorsque les conditions initiales ne sont pas adaptées ou lorsque l'approximation linéaire ne parvient pas à représenter précisément le système. De plus, les modèles de batterie actuels peuvent ne pas capturer avec précision tous les scénarios au sein de la cellule. Dans de tels cas, les méthodes hybrides deviennent préférables. Par exemple, combiner l'algorithme du filtre de Kalman étendu avec des réseaux de neurones profonds [70]. Cette approche hybride a été adoptée dans la présente étude.

Les réseaux de neurones profonds appartiennent au domaine des études sur l'intelligence artificielle en informatique et trouvent de nombreuses applications dans le contrôle des systèmes électriques traitant de mégadonnées, de modèles complexes et de problèmes non linéaires complexes. Cette stratégie s'avère adaptée à de tels systèmes en raison de sa robustesse, de la qualité des résultats qu'elle fournit et de sa facilité d'application. Surtout, elle peut être appliquée même sans connaissance préalable de la précision du modèle de système utilisé [79–82].

Sur la base des équations ci-dessus et de la stratégie du filtre de Kalman étendu, nous avons formé des réseaux de neurones profonds. Tout cela a été réalisé en trois étapes men-

tionnées : prédiction, linéarisation et mise à jour. Le modèle a été développé comme suit :

2.4.1 Étape de prédiction

Après avoir défini l'ensemble des valeurs, telles que les matrices de système A et B , les valeurs initiales $x(0)$ et $p(0)$ peuvent être déterminées de manière aléatoire, ainsi que les matrices de bruit Q et R . Ici, R représente la matrice de bruit de mesure, qui peut être déterminée en connaissant la tension de la batterie à partir de la racine des carrés du bruit dans chaque cellule. Q est la matrice de bruit de processus aléatoire et ses valeurs peuvent être déterminées par des études expérimentales, garantissant que les valeurs de tension de batterie prévues s'alignent sur les valeurs expérimentales. La précision du filtre est influencée par le choix de Q et R [83] :

$$\begin{cases} x(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ p(0) = \begin{bmatrix} \frac{13}{3} \times 10^{-9} & 0 \\ 0 & \frac{10}{9} \times 10^{-8} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} R = 10^{-6} \\ Q = \begin{bmatrix} \frac{13}{3} \times 10^{-9} & 0 \\ 0 & \frac{10}{9} \times 10^{-8} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.15)$$

Maintenant, après avoir ajusté toutes les valeurs, l'étape de prédiction suit, au cours de laquelle les variables d'état et la matrice de covariance sont prédites, Fig. 2.4a.

2.4.2 Étape de linéarisation

La tension en circuit ouvert U_{OC} est fonction de l'état de charge SOC , qui est non linéaire et varie avec le temps. Cela rend la fonction U_B non linéaire et variable dans le temps. En nous appuyant sur le premier terme du développement de Taylor, nous calculons les dérivées partielles de la fonction g par rapport aux variables d'état x pour obtenir la matrice jacobienne \hat{C} , Fig. 2.4b.

2.4.3 Étape de mise à jour

Dans l'étape de mise à jour, les nouvelles informations disponibles après prédiction et linéarisation sont utilisées pour mettre à jour l'estimation des variables d'état SOC et U_1 . L'estimation

est continuellement affinée en comparant les valeurs prédites aux données mesurées et en incorporant une matrice d'erreur de mesure pour améliorer la précision. Le réseau neuronal profonds a été formé pour mettre à jour les variables d'état, Fig 2.4c.

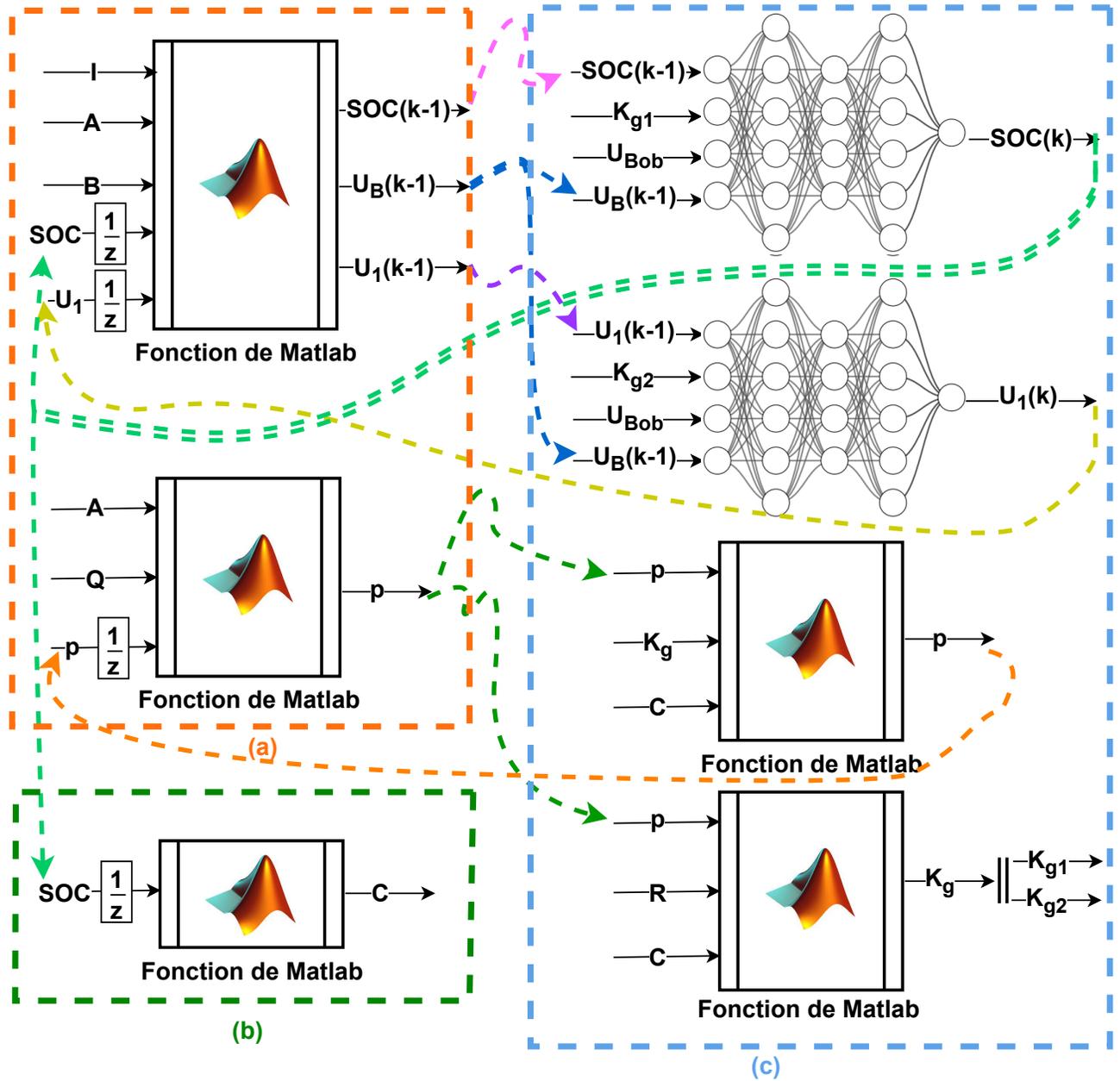


Figure 2.4: Processus de conception du modèle EKF-DNN, (a) étape de prédiction, (b) étape de linéarisation, (c) étape de mise à jour.

2.5 Résultats de simulation et analyse

Dans cette étude, une modélisation a été réalisée pour décharger une batterie lithium-ion de 1,5 Ah d'un état complètement chargé à 100 % à environ 10 %. En utilisant un courant variable, le processus de décharge a duré 12 000 secondes, ce qui équivaut à environ 3 heures et 20 minutes. Une estimation de l'état de charge est obtenue sur la base du modèle de circuit équivalent PNGV. En raison de la non-linéarité des éléments de ce circuit, le filtre de Kalman étendu a été utilisé. Pour faire face aux changements soudains et à la non-linéarité complexe, un réseau neuronal profond a également été utilisé, dans le but d'obtenir des résultats plus précis.

Le courant tiré de la batterie sert de signal d'entrée et varie dans une plage d'environ -0,55 A à 1,7 A, comme le montre la Fig. 2.5.

La tension aux bornes de la batterie est déterminée à l'aide du modèle proposé, Fig. 2.6. On observe que la tension diminue pendant le processus de décharge, passant de la tension la plus élevée de 4,2 V à la tension la plus basse de 3,3 V, à cause du courant tiré de la batterie.

Concernant l'état de charge, la Fig. 2.7 présente une comparaison entre la stratégie proposée et la méthode de comptage coulomb pour déterminer l'état de charge lors de la décharge avec un courant variable. On observe une très légère différence, qui pourrait démontrer l'exactitude de la stratégie proposée simulant le bruit de mesure et le bruit d'erreur du système. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité et la précision de la stratégie proposée.

L'erreur d'estimation de l'état de charge, comme le montre la Fig. 2.8, ne dépasse pas 1,59 %. Cela indique que le modèle et la stratégie proposés correspondent étroitement à la représentation exacte de la batterie lithium-ion. Il met en évidence la précision et l'efficacité de la stratégie proposée, en plus des réseaux de neurones bien conçus et bien entraînés.

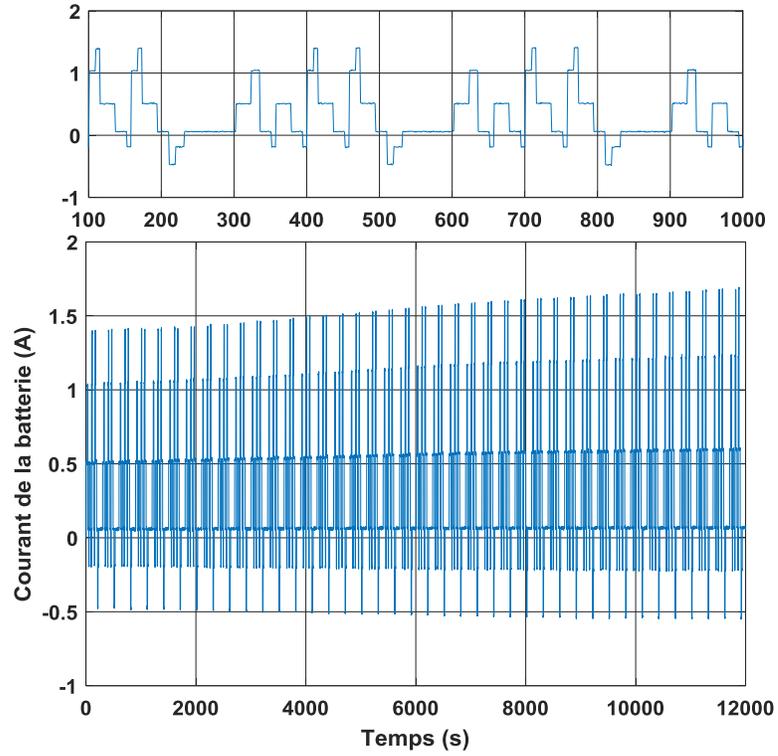


Figure 2.5: Courant de la batterie I_B .

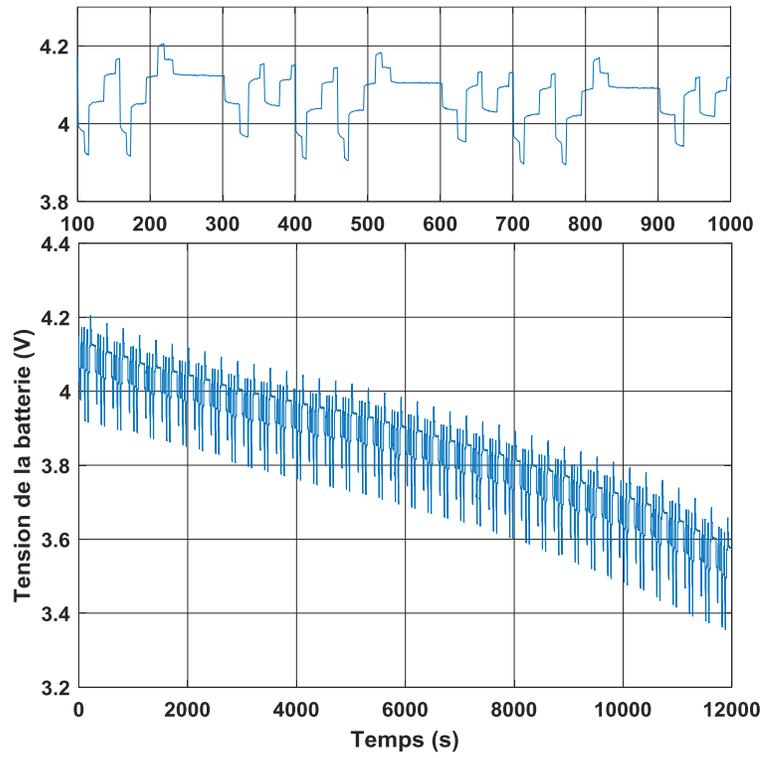


Figure 2.6: Tension de la batterie U_B .

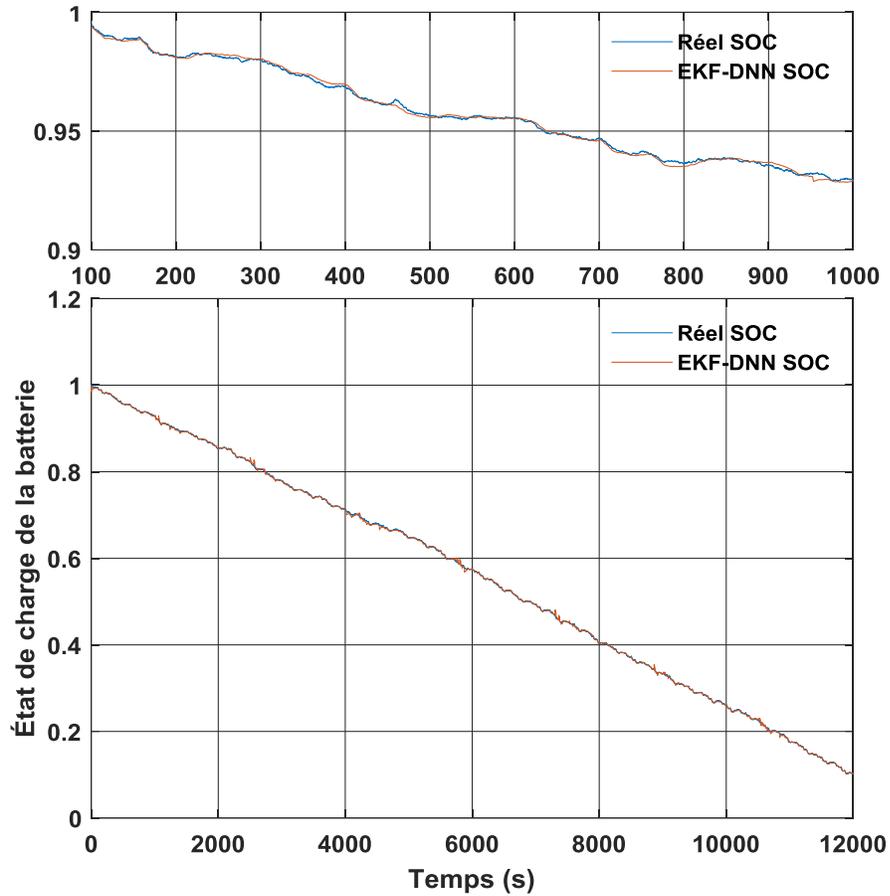


Figure 2.7: Comparaison entre l'EKF-DNN et la méthode de comptage coulomb pour déterminer l'état de charge.

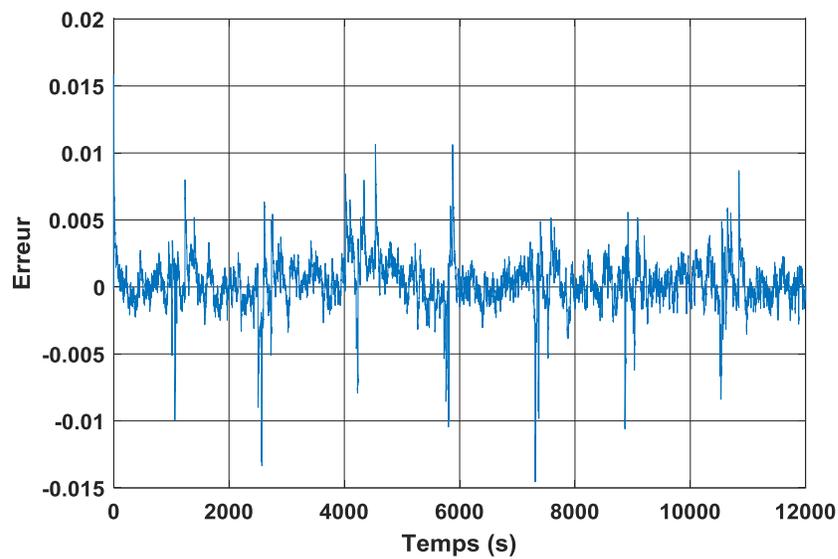


Figure 2.8: L'erreur d'état de charge.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une batterie lithium-ion a été étudiée et modélisée à l'aide d'un modèle PNGV, et l'état de charge a été estimé à l'aide d'une stratégie hybride combinant un filtre de Kalman étendu et un réseau neuronal artificiel profond. Cette stratégie implique trois étapes fondamentales : la prédiction, la linéarisation et la mise à jour.

Le principal défi abordé dans cette étude était d'améliorer la précision de l'estimation de l'état de charge. Des résultats positifs ont été obtenus en atténuant l'impact du bruit dans le processus et dans la mesure, ce qui a abouti à un taux d'erreur pour l'estimation de l'état de charge qui n'a pas dépassé 1,59 %.

Chapitre 3

Gestion d'énergie basé sur la logique floue de type 2

3.1 Introduction

La logique floue est une méthode d'intelligence artificielle et une branche de l'ingénierie chargée de créer et de développer des programmes informatiques basés sur le comportement humain et la nature de la pensée. Les règles de la logique floue ont été publiées pour la première fois en 1965 par le scientifique Lotfi Zadeh de l'Université de Californie [84].

Le concept d'ensembles flous du deuxième type a été développé par Lotfi Zadeh comme une amélioration du concept antérieur d'ensembles flous du premier type. Le deuxième type de logique floue représente une avancée importante dans la représentation et l'analyse de situations impliquant l'incertitude et la complexité du système [85].

Cette étude autour d'un système de stockage hybride composé d'une pile à combustible comme source principale et de batterie lithium-ion comme source auxiliaire. Ce mélange de sources améliore l'économie de carburant et offre d'excellentes performances. Un plan solide et utile a été élaboré pour gérer efficacement l'énergie dans ce système. Où, nous nous sommes appuyés sur la stratégie de logique floue du deuxième type, adaptée au traitement de systèmes présentant un niveau élevé de non-linéarité. Tout cela contribue à la stabilité et à la robustesse du système électrique du véhicule, tout en améliorant son efficacité.

3.2 Architecture du véhicule électrique

La chaîne de traction dans le système étudié, Fig. 3.1, se compose de plusieurs composants, représentés par une source d'énergie principale, qui est une pile à combustible connectée à un DC Bus via un convertisseur DC-DC Boost unidirectionnel. Cette source est utilisée pour répondre aux besoins en énergie de la charge à la demande. De plus, de batterie lithium-ion sert de source d'alimentation auxiliaire et est connectée au DC Bus via un convertisseur DC-DC Buck-Boost bidirectionnel. Enfin, un onduleur est connecté à l'arrière du DC Bus pour fournir de l'énergie électrique à la charge et récupérer une partie de l'énergie générée pendant le processus de freinage, par exemple pour charger la batterie. De plus, la logique floue de type 2 est utilisée pour répartir et gérer l'énergie entre les sources d'énergie, le moteur de traction et les services auxiliaires du véhicule.

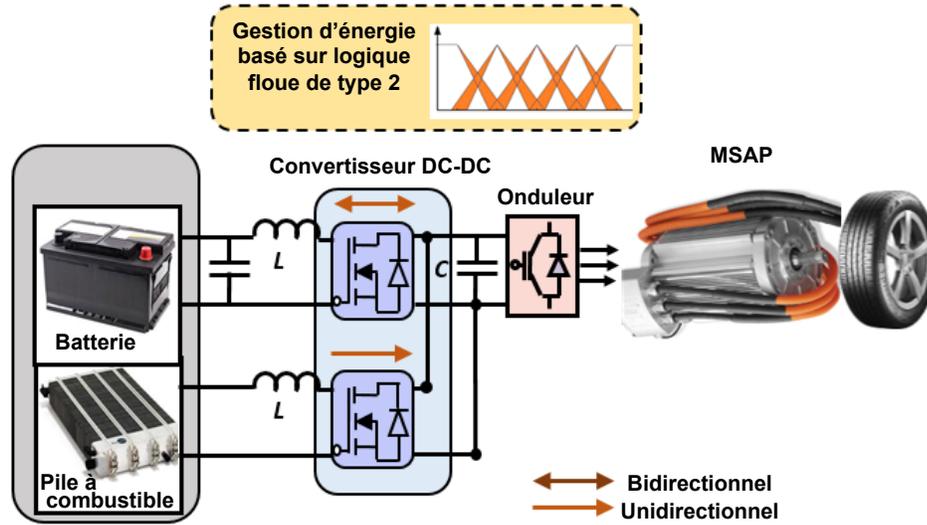


Figure 3.1: Architecture du système.

3.3 Modélisation et contrôle de convertisseur DC-DC de la pile à combustible

Étant donné que la tension de sortie de la pile à combustible n'est pas constante, car elle peut être influencée par le débit d'hydrogène et d'oxygène, la tension de sortie de la pile à combustible ne sera pas constante mais variera en fonction de l'entrée en hydrogène et de plusieurs autres facteurs externes. Ainsi, il n'est pas possible de connecter directement les charges à la sortie de la pile à combustible. Par conséquent, un processus de stabilisation

de la tension de sortie est nécessaire afin de pouvoir en bénéficier sous forme d'une tension électrique stable. C'est pourquoi il est nécessaire de connecter la sortie de la pile à combustible à un régulateur de tension. Le régulateur de tension est le circuit électronique qui maintient une tension de sortie constante indépendamment des variations de la tension d'entrée et du courant de charge.

Dans cette étude, un convertisseur élévateur de tension a été conçu, car la tension de sortie de la pile à combustible est nettement inférieure à la tension du DC Bus. L'objectif du contrôle est d'obtenir une tension constante en plus de favoriser l'économie de l'hydrogène. Le contrôle de la tension de sortie a été réalisé à l'aide d'un régulateur PI, où les composants électriques et électroniques ont été soigneusement sélectionnés pour améliorer l'efficacité de ce convertisseur, comme illustré dans la Fig. 3.2 [33].

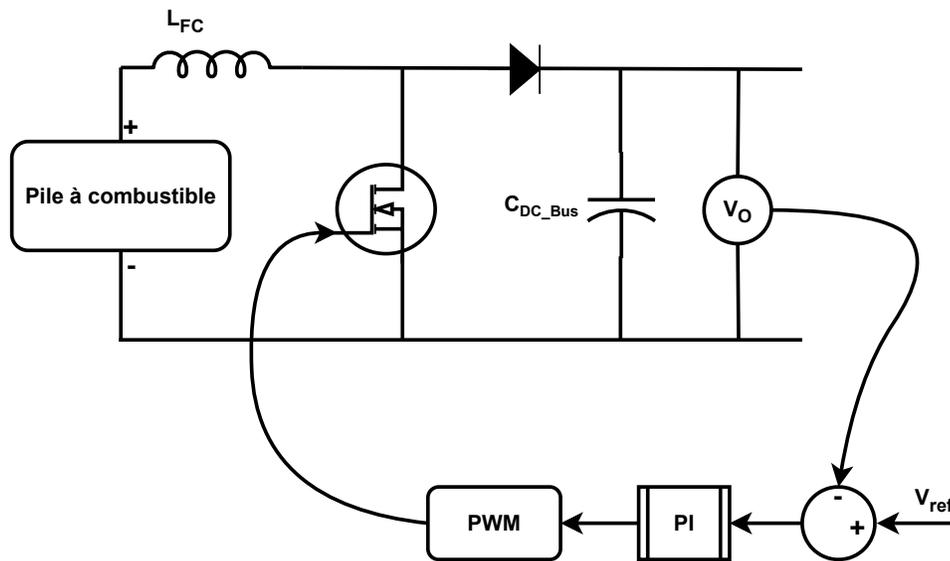


Figure 3.2: Modèle et contrôle du convertisseur de pile à combustible.

Ici, V_O la tension de sortie, V_{ref} la tension de référence, L_{FC} inductance de la pile à combustible, C_{DC_Bus} capacitance de DC Bus.

À l'heure actuelle, les convertisseurs associés aux piles à combustible pour les véhicules électriques ont été développés, et leur efficacité a été améliorée jusqu'à atteindre environ 97 %. Cette avancée a été annoncée par la société ARADDEX, comme le montre la Fig. 3.3. Afin de réduire les coûts, cette entreprise a choisi d'augmenter la tension jusqu'à 900 V, réduisant ainsi le courant et permettant la diminution de la taille des panneaux électroniques et du diamètre des câbles de connexion à haute capacité. Une autre caractéristique notable est l'augmentation de la fréquence de commutation jusqu'à 80 kHz, équilibrant ainsi les pertes de

commutation et de conduction pour obtenir une efficacité maximale. En améliorant l'efficacité du convertisseur, cela signifie que nous avons amélioré l'économie de l'hydrogène, un objectif toujours recherché dans les véhicules électriques. Cette entreprise envisage également un avenir où les piles à combustible évoluent avec des courants plus élevés, nécessitant des câbles de connexion plus épais pour être reliées aux convertisseurs. Cela conduit à l'intégration des convertisseurs avec les piles à combustible, contrôlés à un niveau élevé en utilisant des fréquences élevées pour produire des sons musicaux adaptés aux variations, comme l'a indiqué "Thomas Vetter" [86].

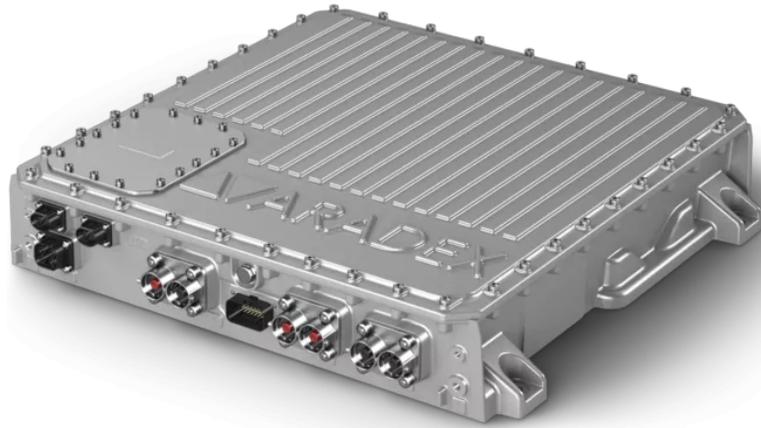


Figure 3.3: ARADEX Convertisseur de la pile à combustible.

3.4 Modélisation et contrôle de convertisseur DC-DC de la batterie

La batterie nécessite un convertisseur abaisseur de tension lors de la charge et un convertisseur élévateur de tension lors de la décharge. Dans cette étude, nous utiliserons un convertisseur abaisseur-élévateur de tension pour réguler les opérations de charge et de décharge. Le système composé de la batterie et du convertisseur bidirectionnel forme un système intelligent de génération d'énergie. Ce convertisseur dispose de deux modes de contrôle. Le signal de sélection du mode détermine les modes de contrôle appropriés pour le fonctionnement du convertisseur, surveillant continuellement la tension du DC Bus tout en vérifiant qu'elle ne dépasse pas la limite minimale de 240 V. Un examen de l'état de charge de la batterie est également requis, comme illustré dans le schéma de contrôle du convertisseur présenté dans la Fig. 3.4 [87, 88].

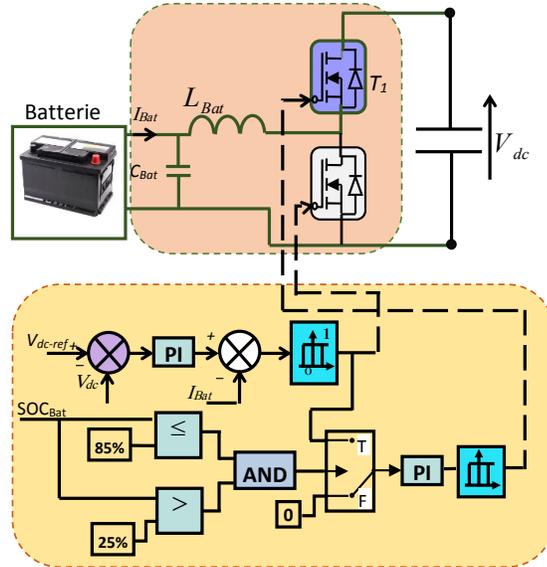


Figure 3.4: Contrôle de la batterie.

Ici, L_{Bat} inductance de la batterie, V_{dc} tension du DC Bus, V_{dc-ref} tension référence du DC Bus, I_{Bat} courant de la batterie, SOC_{Bat} état de charge de la batterie, C_{Bat} condensateur de la batterie.

3.5 Conception d'un système basé sur la logique floue de type 2

3.5.1 Structure de la logique floue de type 2

Le processus de prise de décision dans un système de la logique floue de type 2 est défini par cinq étapes principales, représentées dans la Fig. 3.5 [85] :

La fuzzification : cette étape constitue la différence principale et première entre les systèmes de la logique des deux types, le premier et le deuxième. Elle implique la conversion du signal numérique en variables linguistiques portant des valeurs basses et élevées pour les fonctions d'appartenance principale et secondaire. Chacune de ces fonctions peut prendre des valeurs entre 0 et 1, similaires à toute fonction d'appartenance du premier type. La fonction d'appartenance principale représente les valeurs maximales possibles pour l'ensemble d'incertitude du degré d'appartenance, tandis que la fonction d'appartenance secondaire représente les valeurs minimales de cette plage. L'intervalle entre les deux valeurs est appelé l'empreinte d'incertitude.

Évaluation des règles : elle englobe un ensemble de règles floues, où la partie résultante de ces règles peut contenir des fonctions d'appartenance du deuxième type ou des nombres constants.

Agrégation des sorties des règles : elle implique la réalisation d'opérations de la logique floue, telles que l'intersection, l'union et la négation, sur les sorties des règles floues, suivie de la prise de décision finale.

Type-Réducteur : il représente la deuxième différence fondamentale et convertit la sortie floue résultant du processus de prise de décision du deuxième type en une sortie du premier type. Il existe plusieurs méthodes pour réduire le type, et la détermination du centre de gravité pour chaque partie des parties du groupe flou résultant du deuxième type est l'une des méthodes les plus courantes.

Défuzzification : il s'agit de convertir la sortie floue après la réduction de son type en une sortie numérique finale en utilisant l'une des méthodes courantes, telles que le calcul du centre de gravité ou les méthodes basées sur la valeur maximale d'appartenance.

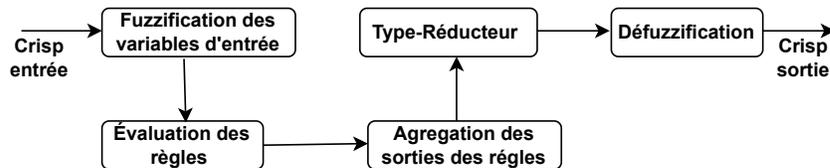


Figure 3.5: Topologie de l'algorithme de type 2 de la logique floue.

3.5.2 Créer des normes pour une stratégie de gestion de l'énergie à contrôle basée sur la logique floue de type 2

Le modèle de contrôleur flou de type 2 (Sugeno) est utilisé dans ce travail pour implémenter le contrôle flou du système de gestion de l'énergie. Cette approche est plus adaptable aux systèmes non linéaires, aux processus variables dans le temps, à l'hystérésis, et à d'autres processus complexes [89], car elle ne nécessite pas une représentation mathématique précise du système. L'état de charge de la batterie SOC_{Bat} et la puissance de charge pour le moteur P_{Load} sont les entrées du contrôleur flou, et la puissance de sortie de la pile à combustible P_{FC} est sa sortie.

Le système de la logique floue de la source d'énergie hybride utilisé dans cette étude a été conçu comme suit : en s'appuyant sur un contrôleur flou de type Sugeno. Les fonctions d'appartenance des entrées et des sorties ont été adoptées de manière trapézoïdale et triangulaire pour faciliter le processus de contrôle pendant le cycle de conduite. Assurer la

satisfaction des exigences en énergie est crucial tout au long de la conduite. L'amélioration de la plage de fonctionnement du système hybride à plusieurs sources d'énergie à travers ce système de gestion de l'énergie est nécessaire pour améliorer l'efficacité de la chaîne de traction et optimiser l'économie générale [90].

Afin de tirer pleinement parti de l'énergie stockée et absorbée par la batterie et d'augmenter sa durée de vie, il est nécessaire de maintenir le niveau de charge de la batterie SOC_{Bat} près de la valeur prévue. Il est essentiel de réduire la puissance de sortie de la pile à combustible P_{FC} lorsque le SOC_{Bat} est élevé et que P_{Load} est faible, et de l'augmenter lorsque le SOC_{Bat} est faible et que P_{Load} est élevée. Les règles de commande floues, élaborées en utilisant les idées susmentionnées ainsi que la littérature et l'expérience [91]. À des fins d'illustration, l'effet équivalent du centre de la région est utilisé dans la Fig. 3.6, montrant la relation entre les entrées et les sorties de ce système de gestion de l'énergie.

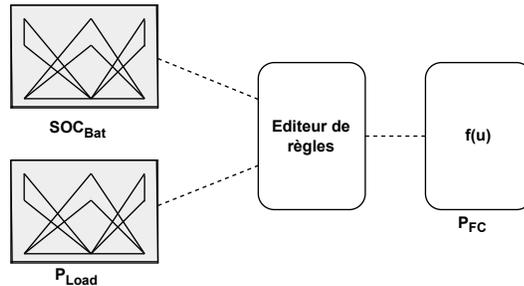


Figure 3.6: Structure finale du système de gestion de l'énergie.

La distribution de l'énergie entre la pile à combustible et la batterie peut être réalisée en utilisant l'approche actuelle de gestion de l'énergie avec le contrôle flou. La signification réelle de chaque entrée et sortie a été prise en compte, comme illustré dans les Fig. 3.7 et 3.8.

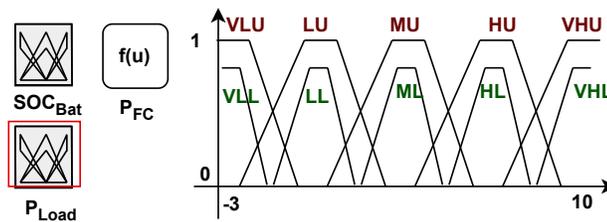
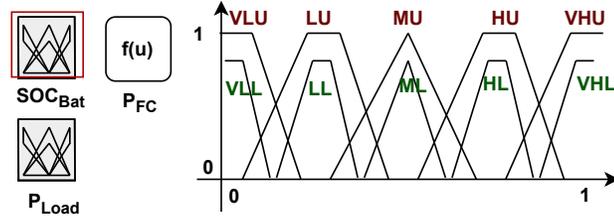


Figure 3.7: Membership function de l'entrée P_{Load} .


 Figure 3.8: Membership function de l'entrée SOC_{Bat} .

L'équation suivante définit la période de variation pour les quantités d'entrée et de sortie :

$$\begin{cases} SOC_{Bat} \in [0, 1] \\ P_{Load} \in [-3, 10] \\ P_{FC} \in [0, 10] \end{cases} \quad (3.1)$$

Dans un système de la logique floue de type 2, nous avons deux entrées : la puissance de charge et l'état de charge de la batterie, ainsi qu'une sortie, la puissance de la pile à combustible. La compréhension des variables linguistiques est présentée sous forme d'un ensemble de règles, indiquant au système ce que devrait être la sortie en fonction d'un ensemble de conditions. Les exemples suivants sont utilisés pour expliquer comment définir les règles floues en utilisant les libellés linguistiques disponibles dans le tableau 3.1.

Si SOC_{Bat} est élevé et que P_{Load} est faible, alors P_{FC} est moyen : une quantité d'énergie plus importante que nécessaire est fournie par la technologie de la pile à combustible. Le système de stockage est relativement chargé et peut également fournir une énergie supplémentaire pour répondre à la demande totale.

Si SOC_{Bat} est très bas et que P_{Load} est moyen, alors P_{FC} est élevé : les valeurs actuelles des quantités d'entrée et de sortie correspondent aux limites et aux références de courant, de couple et de vitesse. Par conséquent, il est nécessaire de garantir une fourniture supplémentaire d'énergie en utilisant la pile à combustible pour alimenter le moteur, les accessoires, et simultanément charger la batterie.

Tableau 3.1: Règles de gestion d'énergie du projet de véhicule électrique.

P_{FC}		SOC_{Bat}				
		VL	L	M	H	VH
P_{Load}	VL	M	M	L	L	VL
	L	H	H	M	M	L
	M	H	H	H	M	L
	H	VH	VH	H	H	M
	VH	VH	VH	H	H	H

3.5.3 Structure pour blocs de simulation

Pendant le déplacement du véhicule électrique, la pile à combustible et la batterie fournissent différents types d'énergie selon différentes stratégies de contrôle. La batterie peut fournir le couple demandé par le moteur au démarrage, ce qui aide la pile à combustible qui prend un certain temps pour se préparer [92]. Le moteur peut nécessiter une grande quantité de puissance instantanée dans certaines situations, telles que le stationnement en montée, et pour d'autres raisons.

La Fig. 3.9 présente l'algorithme intégré dans le modèle de simulation, composé de la règle de limitation de puissance ainsi que de toutes les sécurités. Tant que les batteries n'ont pas atteint un niveau minimum de décharge ou une limite maximale de tension de charge, le courant de la batterie sera limité entre 0 A et la valeur limite. Le rechargement des batteries se fait à l'aide à la fois de la charge autonome et du freinage électrique [93].

Le but principal de l'approche de gestion de l'énergie de la batterie est de surveiller la production d'énergie de la batterie et de maintenir l'état de charge de la batterie entre la valeur minimale et maximale afin de garantir une amélioration de l'efficacité de charge.

La technologie limite la production d'énergie de la pile à combustible dans une plage spécifique et ajuste la sortie d'énergie pour répondre à la demande du moteur, contribuant ainsi à réduire la consommation d'énergie [94]. La décision de faire fonctionner ou arrêter la pile à combustible dépend de l'état de charge de la batterie et des besoins énergétiques de la charge, permettant ainsi à la batterie de fonctionner à son rendement optimal pendant une période prolongée.

Le système bien conçu comprend également plusieurs boucles de contrôle basées sur un régulateur PI classique et direct, telles que la boucle de régulation du courant du moteur, le couple de sortie, et les courants émis par les sources, en plus de notre méthode de gestion.

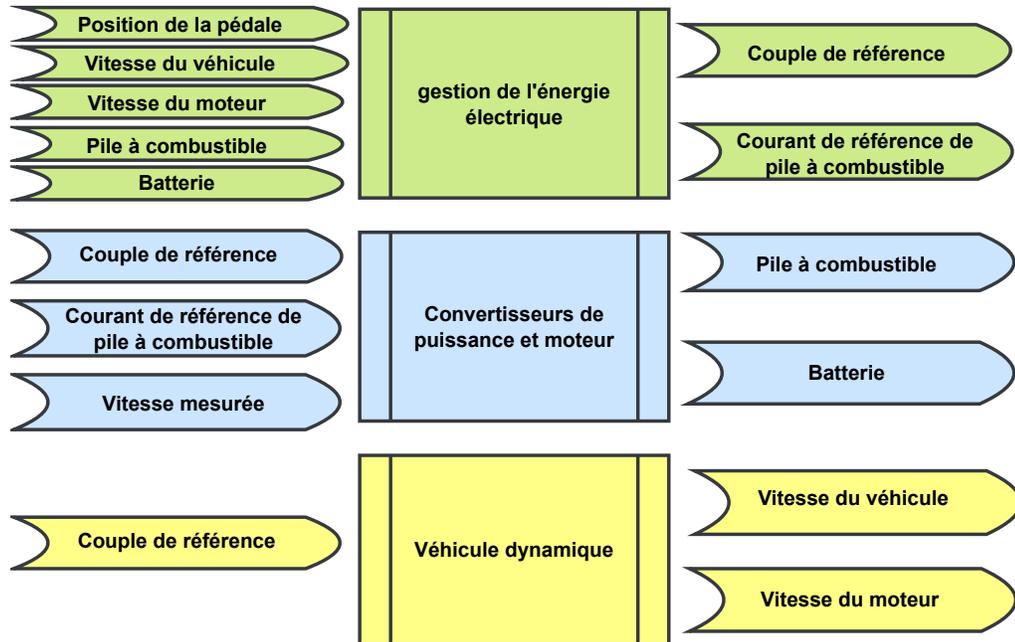


Figure 3.9: Schéma du Système global de gestion de l'énergie hybride.

3.5.4 Gestion d'énergie

Avec l'émergence de véhicules électriques dotés de sources d'énergie hybrides étendues, les systèmes de gestion de l'énergie sont considérés comme les meilleurs algorithmes artificiels jamais développés. Ces systèmes comprennent des outils de mesure et de collecte de données ainsi que des ordinateurs compatibles, et ils reposent sur des techniques de gestion avancées pour créer un système intelligent à auto-contrôle [95].

Pour répondre aux exigences de haute performance dans tous les aspects, la gestion de l'énergie est d'une grande importance dans le véhicule intelligent. D'une part, avec l'augmentation du taux de diffusion des véhicules électriques, la consommation d'énergie dispatchable sera relativement moindre [96].

Afin de réaliser l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie sur une période donnée entre l'énergie disponible et l'énergie demandée par le véhicule, des méthodes efficaces de programmation de l'énergie générée doivent être conçues pour permettre l'intégration des sources d'énergie disponibles. D'autre part, les charges variées et contrôlables interagiront avec le véhicule électrique par le biais du système intelligent, constituant ainsi un lien essentiel pour assurer l'équilibre en temps réel [97]. La gestion de l'énergie dans le véhicule intelligent comprend l'optimisation de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie en coordonnant les diverses unités contrôlables du véhicule électrique grâce à des logiciels de communication efficaces

et des techniques de gestion avancées pour garantir le fonctionnement sûr, stable, fiable et efficace de l'ensemble du véhicule électrique [98]. L'organigramme pour la gestion de l'énergie est présenté dans la Fig. 3.10. Certaines contraintes logiques se combinent avec la logique floue de type 2 dans ce schéma, formant une stratégie de gestion intégrée pour déterminer le mode de commutation entre la batterie et la pile à combustible [99].

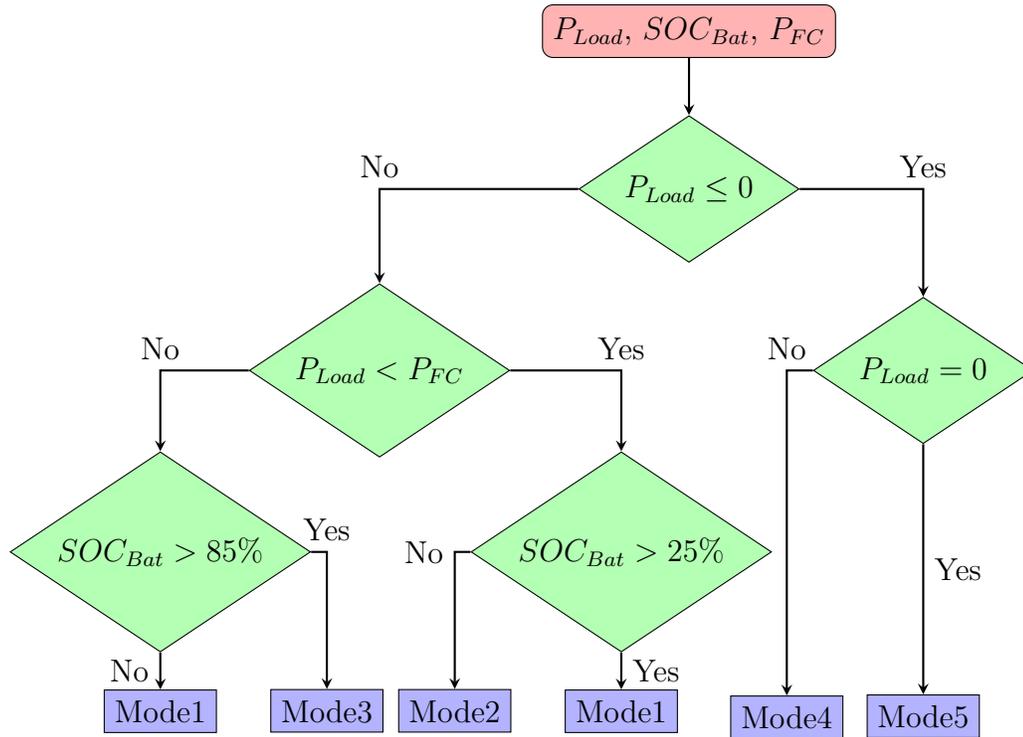


Figure 3.10: L'organigramme de la procédure de la logique floue de type 2.

3.6 Stratégie de gestion de l'énergie par la logique floue de type 2

L'approche de la gestion de l'énergie est essentielle pour maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'énergie des composants de la transmission, tout en conservant une quantité appropriée d'énergie dans les dispositifs de stockage. La seule manière de réduire efficacement la consommation d'énergie sans compromettre les performances du véhicule est d'adopter une technologie de contrôle efficace [100, 101].

Le système utilisé dans cette étude. Il y a deux sources d'énergie dans ce système : une source principale (la pile à combustible) et une source secondaire (la batterie). En conclusion, l'amélioration de l'allocation de l'énergie entre le moteur du véhicule et les services auxiliaires

pendant le fonctionnement, et d'autre part, ne pas négliger le niveau de charge de la batterie, constituent les premières étapes pour atteindre une gestion optimale de l'énergie [102].

Dans cette étude, cinq modes de fonctionnement du véhicule ont été adoptés en conformité avec la configuration hybride sélectionnée.

Le mode 1 : pendant ce mode, le moteur fonctionne à pleine puissance lors de l'accélération ou de la conduite en montée, car la demande en énergie est maximale. Les interrupteurs T1 et T2 sont tous deux éteints. La diode du corps de l'interrupteur supérieur T1 commence à conduire, comme illustré dans la Fig. 3.11. Dans cette situation, à la fois la batterie et la pile à combustible fournissent de l'énergie au moteur. Il convient de noter que ce mode nécessite une batterie entièrement chargée et un réservoir d'hydrogène plein [103]. Ce scénario, selon l'équation suivante :

$$P_{Load} = P_{Bat} + P_{FC} \quad (3.2)$$

Le mode 2 : vitesse moyenne. Dans cette situation, la pile à combustible joue deux rôles en fonction de la puissance requise. Le premier rôle assure la distribution de l'énergie au moteur, tandis que le deuxième rôle consiste à charger la batterie si l'état de charge est inférieur à 25 % [104]. Comme illustré dans la Fig. 3.12, et basé sur l'équation suivante :

$$P_{FC} = P_{Load} + P_{Bat} \quad (3.3)$$

Le mode 3 : mode de faible génération d'énergie illustré dans la Fig. 3.13. À ce cas, la batterie est le dispositif de stockage chargé d'alimenter le moteur en énergie [105]. Le niveau de charge de la batterie doit être supérieur à 85 % afin d'assurer l'énergie de traction ainsi que l'énergie des services auxiliaires du véhicule. Le moteur reçoit la tension de sortie du convertisseur. Comme ce convertisseur fonctionne en mode élévation de tension, il a la capacité d'augmenter la tension de la batterie pour entraîner le moteur vers l'avant.

$$P_{Load} = P_{Bat} \quad (3.4)$$

Le mode 4 : le freinage régénératif illustré dans la Fig. 3.14, où la batterie absorbe l'énergie provenant du moteur, qui agit dans ce cas comme un générateur [106]. Les deux diodes sont polarisées en sens inverse et le commutateur supérieur T1 est activé tandis que le commutateur inférieur T2 est désactivé. Le convertisseur fonctionne en mode abaisseur de tension pendant cette période.

$$P_{Load} = -P_{Bat} \quad (3.5)$$

Le mode 5 : ce mode correspond à l'arrêt du système où les deux sources hybrides sont disponibles pour l'inspection de maintenance et la régénération. La batterie peut être connectée à un chargeur d'énergie et même à d'autres modes de fonctionnement tels que le mode V2G (véhicule vers le réseau), où la batterie peut jouer un double rôle en effectuant des opérations de charge et de décharge. Tandis que la pile à combustible peut obtenir sa régénération en chargeant le réservoir avec de l'hydrogène [107], comme illustré dans la Fig. 3.15.

$$P_{Load} = 0 \quad (3.6)$$

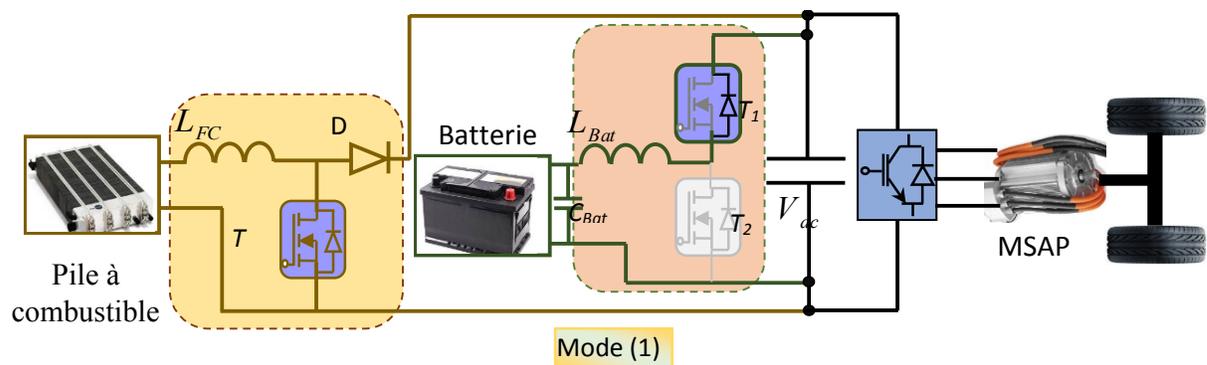


Figure 3.11: Mode (1) de la stratégie de gestion de l'énergie.

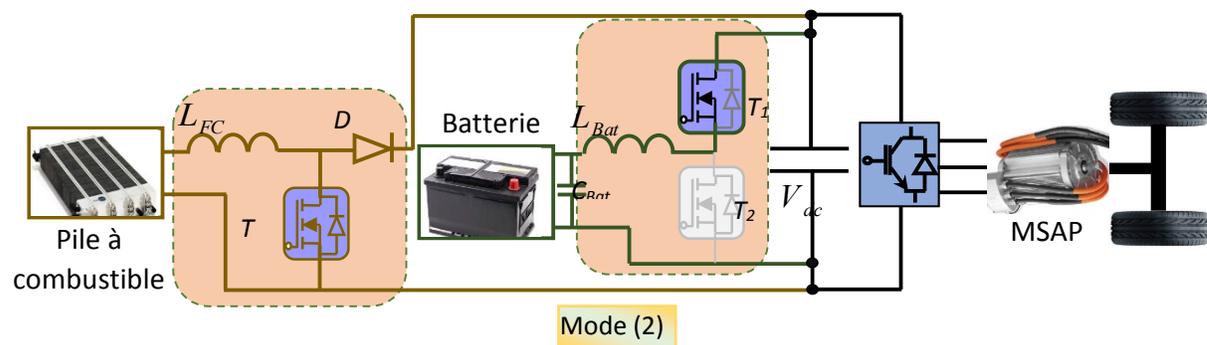


Figure 3.12: Mode (2) de la stratégie de gestion de l'énergie.

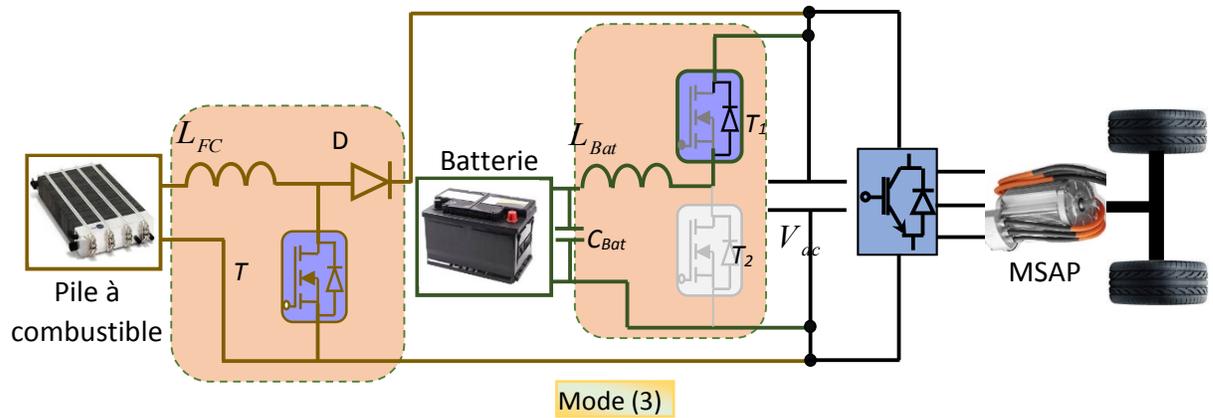


Figure 3.13: Mode (3) de la stratégie de gestion de l'énergie.

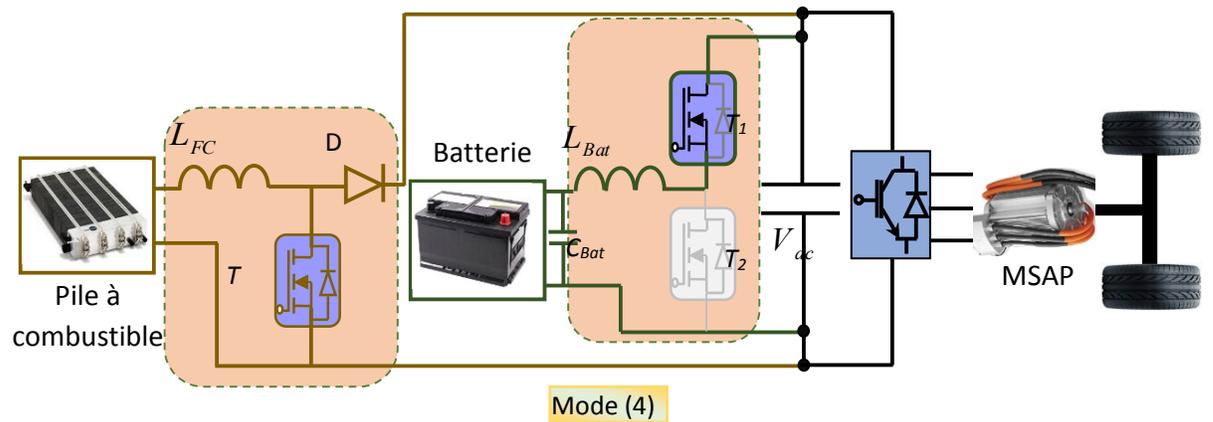


Figure 3.14: Mode (4) de la stratégie de gestion de l'énergie.

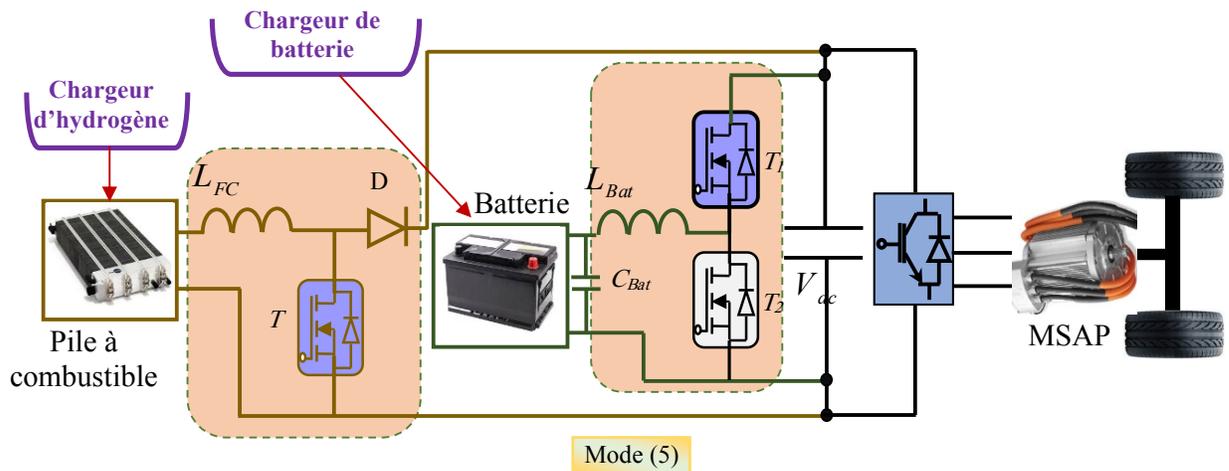


Figure 3.15: Mode (5) de la stratégie de gestion de l'énergie.

3.7 Résultats de simulation et analyse

Le modèle proposé a été validé dans différentes conditions de fonctionnement liées à l'état du véhicule et aux caractéristiques du système hybride. Des outils de MATLAB/Simulink ont été utilisés pour simuler le modèle du véhicule électrique. En conséquence, cette section présente et examine les résultats obtenus en utilisant les modèles suggérés. Nous nous concentrons sur l'efficacité du contrôle de puissance et la gestion du système, ainsi que sur la vitesse du véhicule électrique.

Les caractéristiques du moteur du véhicule électrique sont illustrées dans la Fig. 3.16, où la Fig. 3.16a montre le courant triphasé du stator, la Fig. 3.16b présente le couple électromagnétique généré par le moteur, et la Fig. 3.16c présente la vitesse du moteur au cours de divers cycles de conduite. Ces situations représentent un cycle de conduite typique pour un véhicule urbain. Afin de surveiller la réaction des sources hybrides aux changements de vitesse, cette approche prend en considération l'accélération, la décélération et le freinage.

La Fig. 3.17 montre la tension et le courant de la pile à combustible et de la batterie à la sortie des convertisseurs. Il est essentiel de se rappeler que lors du freinage, l'augmentation de l'énergie récupérée devient difficile à contrôler, ce qui entraîne une élévation de la tension de la batterie au-delà des limites prédéfinies. Cela pose des défis pour la rapidité de la régulation. Il est donc crucial de prendre en compte les limites de récupération d'énergie afin d'éviter une surcharge de la batterie.

Dans la Fig. 3.18a, la tension du DC Bus est maintenue à environ 240 V. La gestion de l'énergie dans les véhicules à stockage hybride repose sur des normes multiples, où chaque technique est choisie en fonction de variables spécifiques. Par exemple, la gestion de l'énergie peut utiliser la durée de vie réelle des sources d'énergie pour maximiser leur rendement ou réduire le cycle de travail de la batterie. De plus, l'algorithme de gestion est dimensionné et validé sur divers cycles de conduite. Dans la Fig. 3.18b, le courant du DC Bus est illustré. En comparant la réaction du courant du DC Bus à la puissance instantanée du moteur, nous pouvons voir que le courant se comporte de manière similaire à la puissance de charge.

La Fig. 3.19 indique que l'état de charge de la batterie reste dans la plage considérée comme représentative d'une performance excellente et évolue de manière appropriée aux cycles de conduite suggérés.

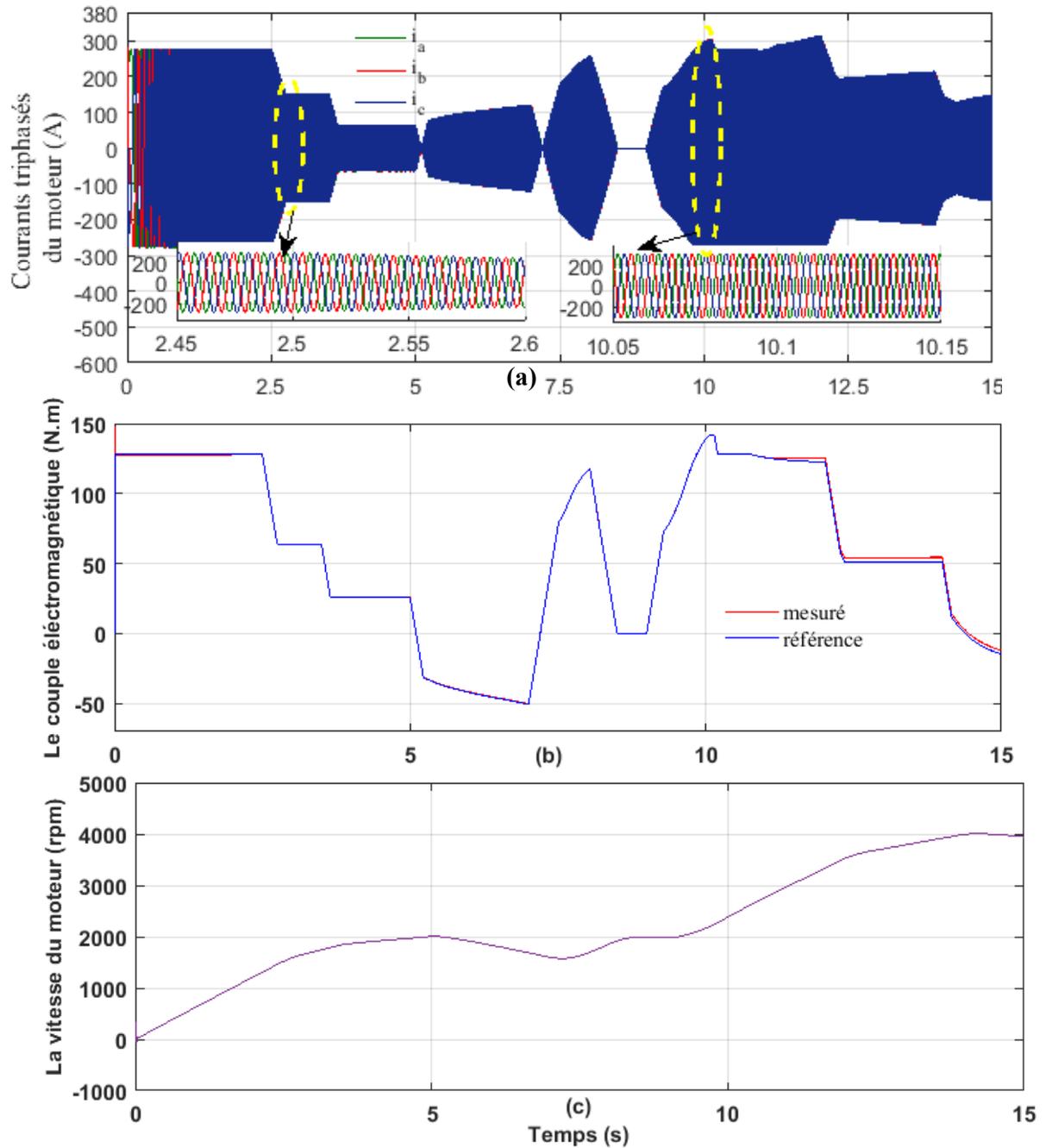


Figure 3.16: Caractéristiques du moteur, (a) courants du stator du moteur, (b) Couple électromagnétique développé par le moteur, (c) vitesse mécanique du moteur.

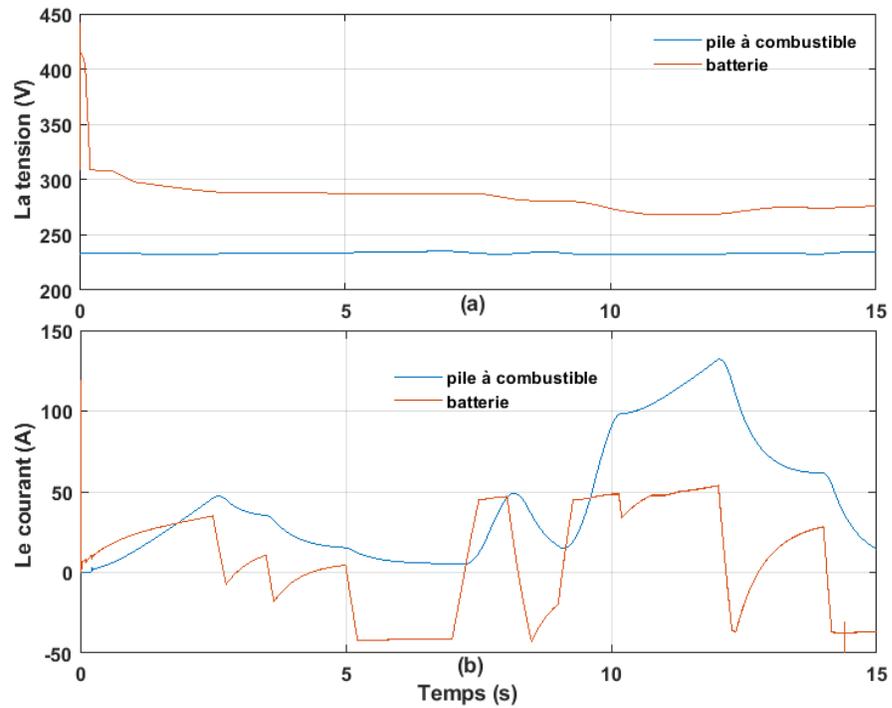


Figure 3.17: Caractéristiques électriques des sources hybrides, (a) tension de la : pile à combustible, batterie (b) courant de la : pile à combustible, batterie.

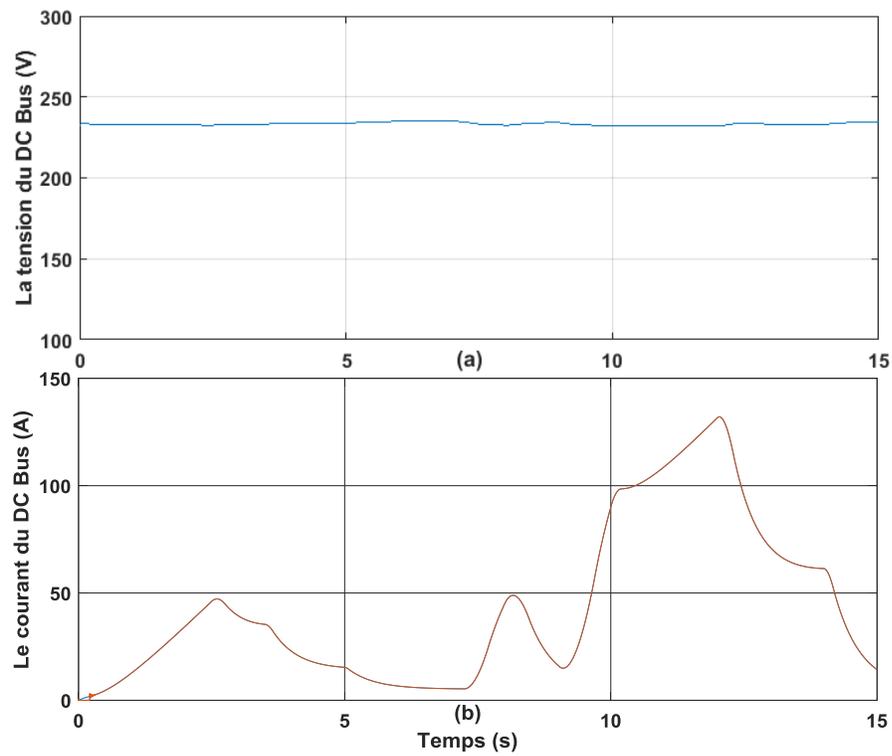


Figure 3.18: Caractéristiques du DC Bus, (a) tension, (b) courant.

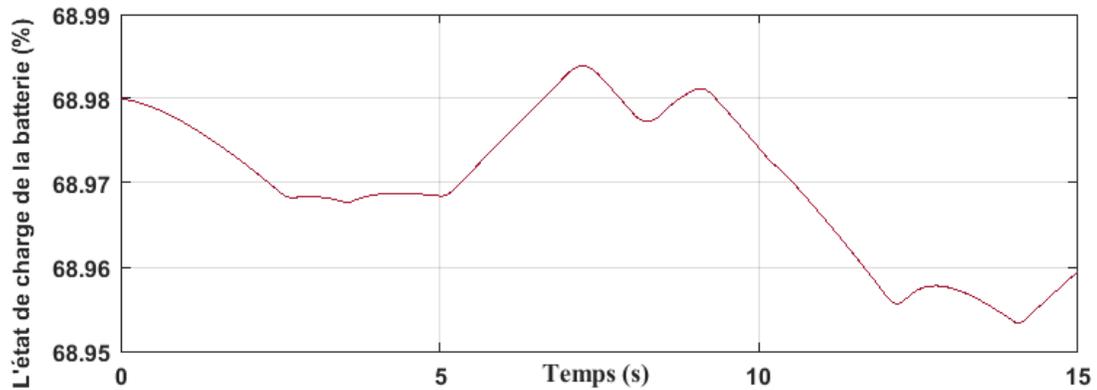


Figure 3.19: État de charge de la batterie.

La Fig. 3.20 illustre la puissance de charge, composée de la puissance du moteur de traction électrique ainsi que de la puissance de tous les dispositifs auxiliaires du véhicule, de la puissance de la batterie et de la puissance de la pile à combustible. Cette figure montre également comment le véhicule freine lorsque la charge est négative même si la puissance de sortie de la pile à combustible ne peut pas être négative. La puissance pour la charge est fournie par une source d'énergie hybride (pile à combustible/batterie). Comme prévu, la batterie est le premier composant à réagir à un changement de la puissance de charge. En cas de légères variations de vitesse, la puissance de sortie de la batterie reste à des niveaux bas. La contribution de la pile à combustible est plus nécessaire pendant l'accélération ou le freinage. La fréquence de la pile à combustible est extrêmement basse. Afin de charger le système de stockage et de garantir la conduite en cas d'une demande de puissance élevée, la pile à combustible augmente sa production. À la fin du cycle, lorsque le véhicule est à l'arrêt, la contribution du système de gestion de l'énergie à l'équilibre de la puissance, même si la puissance de référence et la puissance délivrée présentent un retard de contrôle. La simplicité de conception et la facilité d'application en temps réel sont des avantages de cet algorithme. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de l'algorithme utilisé dans diverses conditions de fonctionnement.

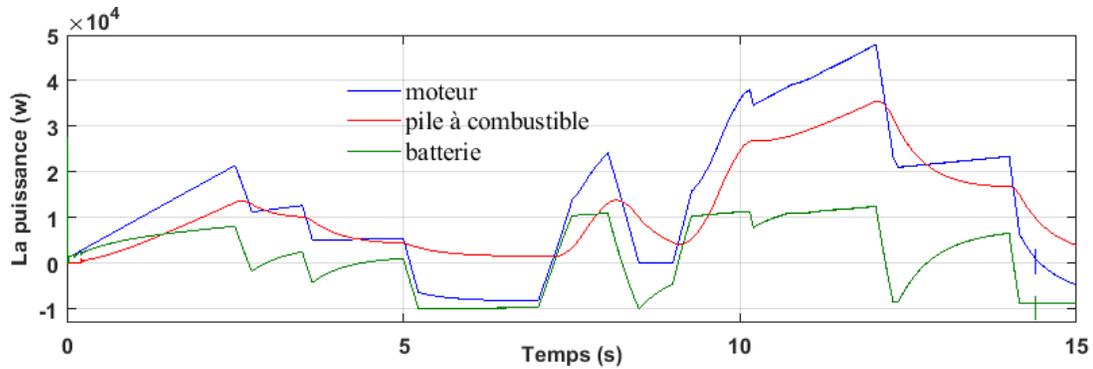


Figure 3.20: La puissance de : pile à combustible, batterie et la charge demandée.

3.8 Conclusion

Cette étude se concentre sur le développement d'un système intelligent de gestion de l'énergie basé sur un contrôleur basé sur la logique floue de type 2 pour un véhicule électrique équipé d'une pile à combustible et d'une batterie. En raison de l'adoption de cette approche basée sur des variables linguistiques, le système évite le besoin de modèles mathématiques, le rendant facilement compréhensible pour les utilisateurs. De plus, il peut être mis en œuvre facilement en temps réel sur une plateforme d'essai pour les véhicules électriques expérimentaux.

En raison de la possibilité de charger la batterie de manière continue pendant les cycles de conduite ou lors du freinage électrique, une stratégie de contrôle logique flou de type 2 est utilisée pour coordonner le fonctionnement des sources d'énergie en fonction de la demande. La batterie peut fournir une puissance adéquate au moteur lors du démarrage, et après une brève période, la pile à combustible entre en fonctionnement et recharge la batterie. La pile à combustible peut agir comme source principale pour satisfaire les besoins énergétiques et peut recharger la batterie, considérées comme une source secondaire.

L'objectif principal du système de gestion de l'énergie conçu est de réduire les variations de l'état de charge de la batterie, dans le but de prolonger la durée de vie de la batterie et de minimiser les pertes d'énergie dans les composants. L'unité de contrôle de l'énergie s'assure que les signaux de la pédale de frein et de la pédale d'accélérateur du conducteur sont satisfaisants en permanence, tout en garantissant que la batterie reste suffisamment chargée tout au long des cycles de conduite. De plus, elle vise à améliorer l'efficacité de la consommation d'énergie pour le véhicule électrique.

Les stratégies de gestion de l'énergie pour les véhicules électriques équipés de piles à combustible et de batteries montrent des performances supérieures en utilisant la stratégie

de la logique floue de type 2. La technologie proposée peut être appliquée à un modèle réel, et le travail effectué dans cette étude ouvre de nouvelles perspectives pour les futures recherches, notamment celles liées au développement de stratégies diverses pour un algorithme d'apprentissage renforcé en temps réel, qui choisit des actions appropriées pour les paramètres du véhicule à chaque instant afin d'améliorer l'expérience de conduite et le confort.

Chapitre 4

Gestion d'énergie basée sur le réseau de neurones

4.1 Introduction

Les réseaux neuronaux font partie des études en intelligence artificielle dans le domaine de l'informatique, et ils sont utilisés dans des applications telles que le contrôle des systèmes électriques à données massives, les modèles complexes et non linéaires à haute variabilité temporelle. Cette stratégie est considérée comme appropriée pour de tels systèmes en raison de sa robustesse, de la qualité de ses résultats et de sa facilité d'application, même sans une connaissance précise du modèle du système utilisé [79].

Cette étude porte sur un système de stockage hybride qui repose sur une pile à combustible comme source principale, en plus d'une batterie au lithium-ion et d'un supercondensateur comme sources auxiliaires. Cet équilibre entre les sources permet d'améliorer l'économie d'utilisation du carburant et d'atteindre d'excellentes performances. Afin de gérer efficacement l'énergie dans ce système, une stratégie forte et efficace est nécessaire. Pour ce faire, un réseau neuronal artificiel a été entraîné, adapté pour traiter des systèmes fortement non linéaires. Cette stratégie a été conçue pour contribuer à deux aspects importants : économie d'énergie dans la consommation de la pile à combustible en tant qu'élément clé de cette stratégie, répondant aux besoins de charge avec la plus faible quantité d'énergie possible de la pile à combustible. De plus, elle vise à assurer la stabilité et la constance de la tension du DC Bus. La stabilité de cette tension est cruciale dans la conduite du véhicule électrique, où une tension stable de 270 V a été maintenue. Tout cela vise à soutenir la stabilité et la robustesse du système du véhicule électrique, en plus d'augmenter son rendement.

4.2 Architecture du véhicule électrique

La chaîne de traction du système étudié se compose de plusieurs composants, Fig. 4.1. Comprenant une source principale d'énergie, une pile à combustible connectée au DC Bus via un convertisseur boost unidirectionnel. Cette source est utilisée pour répondre aux besoins en énergie de la charge selon la demande. En outre, une batterie lithium-ion est utilisée comme source d'énergie auxiliaire, connectée au DC Bus via un convertisseur back-boost bidirectionnel. Cette source est utilisée pour maintenir la stabilité de la tension du DC Bus pendant les opérations de charge et de décharge. De plus, un supercondensateur est utilisé comme une troisième source d'énergie auxiliaire, directement connecté au DC Bus. Ce supercondensateur est utilisé pour gérer les hautes fréquences et fournir une partie de l'énergie requise par la charge. Enfin, l'onduleur est connecté à l'arrière du DC Bus pour fournir de l'énergie à la charge et récupérer une partie de l'énergie générée lors du freinage pour charger le supercondensateur et la batterie [10, 13, 31, 108].

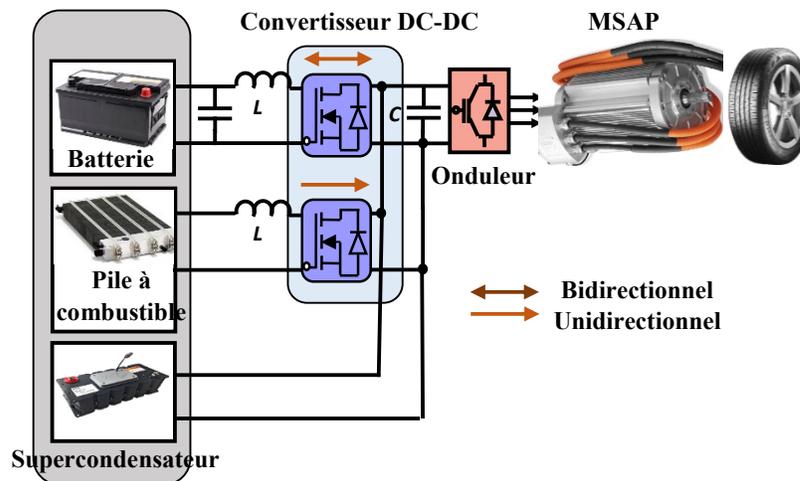


Figure 4.1: Architecture du système.

4.3 Modélisation et contrôle de convertisseur DC-DC de la pile à combustible et de la batterie

La pile à combustible et la batterie au lithium-ion sont connectées au DC Bus via des convertisseurs DC-DC pour contrôler la tension de sortie et le courant de l'inductance. Le système de pile à combustible comprend un convertisseur boost qui permet d'augmenter la tension de sortie de la pile à combustible. Le système de batterie au lithium-ion comprend deux con-

vertisseurs. Le premier est un convertisseur boost, utilisé pendant le processus de décharge pour augmenter la tension de la batterie. Le deuxième est un convertisseur buck, utilisé pendant le processus de charge pour réduire la tension de la batterie. Ce système a été conçu avec un circuit équivalent pour des modèles de valeurs moyennes, afin de réduire le temps de simulation sans affecter complètement la dynamique du système [31].

Nous pouvons exprimer la tension de sortie et le courant de l'inductance pour des convertisseurs élévateur et abaisseur de tension [31, 109, 110] :

$$\begin{cases} V_{OBoost} = \frac{V_{IBoost}}{1-D} \\ I_{IBoost} = \frac{I_{OBoost}}{\eta_{Boost}(1-D)} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} V_{OBuck} = D \times V_{IBuck} \\ I_{IBuck} = \frac{D \times I_{OBuck}}{\eta_{Buck}} \end{cases} \quad (4.2)$$

On peut exprimer la variation de la tension de sortie et la variation du courant de l'inductance pour des convertisseurs élévateur et abaisseur de tension [31, 111] :

$$\begin{cases} \frac{dV_{OBoost}}{dt} = \frac{\eta_{Boost}(1-D)I_{IBoost} - I_{OBoost}}{C} \\ \frac{dI_{IBoost}}{dt} = \frac{V_{IBoost} - (1-D)V_{OBoost}}{L} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \frac{dV_{OBuck}}{dt} = \frac{I_{OBuck} - \left(\frac{\eta_{Buck}}{D}\right)I_{IBuck}}{C} \\ \frac{dI_{OBuck}}{dt} = \frac{D \times V_{IBuck} - V_{OBuck}}{L} \end{cases} \quad (4.4)$$

En appliquant la transformée de Laplace et en effectuant quelques manipulations, nous pouvons écrire la tension de sortie et le courant de l'inductance :

$$\begin{cases} V_{OBoost}(s) = \frac{\eta_{Boost} \times \left(\frac{V_{IBoost}}{V_{OBoost}}\right) - I_{OBoost}}{Cs} \\ I_{IBoost}(s) = \frac{V_{IBoost} - (1-D)V_{OBoost}}{Ls} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} V_{OBuck}(s) = \frac{I_{OBuck} - \eta_{Buck} \times \left(\frac{V_{IBuck}}{V_{OBuck}}\right) \times I_{IBuck}}{Cs} \\ I_{OBuck}(s) = \frac{D \times V_{IBuck} - V_{OBuck}}{Ls} \end{cases} \quad (4.6)$$

Ce système a été conçu avec deux boucles de commande travaillant ensemble pour atteindre une performance excellente. La boucle externe est responsable du réglage de la tension de sortie et du contrôle du niveau de tension de sortie afin d'assurer un fonctionnement stable. La boucle interne ajuste efficacement le courant de l'inductance, améliorant ainsi l'efficacité du système et protégeant les composants contre les dommages. Ces boucles de contrôle double garantissent une performance excellente et une stabilité globale du système. Ces deux

boucles bénéficient d'avantages distincts, travaillant en parfaite harmonie pour contrôler le système et assurer son rendement optimal dans diverses conditions, Fig. 4.2. Toutes les valeurs de ce convertisseur ont été répertoriées dans le tableau 4.1.

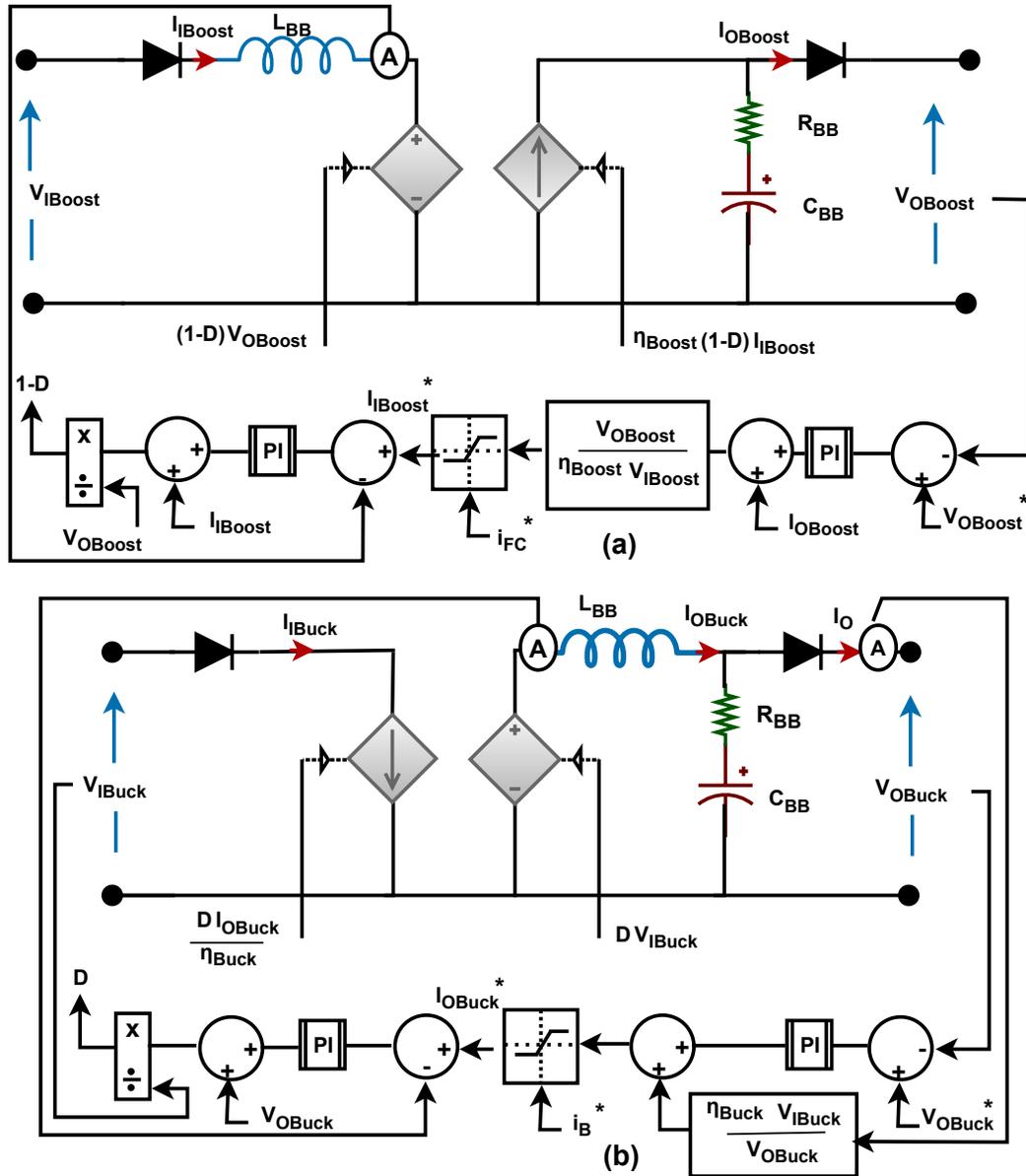


Figure 4.2: Contrôle du DC-DC, (a) convertisseur Boost, (b) convertisseur Buck.

Tableau 4.1: Paramètres des convertisseurs DC-DC.

Paramètres	Symboles et valeurs
Tension de sortie de : convertisseur boost, buck	V_{OBoost}, V_{OBuck}
Tension d'entrée de : convertisseur boost, buck	V_{IBoost}, V_{IBuck}
Tension de référence de sortie de : convertisseur boost, buck	$V_{OBoost}^*, V_{OBuck}^*$
Courant d'inductance de : convertisseur boost, buck	I_{IBoost}, I_{OBuck}
Courant de : sortie boost, entrée buck, sortie convertisseur buck	$I_{OBoost}, I_{IBuck}, I_O$
Cycle de service, courant de référence d'inductance de : boost, convertisseur buck	$D, I_{IBoost}^*, I_{OBuck}^*$
Efficacité de : boost (pile à combustible, batterie), convertisseur buck	$\eta_{Boost} = (90, 88), \eta_{Buck} = 88\%$
Résistance, inductance (boost, buck) et condensateur des convertisseurs	$R_{BB} = 0.01\Omega, C_{BB} = 800\mu F$ $L_{BB} = (0.1, 10 mH)$
Courant de référence du système de gestion de l'énergie de : pile à combustible, batterie	i_{FC}^*, i_B^*

4.4 Stratégie de gestion de l'énergie

Dans cette étude, l'accent est mis sur la stratégie proposée visant à atteindre des objectifs multiples. Cela inclut l'économie de la consommation d'énergie de la pile à combustible en contrôlant le courant de sortie, ainsi que la réalisation de la stabilité de la tension du DC Bus en contrôlant le courant de la batterie. De plus, la recherche vise à assurer la stabilité et la sécurité de la batterie et du supercondensateur, prolongeant ainsi leur durée de vie présumée.

Il est nécessaire de mener une étude expérimentale sur la gestion de l'énergie dans les véhicules électriques en utilisant des réseaux de neurones artificiels et en sélectionnant les composants appropriés, puis de concevoir et de mettre en œuvre le système de manière étanche. Ensuite, le système doit être testé dans différentes conditions de fonctionnement afin d'évaluer sa performance et son efficacité [79].

Une stratégie de contrôle du système de gestion d'énergie hybride a été conçue dans ce travail, composée d'une pile à combustible en tant que principale source d'énergie. L'économie dans l'utilisation de cette énergie a été considérée comme cruciale, et cela a été réalisé en

contrôlant le courant de la pile à combustible en fonction de la demande de charge. La deuxième source auxiliaire, une batterie lithium-ion, contribue à maintenir la stabilité de la tension du DC Bus en contrôlant précisément le processus de charge de la batterie lorsque cette tension dépasse 270 V et sa décharge lorsque la tension est inférieure à 270 V, Fig. 4.3 [112]. La troisième source auxiliaire, le supercondensateur, exploite ses caractéristiques distinctives telles que la réponse rapide aux demandes d'énergie à des fréquences élevées, et ajuste et distribue l'énergie entre la charge et les éléments de stockage. Il fournit de l'énergie supplémentaire en cas de besoin et stocke l'énergie lorsqu'elle est récupérée de la charge. De plus, il compense toute erreur dans la détermination de la puissance pour la charge et maintient la stabilité de la tension de la batterie, renforçant ainsi sa durée de vie présumée [10].

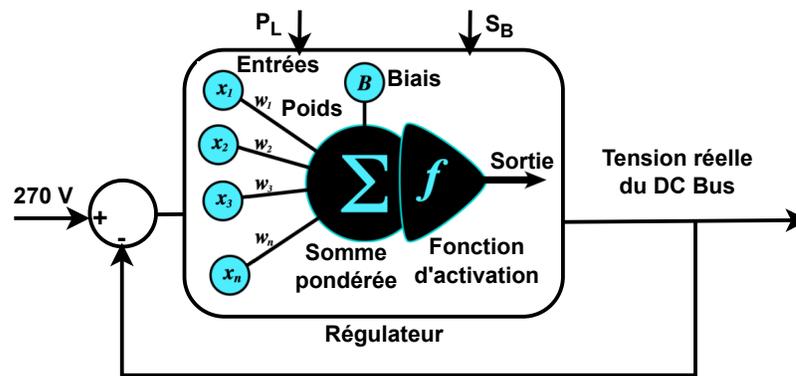


Figure 4.3: Contrôle de tension du DC Bus.

La stratégie de gestion de l'énergie proposée pour les éléments de stockage hybrides a été mise en œuvre à l'aide du logiciel Matlab/Simulink pendant une période déterminée, dans les conditions suivantes : une température de la pile à combustible de 45 degrés Celsius, la régulation de la puissance par un courant de référence variant de 0 à 250 A. L'état de charge initiale de la batterie est de 65 %, et la régulation de la charge et de la décharge est assurée par un courant de référence de -20 A et 80 A respectivement. La tension initiale du supercondensateur est de 270 V à une température de 25 degrés Celsius. Tout cela vise à vérifier l'efficacité et la précision du système proposé pour le véhicule électrique en assurant l'économie d'énergie de la source principale et la stabilité de la tension du DC Bus dans différentes conditions de fonctionnement liées à la puissance de charge, à l'état de charge de la batterie et à la tension du DC Bus.

4.4.1 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur un réseau de neurones

4.4.1.1 Conception de systèmes de réseau de neurones

Il est nécessaire de développer un système de gestion de l'énergie efficace pour garantir un équilibre durable tout au long de la durée de vie du véhicule électrique, tout en atteignant plusieurs objectifs. Ce système comprend la réalisation d'économies dans la demande et l'efficacité de l'énergie, ainsi que le maintien d'une longue durée de vie de batterie et de supercondensateur. La réalisation de ces objectifs dépend d'une gestion de l'énergie efficace, tirant parti des avantages du système hybride. Il est à noter que la gestion de l'énergie contribue à fournir une référence de puissance appropriée, tandis que chaque élément du système hybride fonctionne dans la plage appropriée en fonction de ses caractéristiques uniques. Cela est notablement réalisé en exploitant la réponse opportune du système, comme illustré dans la Fig. 4.4. Ainsi, un équilibre optimal est atteint entre l'économie d'énergie, l'efficacité du système et la préservation de la vie de batterie et de supercondensateur tout au long de la vie du véhicule électrique [10, 12].

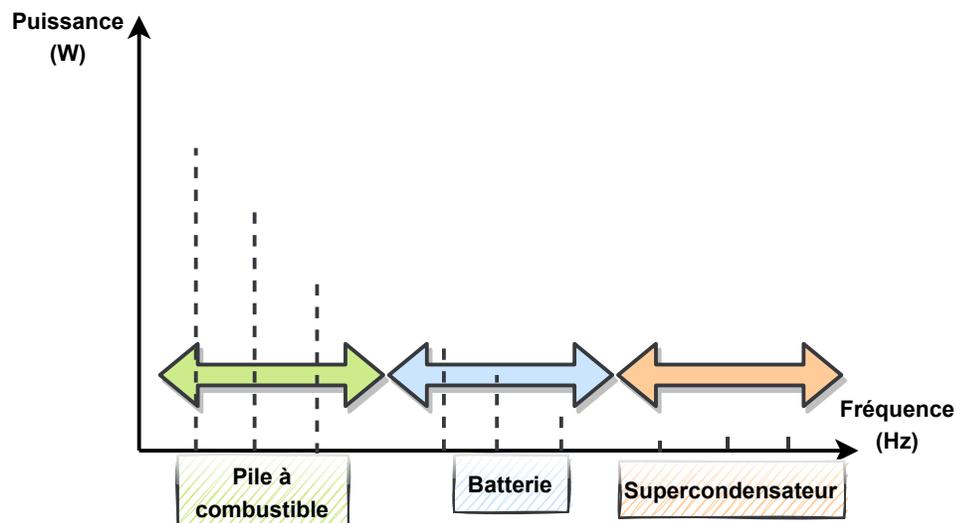


Figure 4.4: Répartition de fréquence.

Dans cette étude, cinq modes de fonctionnement du véhicule ont été adoptés selon la configuration hybride spécifiée.

Le mode 1 : la puissance minimale est générée à partir de la pile à combustible, suffisante pour répondre à la demande de la charge, et la puissance excédentaire est utilisée pour charger les éléments de stockage, réalisant ainsi l'équation suivante :

$$P_{FC} = P_L + (P_B + P_{SC}) \text{ si } P_L < P_{FC_min} \quad (4.7)$$

Le mode 2 : la puissance optimale est produite à partir de la pile à combustible, suffisante pour répondre à la demande de la charge, et la puissance excédentaire est utilisée pour charger les éléments de stockage, réalisant ainsi l'équation suivante :

$$P_{FC} = P_L + (P_B + P_{SC}) \text{ si } P_{FC_min} \leq P_L < P_{FC_opt} \quad (4.8)$$

Le mode 3 : la puissance équivalente à la puissance de la charge est produite à partir de la pile à combustible et l'état de charge de la batterie doit être supérieur à la valeur minimale, réalisant ainsi l'équation suivante :

$$P_{FC} = P_L \text{ si } P_{FC_min} \leq P_L < P_{FC_max} \quad (4.9)$$

Le mode 4 : la puissance maximale est produite à partir de la pile à combustible, elle n'est pas suffisante pour répondre à la demande de la charge, donc elle a besoin du soutien de la puissance d'autres éléments de stockage, réalisant ainsi l'équation suivante :

$$P_{FC} = P_L - (P_B + P_{SC}) \text{ si } P_L > P_{FC_max} \quad (4.10)$$

Le mode 5 : la puissance équivalente à la puissance de la charge en plus de la puissance de charge de la batterie est produite à partir de la pile à combustible. L'état de charge de la batterie doit être inférieur à la valeur minimale, réalisant ainsi l'équation suivante :

$$P_{FC} = P_L + P_{B_charge} \text{ si } 0 < P_L < P_{FC_max} \quad (4.11)$$

L'algorithme de contrôle proposé est illustré dans l'organigramme, comme indiqué dans la Fig. 4.5.

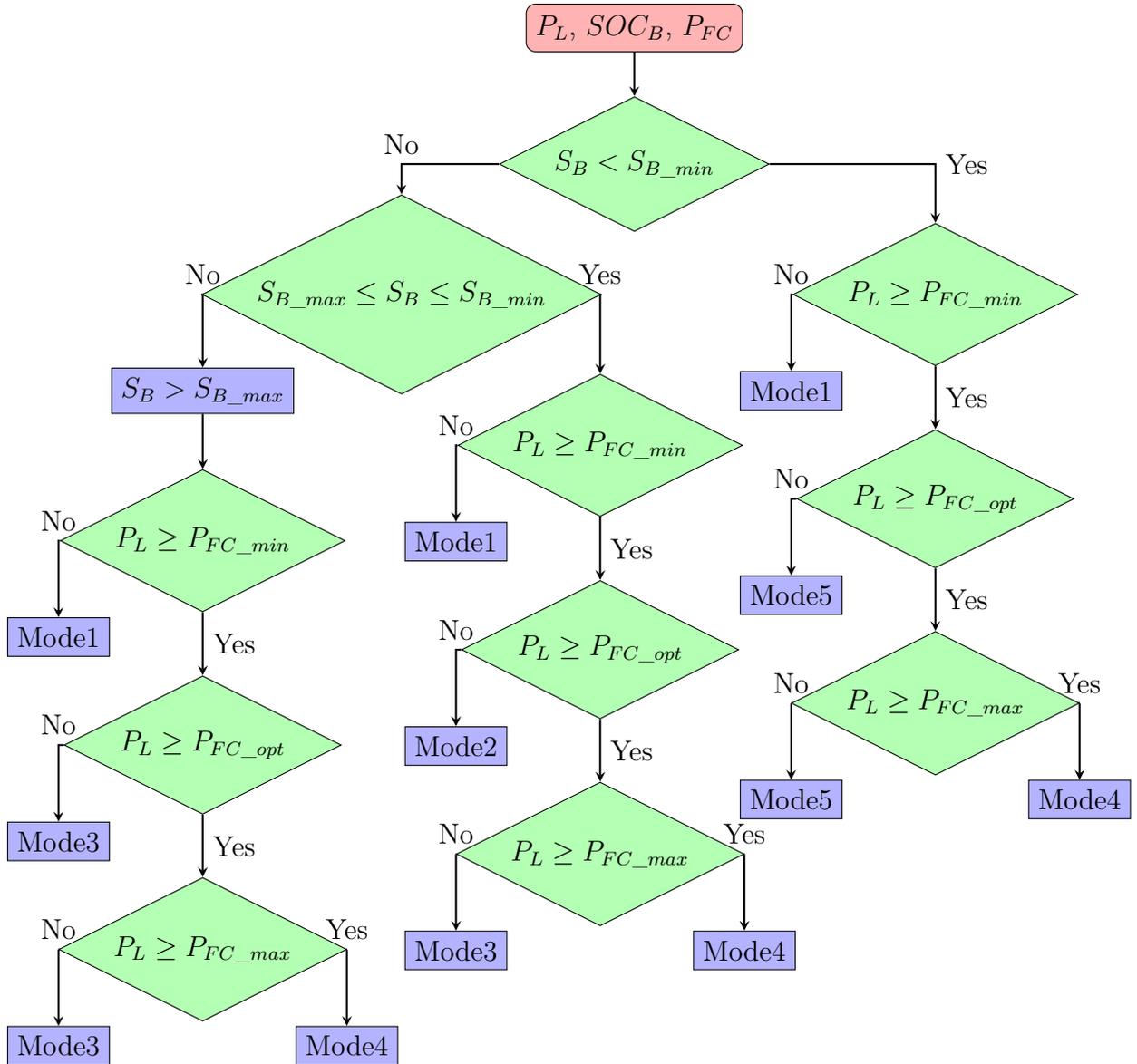


Figure 4.5: L'organigramme de gestion de l'énergie.

Les paramètres utilisés dans la modélisation mathématique de la stratégie de gestion de l'énergie sont les suivants :

P_{FC} : Puissance de la pile à combustible, P_L : puissance de la charge, P_B : puissance de la batterie, P_{SC} : puissance du supercondensateur, P_{FC_min} : puissance minimale pour la pile à combustible, P_{FC_opt} : puissance optimale pour la pile à combustible, P_{FC_max} : puissance maximale pour la pile à combustible, P_{B_charge} : puissance de charge pour la batterie, S_B : état de charge de la batterie, S_{B_min} : état de charge minimum pour la batterie, S_{B_max} : état de charge maximum pour la batterie.

La structure et la programmation du réseau neuronal artificiel dans la stratégie proposée

ont été réalisées de la manière suivante :

Deux entrées ont été utilisées pour la puissance de la charge P_L et l'état de charge de la batterie S_B , en plus d'une sortie, qui est le mode, représentant la puissance appropriée générée par la pile à combustible, divisée en cinq états. Ainsi, nous avons cinq modes comme illustré dans la Fig. 4.6.

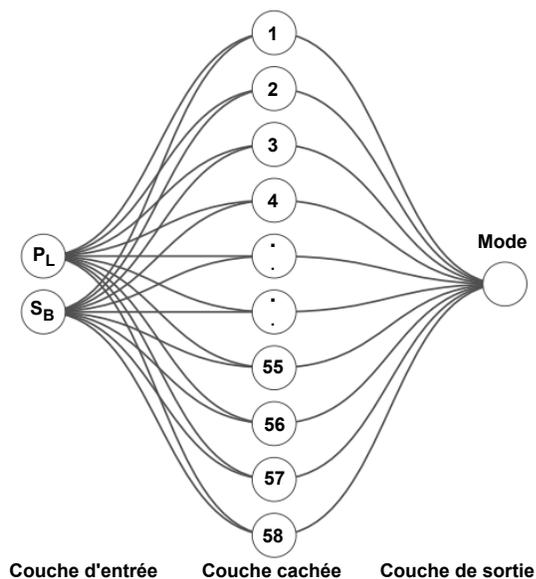


Figure 4.6: Structure de la programmation des réseaux neuronaux.

Le réseau neuronal artificiel a été entraîné en utilisant 15 000 000 échantillons de données répartis comme suit : 70 % pour l'entraînement, 15 % pour la validation, et 15 % pour le test, comme indiqué dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Adaptation de la mesure avec les entrées du réseau neuronal.

Taille mesurée	Intervalle de variation	Valeur
$P_L - P_{FC_min}$	$P_L - P_{FC_min} < 0$	-1
	$P_L - P_{FC_min} \geq 0$	+1
$P_L - P_{FC_opt}$	$P_L - P_{FC_opt} < 0$	-1
	$P_L - P_{FC_opt} \geq 0$	+1
$P_L - P_{FC_max}$	$P_L - P_{FC_max} < 0$	-1
	$P_L - P_{FC_max} \geq 0$	+1
S_B	$S_B < S_{B_min}$	-1
	$S_B > S_{B_max}$	+1
	$S_{B_min} \leq S_B \leq S_{B_max}$	0

4.4.1.2 Résultats de simulation et analyse

Les simulations ont été effectuées sur le logiciel MATLAB/Simulink pendant 110 s. L'objectif principal est de vérifier l'efficacité et la précision de la stratégie proposée, ainsi que la réalisation de ses objectifs. Cela se fait à travers des scénarios de fonctionnement liés à l'état du véhicule électrique et aux caractéristiques du système hybride.

La Fig. 4.7 représente les caractéristiques du moteur du véhicule électrique : le courant, le couple et la vitesse du moteur dans différentes conditions de fonctionnement. Cette figure illustre la performance du moteur sous l'application de la stratégie proposée, malgré les variations soudaines de la vitesse et du couple du moteur. Comme le montre la Fig. 4.7a, le courant du moteur reste sinusoïdal. De plus, la valeur mesurée correspond à la valeur de référence pour le couple et la vitesse, comme indiqué dans les Fig. 4.7b et 4.7c. Cela témoigne de la robustesse de la stratégie proposée pour ce système.

La Fig. 4.8 illustre les variations du courant et de la tension pour chacun des composants, la pile à combustible et la batterie. Ces changements s'ajustent proportionnellement aux fluctuations de la puissance de charge et à l'état de charge de la batterie. Cela indique la présence d'une interaction et d'une harmonie efficaces entre les éléments du système hybride, où la performance de chaque élément s'intègre de manière appropriée avec les autres, démontrant ainsi une intégration efficace dans le système.

La tension du DC Bus reste stable autour de 270 V, avec un écart ne dépassant pas 3.76 %, comme illustré dans la Fig. 4.9a. Ceci revêt une importance cruciale dans la performance du moteur du véhicule électrique connecté au DC Bus via l'onduleur de tension. La Fig. 4.9b représente le courant du DC Bus, qui correspond à la puissance de la charge.

Le contrôle des variations de l'état de charge de la batterie, tel que présenté dans la Fig. 4.10, est un élément essentiel du système de véhicule électrique intégré, combinant la pile à combustible, la batterie et le supercondensateur. L'interaction synchronisée entre ces éléments vise à améliorer les performances du véhicule et à accroître l'efficacité de la consommation d'énergie. Lorsque l'état de charge de la batterie évolue, la répartition optimale de l'énergie entre les différentes sources d'alimentation est assurée, renforçant ainsi l'efficacité et améliorant l'expérience de conduite de manière générale. Cette intégration dynamique contribue à améliorer la stabilité du système et à renforcer ses performances au fil du temps.

La puissance des trois sources et la puissance du moteur apparaissent dans la Fig. 4.11. À $t = 40$ s, la batterie ajoute de la puissance à la charge, car la pile à combustible ne peut pas répondre seule à la demande de puissance et fournissent leur puissance maximale. À $t = 55$ s, la puissance de la charge est égale à celle de la pile à combustible, ce qui signifie que le

reste des sources ne fournit aucune puissance à la charge. À $t = 70$ s, la pile à combustible fournit plus de puissance que la charge, et l'excédent de puissance aide à charger les autres sources.

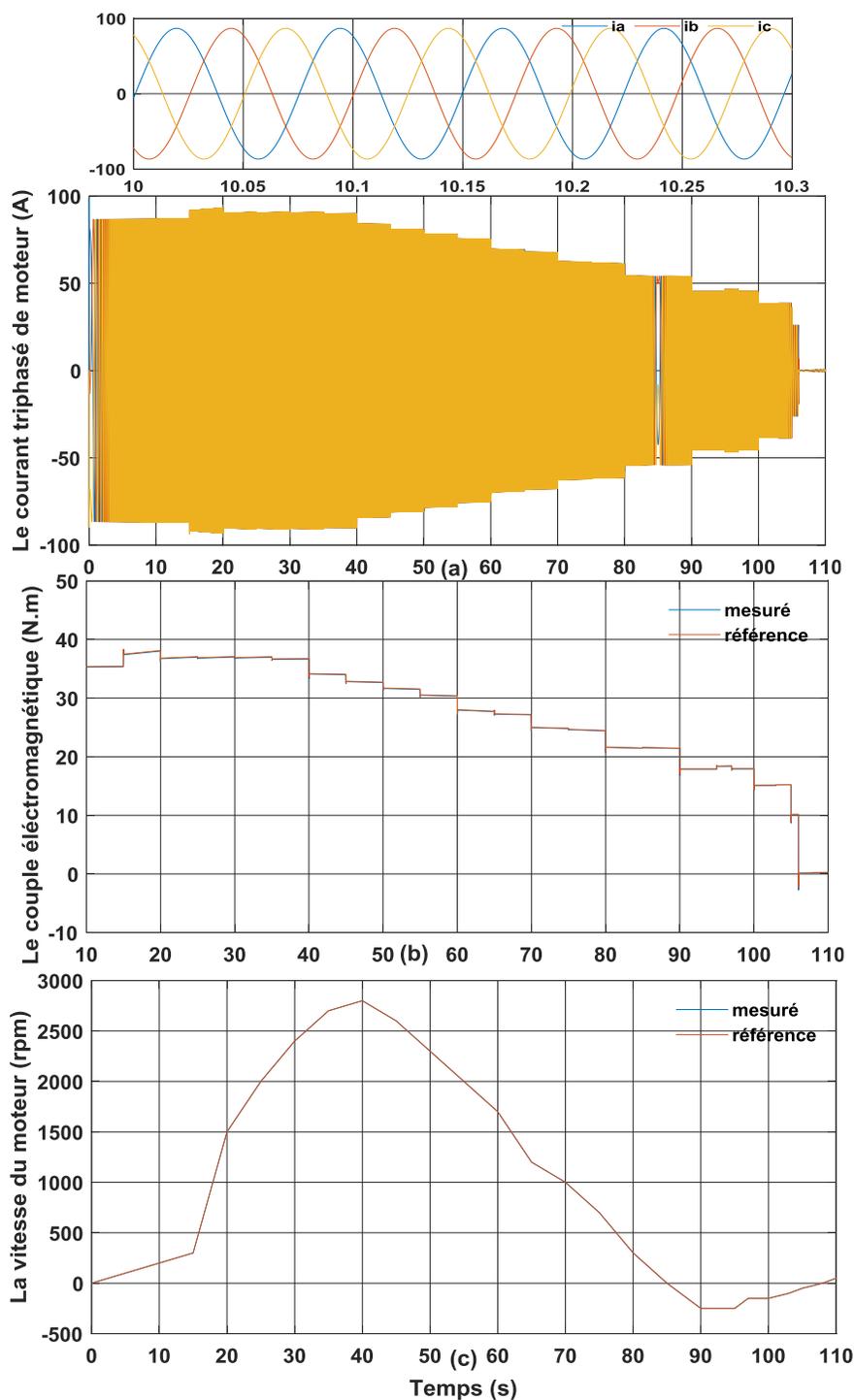


Figure 4.7: Caractéristiques du moteur, (a) courants du stator du moteur, (b) Couple électromagnétique développé par le moteur, (c) vitesse mécanique du moteur.

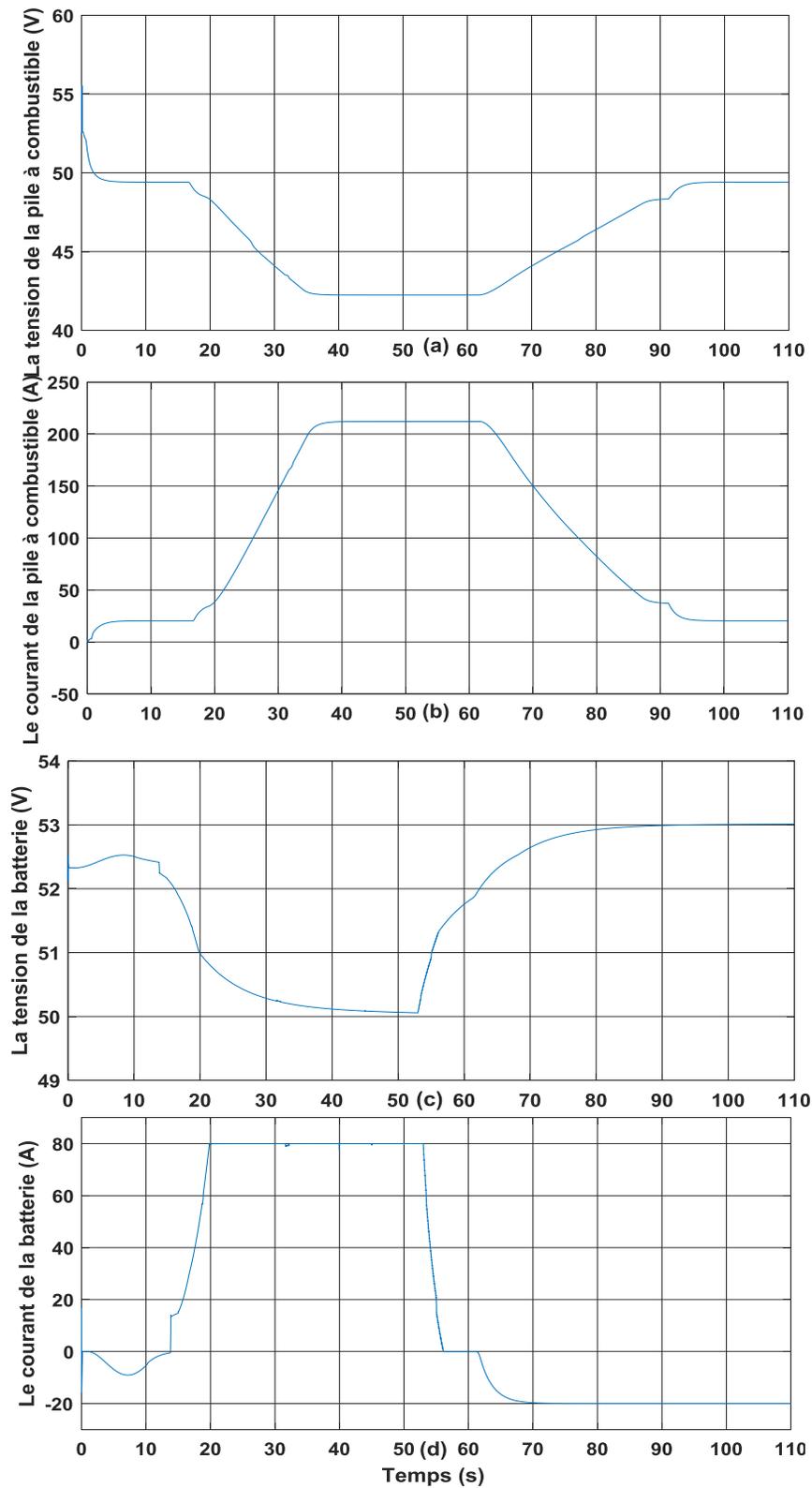


Figure 4.8: Caractéristiques électriques des sources hybrides, (a) tension de la pile à combustible, (b) courant de la pile à combustible, (c) tension de la batterie, (d) courant de la batterie.

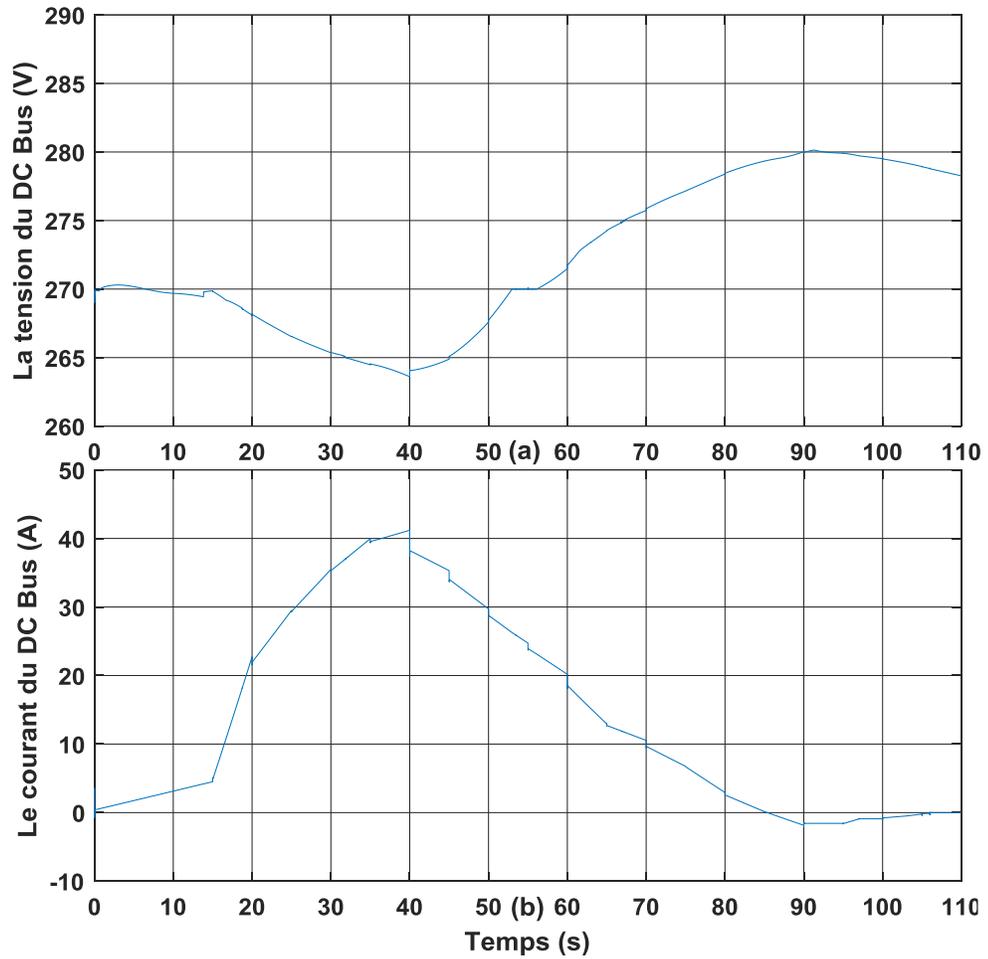


Figure 4.9: Caractéristiques du DC Bus, (a) tension, (b) courant.

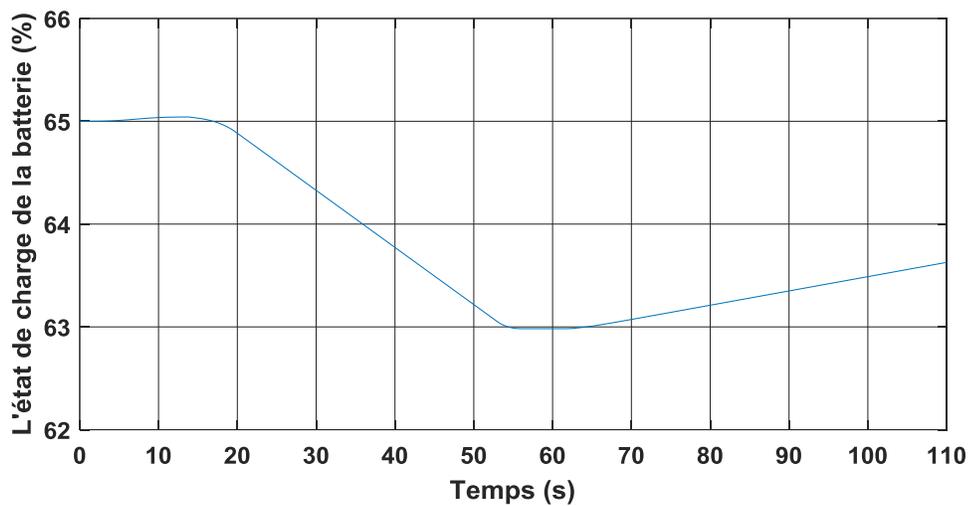


Figure 4.10: État de charge de la batterie.

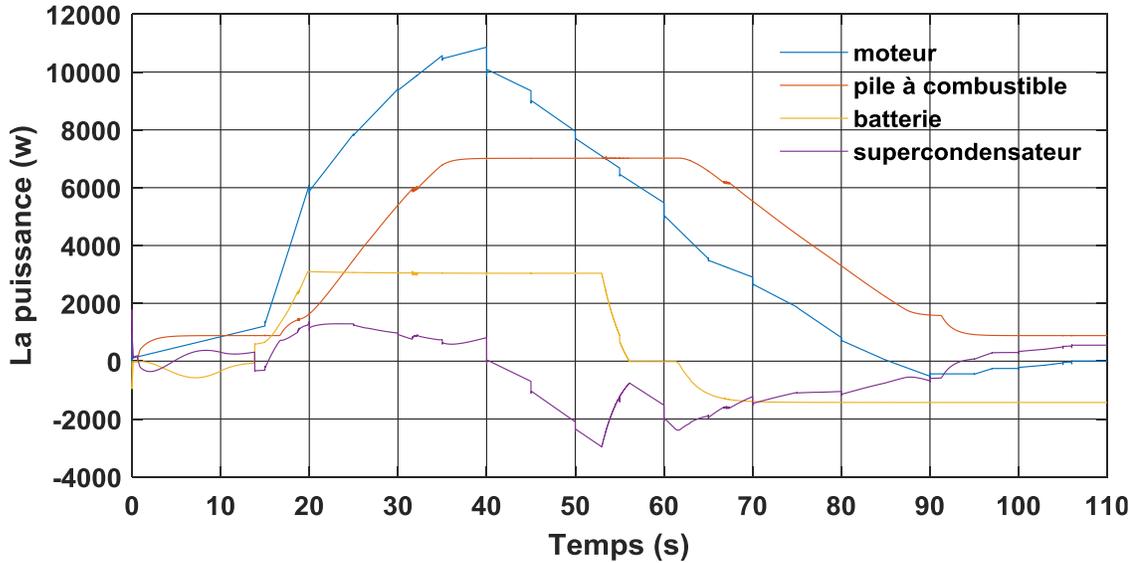


Figure 4.11: La puissance de : pile à combustible, batterie, supercondensateur et la charge demandée.

4.4.2 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur un réseau de neurones profond

4.4.2.1 Conception de systèmes de réseau de neurones profond

Avant le développement de la stratégie proposée, l'énergie optimale de la pile à combustible a été calculée dans 24 cas différents, comprenant les variables du système hybride. Ce calcul implique le traitement d'équations interdépendantes, non linéaires et complexes. Il est à noter que les modèles actuels des batteries, des piles à combustible et des supercondensateurs ne représentent pas précisément toutes les situations qui se produisent à l'intérieur de ces systèmes. Par conséquent, la stratégie repose sur une approche itérative qui aide à traiter la complexité, la non-linéarité élevée et les variations au fil du temps. En conséquence, l'utilisation de réseaux neuronaux profonds est devenue nécessaire pour accomplir cette tâche [113–118].

Dans ce cas, 24 cas ont été proposés pour faire fonctionner la pile à combustible et la batterie au lithium-ion, où le courant électrique de référence approprié a été sélectionné pour assurer le flux optimal d'énergie à travers ces éléments.

Un réseau neuronal artificiel profond a été conçu dans le but de la classification, composé d'une couche d'entrée avec 3 entrées comme suit : puissance de la charge P_L , état de charge de la batterie S_B et tension du DC Bus V_{DC} . Une couche de sortie distingue 24 catégories

de : courant de référence de la pile à combustible i_{FC}^* et courant de référence de la batterie i_B^* , avec deux couches cachées composées de 40 et 10 neurones, Fig. 4.12a.

1 080 000 observations ont été sélectionnées, et le modèle a été entraîné à l'aide de l'outil PatternNet Toolbox dans l'environnement MATLAB de manière efficace pour atteindre la plus faible erreur possible. Un classement précis avec une haute précision a été obtenu. Ensuite, le travail a porté sur la sélection du courant de référence pour les éléments de stockage, Fig. 4.12b.

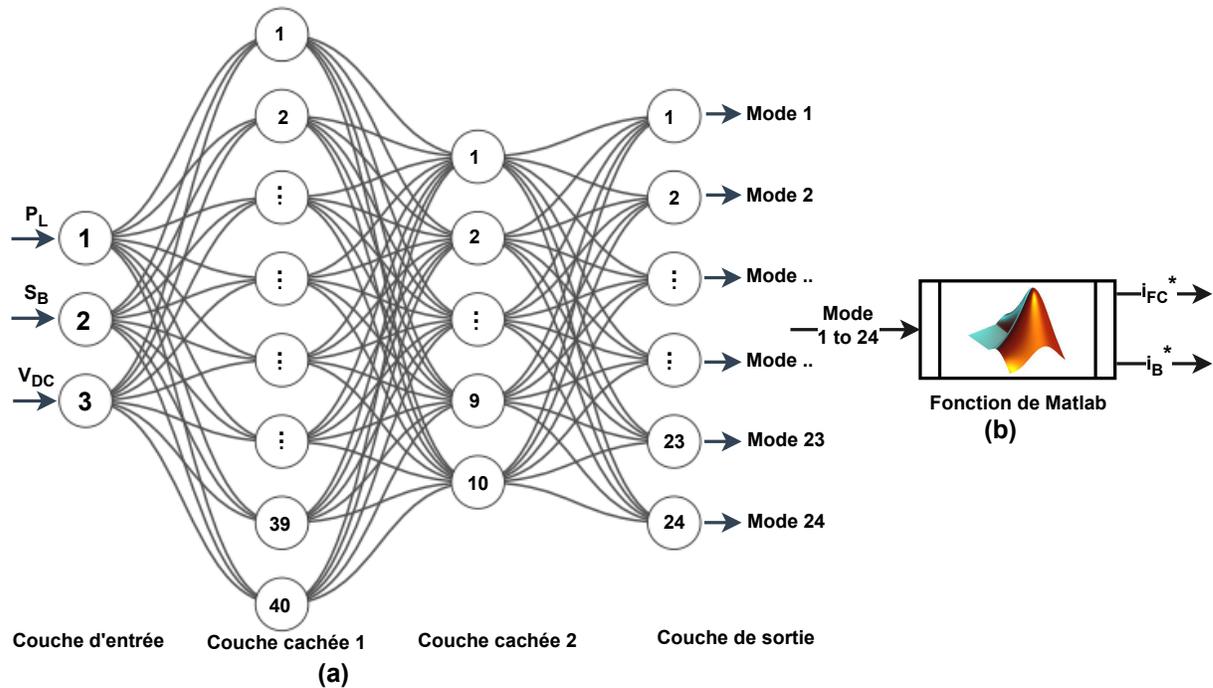


Figure 4.12: La structure utilisée pour (a) le schéma de base de l'entraînement, (b) la fonction Matlab pour convertir le mode en courant de référence.

L'organigramme de gestion de l'énergie, Fig. 4.13, offre un aperçu clair de la stratégie proposée, divisant le schéma en deux parties principales. La première vise à déterminer la puissance nécessaire pour faire fonctionner la pile à combustible, Tableau 4.3, tout en tenant compte de l'efficacité dans la consommation de cette puissance. Quant à la deuxième partie, elle est dédiée à garantir la stabilité de la tension du DC Bus. Cette stratégie complète permet une supervision et un contrôle précis de la distribution et de l'utilisation de l'énergie de manière efficace, renforçant ainsi la durabilité et la stabilité énergétique du système.

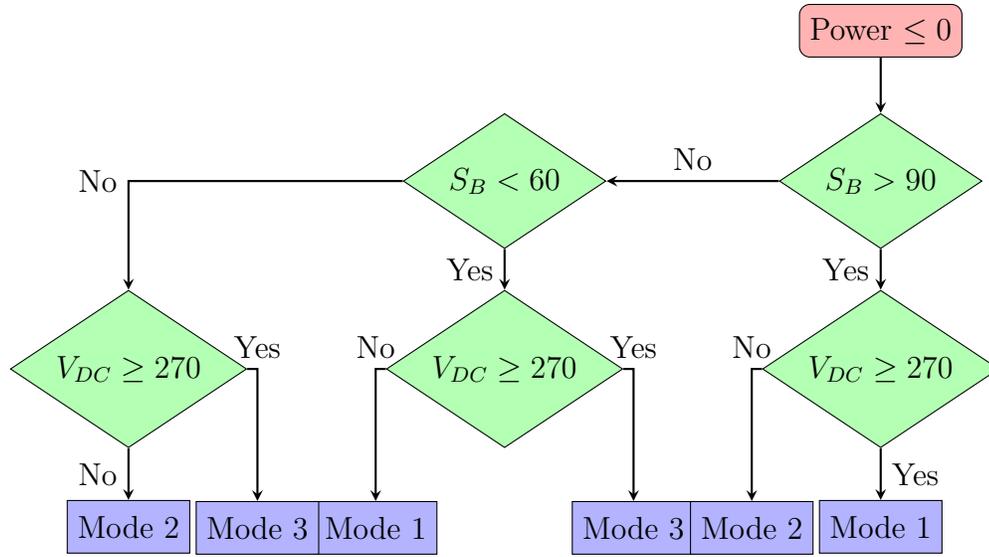


Figure 4.13: L'organigramme de gestion de l'énergie.

Tableau 4.3: Limites et plages d'entrée du réseau neuronal.

$60\% \leq S_B \leq 90\%$		$S_B < 60\%$		$S_B > 90\%$		Puissance de la charge(W)
$V_{DC} < 270$	$V_{DC} \geq 270$	$V_{DC} < 270$	$V_{DC} \geq 270$	$V_{DC} < 270$	$V_{DC} \geq 270$	
$i_{FC}^* = 0$	$i_{FC}^* = 0$	$i_{FC}^* = 0$	$i_{FC}^* = 0$	$i_{FC}^* = 0$	$i_{FC}^* = 0$	$P_L \leq 0$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 20$	$i_{FC}^* = 20$	$i_{FC}^* = 20$	$i_{FC}^* = 20$	$i_{FC}^* = 20$	$i_{FC}^* = 20$	$0 < P_L \leq 880$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 50$	$i_{FC}^* = 50$	$i_{FC}^* = 50$	$i_{FC}^* = 50$	$i_{FC}^* = 50$	$i_{FC}^* = 50$	$880 < P_L \leq 2080$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 100$	$i_{FC}^* = 100$	$i_{FC}^* = 100$	$i_{FC}^* = 100$	$i_{FC}^* = 100$	$i_{FC}^* = 100$	$2080 < P_L \leq 3880$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 150$	$i_{FC}^* = 150$	$i_{FC}^* = 150$	$i_{FC}^* = 150$	$i_{FC}^* = 150$	$i_{FC}^* = 150$	$3880 < P_L \leq 5380$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 200$	$i_{FC}^* = 200$	$i_{FC}^* = 200$	$i_{FC}^* = 200$	$i_{FC}^* = 200$	$i_{FC}^* = 200$	$5380 < P_L \leq 6680$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 212$	$i_{FC}^* = 212$	$i_{FC}^* = 212$	$i_{FC}^* = 212$	$i_{FC}^* = 212$	$i_{FC}^* = 212$	$6680 < P_L \leq 6980$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$6980 < P_L \leq 7780$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = -20$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	
$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$i_{FC}^* = 250$	$P_L > 7780$
$i_B^* = 80$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 0$	$i_B^* = 80$	$i_B^* = 80$	

La Fig. 4.14 représente comment le réseau neuronal profond interagit avec cette stratégie. Dans cet exemple, la première couche est dotée de trois entrées, le réseau comporte deux couches cachées, et il y a une couche de sortie contenant trois catégories différentes. Ce modèle a été entraîné sur un seul échantillon dans le cadre de cet exemple illustratif. Cependant, en réalité, un grand nombre d'échantillons est nécessaire pour assurer l'efficacité et la précision du modèle. Cet exemple met l'accent sur l'analyse du processus de la stratégie proposée et les détails de l'interaction des réseaux neuronaux profonds dans sa mise en œuvre, offrant ainsi une compréhension approfondie du fonctionnement du modèle.

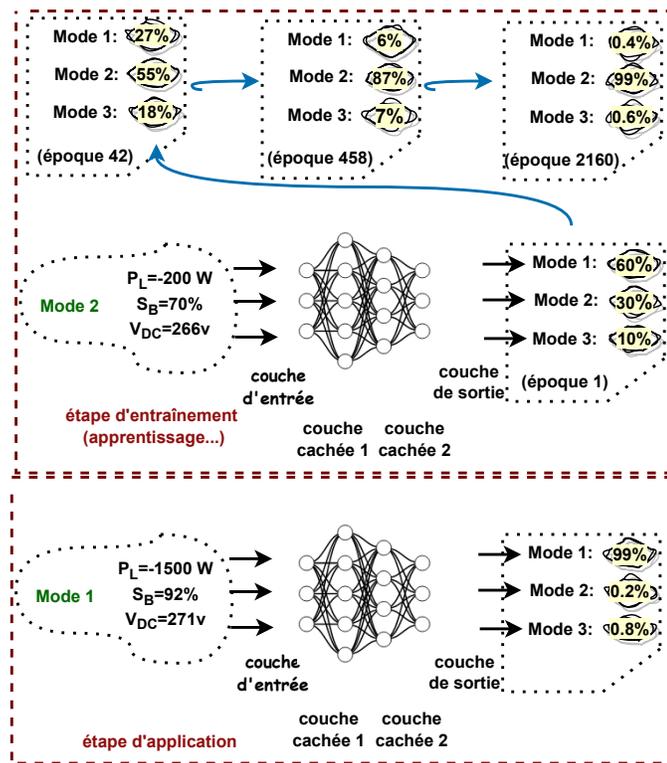


Figure 4.14: Principe du réseau de neurones profond dans notre système.

4.4.2.2 Résultats de simulation et analyse

La Fig. 4.15 représente les caractéristiques du moteur du véhicule électrique : le courant, le couple et la vitesse du moteur dans différentes conditions de fonctionnement. Cette figure illustre la performance du moteur sous l'application de la stratégie proposée, malgré les variations soudaines de la vitesse et du couple du moteur. Le courant du moteur, comme indiqué dans la Fig. 4.15a, est bien géré. De plus, le couple mesuré correspond également au couple de référence pour les différentes vitesses, comme le montrent les Fig. 4.15b et 4.15c. Cela indique la robustesse de la stratégie de contrôle mise en œuvre dans ce système, ce qui

est d'une importance cruciale pour les véhicules électriques.

La Fig. 4.16 illustre le courant et la tension pour chacun des composants : la pile à combustible et la batterie. Ces changements s'ajustent proportionnellement aux fluctuations de la puissance de la charge, de l'état de charge de la batterie et de tension du DC Bus, ce qui indique que ce système a été construit de manière robuste.

La tension du DC Bus reste stable et constante autour de 270 V, avec une déviation ne dépassant pas 0,61 %, comme illustré dans la Fig. 4.17a. Ceci est crucial pour la performance du moteur du véhicule électrique connecté au DC Bus via l'onduleur de tension, et cela témoigne de la précision et de la robustesse de la stratégie proposée. La Fig. 4.17b représente le courant du DC Bus, qui correspond à la puissance de la charge.

L'état de charge de la batterie est représenté dans la Fig. 4.18. De 0 à 27 s, l'état de charge reste stable, car la pile à combustible est suffisante pour répondre à la demande en énergie, contribuant ainsi à améliorer la stabilité de l'état de charge. De 27 à 60 s, il est évident que la batterie fournit de l'énergie à la charge, car la pile à combustible seule ne suffit pas à répondre à la demande énergétique, entraînant une détérioration de l'état de charge. Jusqu'à la 72 s, la batterie commence à exploiter l'énergie récupérée de la charge pour la recharge jusqu'à 106 s. Cependant, la tension du DC Bus reste stable malgré ces variations, ce qui est également un indicateur de la force et de la robustesse de la stratégie proposée.

Les éléments de génération d'énergie (pile à combustible, batterie et supercondensateur) fournissent de l'énergie à la charge pendant une période allant jusqu'à 110 secondes, comme le montre la performance de la Fig. 4.19. De 0 à 27 s, le véhicule électrique commence à extraire une quantité suffisante d'énergie pour répondre à ses besoins de la pile à combustible, et on observe une correspondance entre la puissance du moteur et la puissance de la pile à combustible pendant cette période, indiquant l'efficacité de l'utilisation de la pile à combustible. Même la batterie est en état de veille. Il y a un léger changement dans l'énergie du supercondensateur en raison de sa réponse aux hautes fréquences et de la correction des erreurs liées aux prédictions de la puissance de la charge, comme cela a déjà été mentionné. Cela montre également que les hypothèses sur lesquelles ce système a été construit ont été testées. À partir de la seconde 27 et les moments qui suivent, la pile à combustible devient incapable de répondre à la demande d'énergie, et on observe que la batterie compense cette lacune, ce qui constitue l'un des avantages des systèmes hybrides. De la seconde 72 jusqu'à environ la seconde 106, il n'y a pas de demande d'énergie, mais il y a une récupération d'énergie de la charge qui est exploitée pour charger les éléments de stockage, et la pile à combustible

ne fournit aucune énergie, indiquant également l'économie d'énergie. Tous ces indicateurs témoignent de la garantie de la précision et de l'efficacité de la stratégie proposée, qui prend en compte l'économie d'utilisation de l'énergie de la pile à combustible tout en assurant la stabilité de la tension du DC Bus, comme on le voit dans ce scénario.

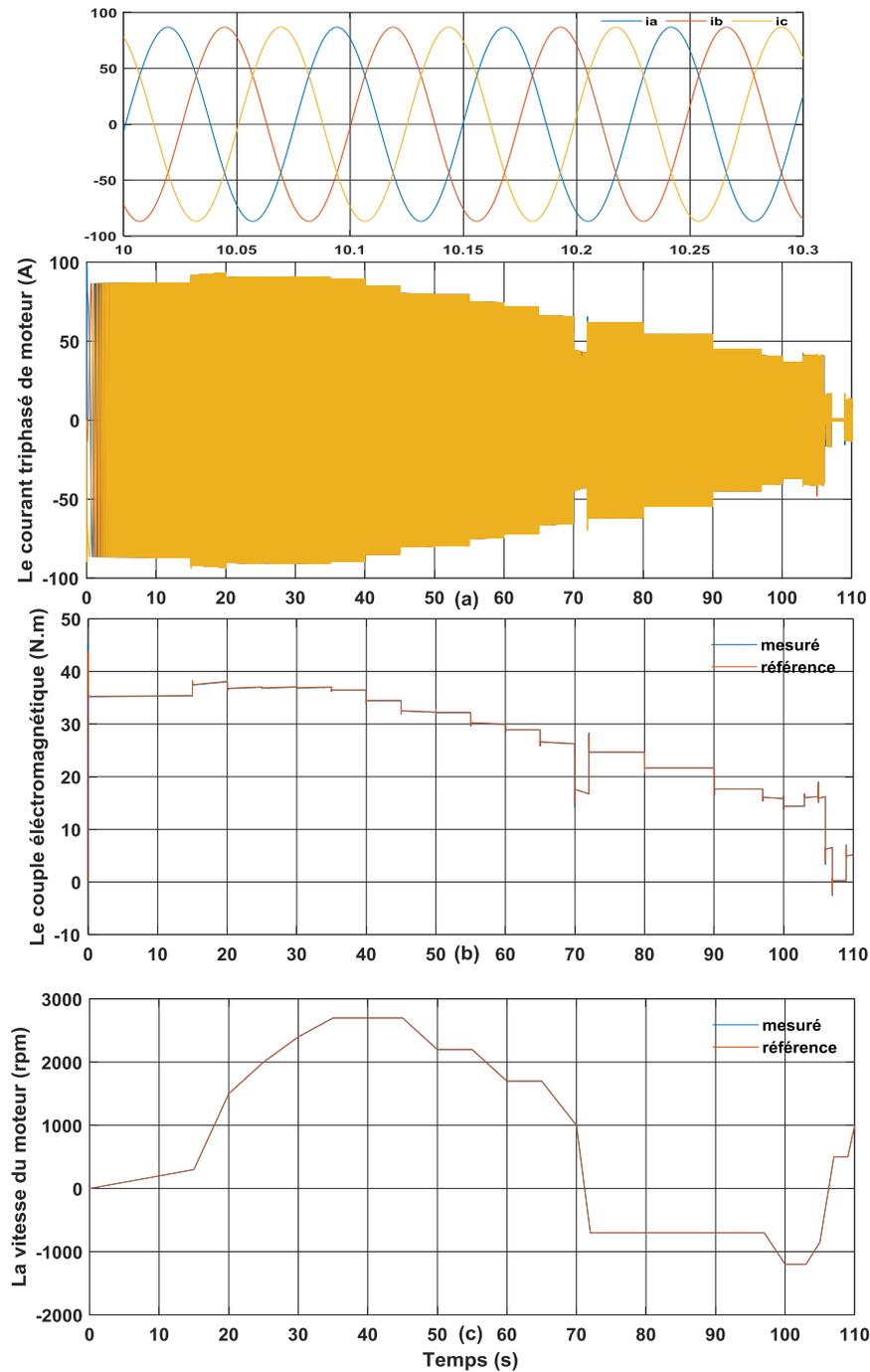


Figure 4.15: Caractéristiques du moteur, (a) courants du stator du moteur, (b) Couple électromagnétique développé par le moteur, (c) vitesse mécanique du moteur.

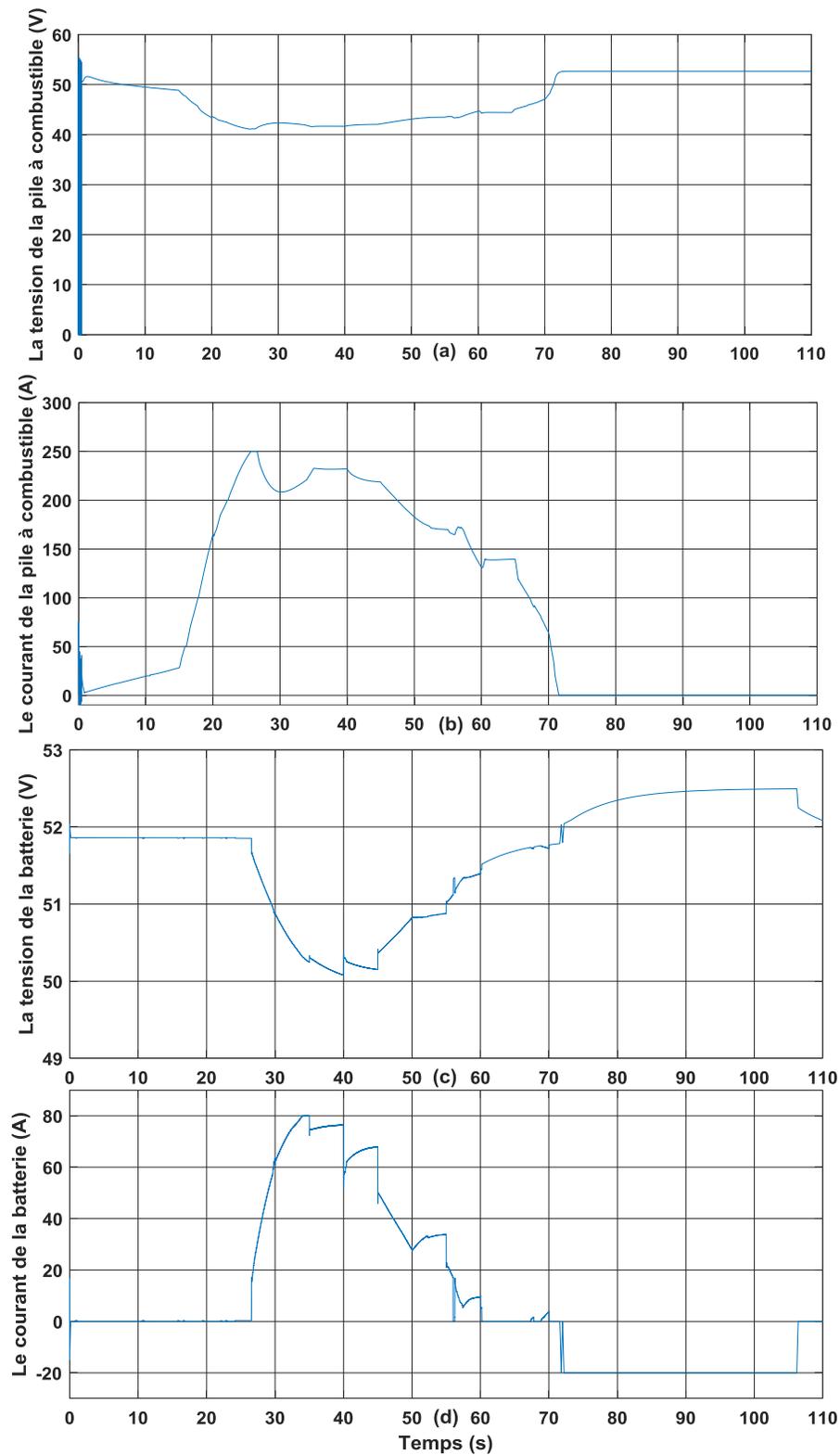


Figure 4.16: Caractéristiques électriques des sources hybrides, (a) tension de la pile à combustible, (b) courant de la pile à combustible, (c) tension de la batterie, (d) courant de la batterie.

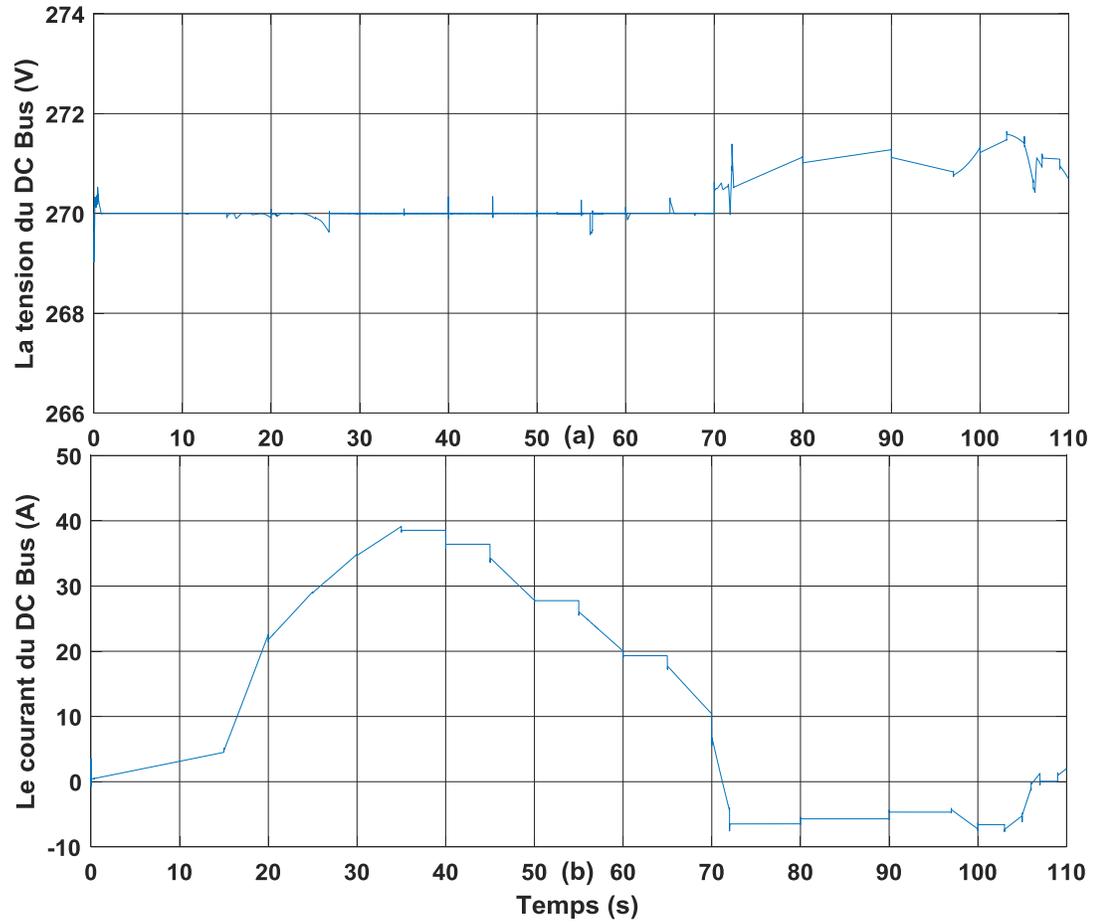


Figure 4.17: Caractéristiques du DC Bus, (a) tension, (b) courant.

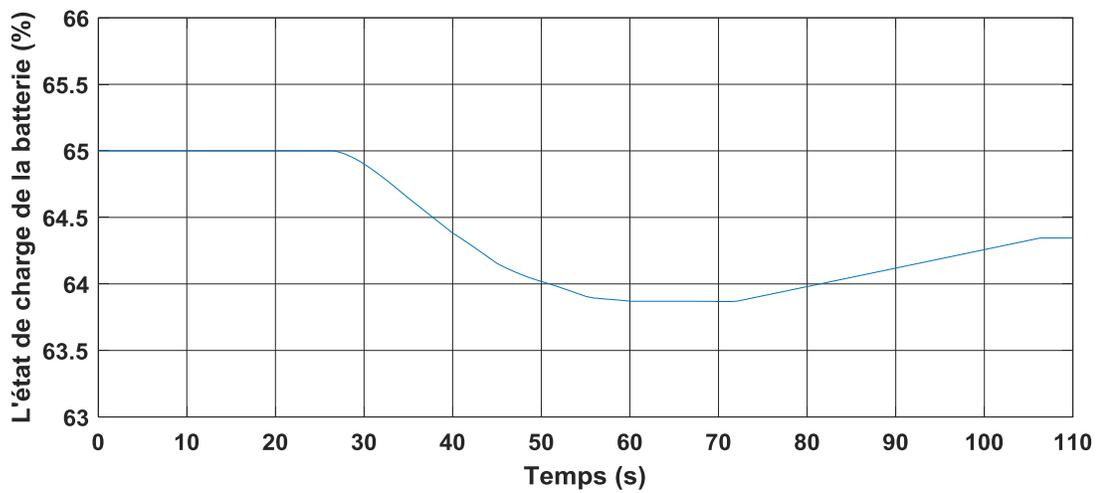


Figure 4.18: État de charge de la batterie.

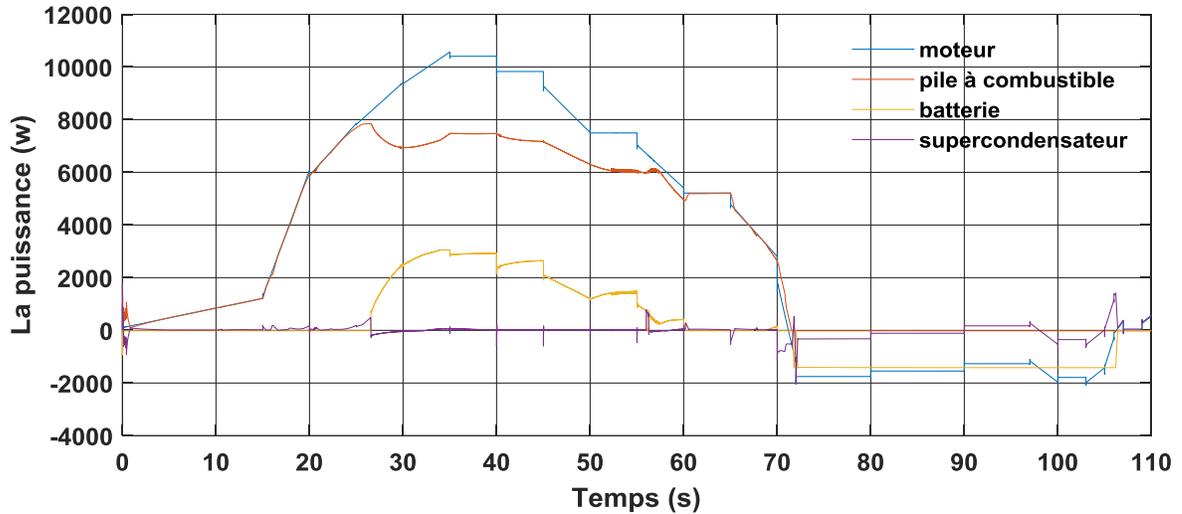


Figure 4.19: La puissance de : pile à combustible, batterie, supercondensateur et la charge demandée.

4.5 Conclusion

Dans cette recherche, un système d'énergie hybride a été conçu, basé sur une pile à combustible en tant que source principale, reposant sur le contrôle par l'utilisation d'un réseau neuronal artificiel. Cette stratégie s'appuie sur quatre étapes clés : la conception et la mise en œuvre rigoureuse du système, la collecte de nombreuses données sur les entrées et les sorties, le choix de la structure du réseau, et la formation du modèle sur ce réseau jusqu'à atteindre la plus faible erreur possible. Enfin, le travail sur le modèle entraîné est effectué.

Dans ce contexte, ces systèmes font face à plusieurs défis, tels que la réalisation de l'efficacité économique dans l'utilisation de l'énergie de la pile à combustible et la garantie de la stabilité de la tension du DC Bus dans diverses conditions de fonctionnement.

Les résultats des simulations confirment que les conditions du véhicule électrique fonctionnent efficacement, et qu'une économie d'énergie du côté de la pile à combustible, et assurant une stabilité adéquate de la tension du DC Bus, en plus de préserver la batterie et le supercondensateur, prolonge ainsi leur durée de vie.

Conclusion générale

À la fin de cette thèse, il est impératif d'effectuer une analyse minutieuse des réalisations et de mettre en évidence les aspects essentiels ainsi que les idées distinctives explorées tout au long de cette étude. Par la suite, nous exposerons un ensemble d'idées et de propositions susceptibles de constituer le fondement pour l'évolution et l'amélioration de ce travail à l'avenir.

Nous avons utilisé des méthodes avancées de contrôle, tirant parti des sources d'énergie propre et des systèmes hybrides. Nous avons également eu recours à l'intelligence artificielle dans les stratégies de gestion de l'énergie, dans le but d'atteindre un système caractérisé par les niveaux les plus élevés de précision et d'efficacité possibles.

Dans les véhicules électriques, nous cherchons toujours à maximiser les avantages tout en minimisant la consommation d'énergie, et ce, en tenant compte de la sécurité, de la protection et de la durée de vie des composants du système. Ainsi, nous avons modélisé et contrôlé le moteur synchrone à aimants permanents. Notre choix s'est porté sur ce moteur en raison de son efficacité élevée par rapport aux autres types. Les méthodes MTPA et FW ont été intégrées dans le contrôle de ce moteur, dans le but d'obtenir un couple maximal même à des vitesses élevées.

Nous avons exploité trois sources d'énergie, à savoir la pile à combustible, le supercondensateur et la batterie, ce qui a conduit à la formation d'un système hybride nous permettant de maximiser les avantages de chaque élément pour répondre aux besoins continus en énergie de la charge. Nous pouvons également utiliser l'énergie récupérée de la charge pour charger les éléments de stockage, plutôt que de la perdre sous forme de chaleur. Toutes ces dispositions et régulations relèvent des tâches de gestion de l'énergie. De plus, la modélisation et le contrôle efficace des convertisseurs, ainsi que le choix des spécifications appropriées, sont d'une importance cruciale pour améliorer l'efficacité de ce convertisseur. À titre d'exemple, chez ARADDEX, ils ont réussi à concevoir un convertisseur spécifique pour la pile à combustible avec une efficacité atteignant 97 % et plus, avec la possibilité de l'intégrer avec la pile à combustible pour réduire les câbles et tirer parti des méthodes de contrôle de haut niveau.

Après avoir organisé la structure du système et mis en lumière les caractéristiques des éléments du système hybride, en précisant rigoureusement les objectifs du travail, tout en tenant compte de la protection et de la durée de vie des composants du système hybride, le rôle de la stratégie de contrôle et de supervision intervient dans toutes ces contraintes, malgré toutes ces complexités. Ainsi, le choix de la stratégie appropriée devient d'une importance capitale, car nous avons adopté des stratégies avancées basées sur l'intelligence artificielle, à savoir la logique floue et les réseaux neuronaux artificiels. Leur efficacité a été vérifiée par l'obtention de résultats satisfaisants.

Malgré la qualité de la recherche, elle a besoin d'évolution à la fin. À travers notre exploration dans ce domaine, nous résumons les opportunités d'amélioration futures dans les points suivants :

Amélioration de la stratégie de contrôle du moteur synchrone en intégrant le réseau neuronal artificiel avec les stratégies MTPA et FW, dans le but d'atteindre une précision supérieure dans les opérations de contrôle.

L'utilisation de semi-conducteurs fabriqués à partir du composé carbure de silicium (SiC) plutôt que du silicium (Si) vise à réduire les pertes d'énergie et à améliorer l'efficacité du système, tout en réduisant simultanément la taille des composants.

En plus de l'estimation de l'état de charge de la batterie, une estimation de l'état de santé est également ajoutée. Cela est fait pour améliorer la fiabilité du système.

L'augmentation de la tension du DC Bus contribue à renforcer l'efficacité des convertisseurs, ce qui se traduit par une amélioration de l'efficacité globale du système. Cela est dû à la réduction du courant circulant dans les fils, réduisant ainsi les pertes et contribuant à la réduction des coûts grâce à la diminution du diamètre des fils. Ce processus est couramment utilisé dans les véhicules modernes, où la tension du DC Bus peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1000 V.

Dans la stratégie de gestion de l'énergie, une limite est imposée à l'écart de tension du DC Bus par rapport à la valeur de référence, contribuant ainsi à la stabilisation du système et à la préservation de l'intégrité des composants, ce qui se traduit par une augmentation de leur durée de vie présumée.

L'amélioration de la stratégie de gestion de l'énergie implique l'ajout de facteurs supplémentaires en tant qu'entrées à la stratégie actuelle. Cela inclut l'ajout de paramètres pour les températures des éléments de stockage, contribuant à leur protection et renforçant les aspects de sécurité du système. Il comprend également l'ajout d'une pente représentant la consommation de la puissance du moteur du véhicule, participant à la distribution appro-

priée des fréquences pour les éléments du système pendant le fonctionnement. Cela signifie déterminer quels éléments doivent être en mode actif et lesquels doivent être en mode veille.

Références Bibliographiques

- [1] Bert Metz, Ogunlade Davidson, HC De Coninck, Manuela Loos, and Leo Meyer. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] Lee Chapman. Transport and climate change: a review. *Journal of transport geography*, 15(5):354–367, 2007.
- [3] Martin Winter and Ralph J Brodd. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical reviews*, 104(10):4245–4270, 2004.
- [4] Eklas Hossain, Ron Perez, and Ramazan Bayindir. Implementation of hybrid energy storage systems to compensate microgrid instability in the presence of constant power loads. In *2016 IEEE international conference on renewable energy research and applications (ICRERA)*, pages 1068–1073. IEEE, 2016.
- [5] J Schmid and W Kleinkauf. New trends in photovoltaic systems technology. *14th EPVSEC*, pages 1337–1339, 1997.
- [6] Caisheng Wang and M Hashem Nehrir. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system. *IEEE transactions on energy conversion*, 23(3):957–967, 2008.
- [7] V Mounica and YP Obulesu. Hybrid power management strategy with fuel cell, battery, and supercapacitor for fuel economy in hybrid electric vehicle application. *Energies*, 15(12):4185, 2022.
- [8] Dimitrios Rimpas, Stavros D Kaminaris, Izzat Aldarraji, Dimitrios Piromalis, Georgios Vokas, Panagiotis G Papageorgas, and Georgios Tsaramirsis. Energy management and storage systems on electric vehicles: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 61:813–819, 2022.

-
- [9] Raymond O Kene and Thomas O Olwal. Energy management and optimization of large-scale electric vehicle charging on the grid. *World Electric Vehicle Journal*, 14(4):95, 2023.
- [10] Souleman Njoya Motapon, Louis-A Dessaint, and Kamal Al-Haddad. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. *IEEE transactions on industrial electronics*, 61(3):1320–1334, 2013.
- [11] Dezhi Xu, Qian Liu, Wenxu Yan, and Weilin Yang. Adaptive terminal sliding mode control for hybrid energy storage systems of fuel cell, battery and supercapacitor. *Ieee Access*, 7:29295–29303, 2019.
- [12] Abderrezak Badji, Djaffar Ould Abdeslam, Mohamed Becherif, Fouad Eltoumi, and Nacereddine Benamrouche. Analyze and evaluate of energy management system for fuel cell electric vehicle based on frequency splitting. *Mathematics and Computers in Simulation*, 167:65–77, 2020.
- [13] Hasan Çınar and Ilyas Kandemir. Active energy management based on meta-heuristic algorithms of fuel cell/battery/supercapacitor energy storage system for aircraft. *Aerospace*, 8(3):85, 2021.
- [14] OMER Abbaker Ahmed, Haoping Wang, and Yang Tian. Optimal energy management strategy based on neural network algorithm for fuel cell hybrid vehicle considering fuel cell lifetime and fuel consumption, 2022.
- [15] Kunang Li, Chunchun Jia, Xuefeng Han, and Hongwen He. A novel minimal-cost power allocation strategy for fuel cell hybrid buses based on deep reinforcement learning algorithms. *Sustainability*, 15(10):7967, 2023.
- [16] O Oyakhire. Hydrogen untapped energy? *Institution of Gas Engineers and Managers, Report*. http://www.igem.org.uk/media/251537/IGEM_Hydrogen_%20Report_FINAL-v2013.pdf (accessed Jun 10, 2019), 2013.
- [17] C Davis, B Edelstein, B Evenson, A Brecher, and D Cox. Hydrogen fuel cell vehicle study. a report prepared for the panel on public affairs (popa). *American Physical Society June*, 12, 2003.
-

-
- [18] A Loganayaki and R Bharani Kumar. Permanent magnet synchronous motor for electric vehicle applications. In *2019 5th international conference on advanced computing & communication systems (ICACCS)*, pages 1064–1069. IEEE, 2019.
- [19] Maria Martinez, David Reigosa, Daniel Fernandez, and Fernando Briz. Comparative analysis of high frequency signal injection based torque estimation methods for spmsm, ipmsm and synrm. *Energies*, 13(3):592, 2020.
- [20] Hiroshi Murakami, Yukio Honda, Hiroyuki Kiriya, Shigeo Morimoto, and Yoji Takeda. The performance comparison of spmsm, ipmsm and synrm in use as air-conditioning compressor. In *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370)*, volume 2, pages 840–845. IEEE, 1999.
- [21] René Scheer, Yannick Bergheim, Simon Aleff, Daniel Heintges, Niclas Rahner, Rafael Gries, and Jakob Andert. A virtual prototyping approach for development of pmsm on real-time platforms: A case study on temperature sensitivity. *Automotive Innovation*, 5(3):285–298, 2022.
- [22] Amir Shahdadi et al. *Advanced Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) and Synchronous Reluctance Motor (SynRM)*. PhD thesis, Università degli Studi di Udine, 2023.
- [23] Olivier Tremblay. Development report parameters estimation and vector control of internal permanent magnet synchronous machine. *Université du Québec*, 2008.
- [24] Unai Galfarsoro, Alex McCloskey, Sergio Zarate, Xabier Hernández, and Gaizka Almandoz. Influence of manufacturing tolerances and eccentricities on the electromotive force in permanent magnet synchronous motors. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pages 703–709. IEEE, 2022.
- [25] Rajendra Thike and Pragasen Pillay. Mathematical model of an interior pmsm with aligned magnet and reluctance torques. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(2):647–658, 2020.
- [26] Hakan Gurocak. *Industrial motion control: motor selection, drives, controller tuning, applications*. John Wiley & Sons, 2015.
- [27] Li Muyang. Flux-weakening control for permanent-magnet synchronous motors based on z-source inverters. *Master’s Theses (2009-). Paper 284.*, 2014.
-

-
- [28] Thomas M Jahns. Flux-weakening regime operation of an interior permanent magnet synchronous motor drive. In *1986 Annual Meeting Industry Applications Society*, pages 814–823. IEEE, 1986.
- [29] Yeong Ryu, Srivarssha Govindarajan, and Hazem Tawfik. Implementing graphene and graphene oxide in a proton exchange membrane fuel cell. In *2018 ASEE Annual Conference & Exposition*, 2018.
- [30] Bei Gou, Woonki Na, and Bill Diong. *Fuel cells: dynamic modeling and control with power electronics applications*. CRC press, 2016.
- [31] Souleman Njoya Motapon. *Design and simulation of a fuel cell hybrid emergency power system for a more electric aircraft: evaluation of energy management schemes*. PhD thesis, Ecole de technologie superieure, 2013.
- [32] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd el Aal. *Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system*. PhD thesis, Kassel, Universität, FB 16, Elektrotechnik/Informatik, 05 2005.
- [33] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, et al. A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles. In *2009 IEEE vehicle power and propulsion conference*, pages 1722–1729. IEEE, 2009.
- [34] Qiao Yang, Tao Zeng, Caizhi Zhang, Wenjian Zhou, Lei Xu, Jiaming Zhou, Ping Jiang, and Shangfeng Jiang. Modeling and simulation of vehicle integrated thermal management system for a fuel cell hybrid vehicle. *Energy Conversion and Management*, 278:116745, 2023.
- [35] Rohan Kumar and KA Subramanian. Enhancement of efficiency and power output of hydrogen fuelled proton exchange membrane (pem) fuel cell using oxygen enriched air. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(15):6067–6075, 2023.
- [36] Di Wu, Jean-Marc Commenge, Emilien Fort, Claire Hardy, Jérôme Pecquery, and Laurent Falk. Performance, efficiency, and flexibility analysis of a high-temperature proton exchange membrane fuel cell-based micro-combined heat-and-power system with intensification of the steam methane reforming step by using a millistructured reactor. *ACS omega*, 2023.

-
- [37] Koushik Ahmed, Omar Farrok, Md Mominur Rahman, Md Sawkat Ali, Md Mejbaul Haque, and Abul Kalam Azad. Proton exchange membrane hydrogen fuel cell as the grid connected power generator. *Energies*, 13(24):6679, 2020.
- [38] Tri Cuong Do, Hoai Vu Anh Truong, Hoang Vu Dao, Cong Minh Ho, Xuan Dinh To, Tri Dung Dang, and Kyoung Kwan Ahn. Erratum: Do, tc, et al. energy management strategy of a pem fuel cell excavator with a supercapacitor/battery hybrid power source. *energies* 2019, 12, 4362. *Energies*, 13(1):136, 2019.
- [39] Omid Alavi, Talieh Rajabloo, Ward De Ceuninck, and Michaël Daenen. Non-isolated dc-dc converters in fuel cell applications: Thermal analysis and reliability comparison. *Applied Sciences*, 12(10):5026, 2022.
- [40] Younes DJABALLAH, Karim NEGADI, Mohamed BOUDIAF, Abderrahmane BERKANI, and Fabrizio MARIGNETTI. Power management for a fuel cell/battery and supercapacitor based on artificial neural networks for electric vehicles. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2023(8), 2023.
- [41] Livio Miniguano, Henry Miniguano, Santiago Illescas, Andrés Cuasapaz, and Ricardo Rosero. Management and control strategy of battery-supercapacitor vehicular power-train system. In *International Conference on Innovation and Research*, pages 257–266. Springer, 2020.
- [42] Henry Miniguano, Andrés Barrado, Cristina Fernández, Pablo Zumel, and Antonio Lázaro. A general parameter identification procedure used for the comparative study of supercapacitors models. *Energies*, 12(9):1776, 2019.
- [43] Amit Kumar Rajput and Jagdeep Singh Lather. Energy management and dc bus voltage stabilization in a hres based dc microgrid using hess. *SJEE*, 20(2):243–268, 2023.
- [44] Islam M Abdelqawee, Ahmed W Emam, Mohamed S ElBages, and Mohamed A Ebrahim. An improved energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor system using a novel hybrid jellyfish/particle swarm/bat optimizers. *Journal of Energy Storage*, 57:106276, 2023.
- [45] Miguel Robayo. *Real-time Energy Management System of Battery-Supercapacitor in Electric vehicles*. PhD thesis, University of Exeter, 2023.

-
- [46] Khalid Abdullah Khan, Ammar Atif, and Muhammad Khalid. Hybrid battery-supercapacitor energy storage for enhanced voltage stability in dc microgrids using autonomous control strategy. In *Emerging Trends in Energy Storage Systems and Industrial Applications*, pages 535–569. Elsevier, 2023.
- [47] Karl H Hellman, Maria R Peralta, and Gregory K Piotrowski. *Evaluation of a Toyota Prius hybrid system (THS)*. US Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of . . . , 1998.
- [48] Masaki Okamura and Toshifumi Takaoka. The evolution of electric components in prius. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 11(1):1–6, 2022.
- [49] CW Ayers. Evaluation of 2004 toyota prius hybrid electric drive system interim report. Technical report, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2004.
- [50] Timothy A Burrell, Steven L Campbell, Chester Coomer, Curtis William Ayers, Andrew A Wereszczak, Joseph Philip Cunningham, Laura D Marlino, Larry Eugene Seiber, and Hua-Tay Lin. Evaluation of the 2010 toyota prius hybrid synergy drive system. Technical report, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Power . . . , 2011.
- [51] Kimimori Hamada, Masaru Nagao, Masaki Ajioka, and Fumiaki Kawai. Sic—emerging power device technology for next-generation electrically powered environmentally friendly vehicles. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(2):278–285, 2014.
- [52] Toyota Global Newsroom. Toyota develops new silicon carbide power semiconductor with higher efficiency, 2014.
- [53] Dawei Zhang, Chen Zhong, Peijuan Xu, and Yiyang Tian. Deep learning in the state of charge estimation for li-ion batteries of electric vehicles: A review. *Machines*, 10(10):912, 2022.
- [54] Elias Dias Rossi Lopes, Marlon Marques Soudre, Carlos Humberto Llanos, and Helon Vicente Hultmann Ayala. Nonlinear receding-horizon filter approximation with neural networks for fast state of charge estimation of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 68:107677, 2023.

-
- [55] Cheng Xu, E Zhang, Kai Jiang, and Kangli Wang. Dual fuzzy-based adaptive extended kalman filter for state of charge estimation of liquid metal battery. *Applied Energy*, 327:120091, 2022.
- [56] Hui Pang and Fengqi Zhang. Experimental data-driven parameter identification and state of charge estimation for a li-ion battery equivalent circuit model. *Energies*, 11(5):1033, 2018.
- [57] Munadir Ahmed. Modeling lithium-ion battery chargers in plects. *Engineering, Plexim Inc.*, (Web page: https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs_lithium_ion_adv.pdf), (Access date: May 2022), 2016.
- [58] Mohamed Daowd, Noshin Omar, Bavo Verbrugge, Peter Van Den Bossche, and Joeri Van Mierlo. Battery models parameter estimation based on matlab/simulink®. In *Proceedings of the 25th Electric Vehicle Symposium (EVS-25), Shenzhen, China*, volume 2, pages 1–6, 2010.
- [59] VM Nagarajan, T Sathish, MZM Shamim, CA Saleel, and A Afzal. A review on battery modelling techniques. *Sustainability*, 13:10042, 2021.
- [60] Jiaping Zhou, Bo Xing, and Chunyang Wang. A review of lithium ion batteries electrochemical models for electric vehicles. In *E3S Web of Conferences*, volume 185, page 04001. EDP Sciences, 2020.
- [61] Alexandros Nikolian, Joris De Hoog, Karel Fleurbay, J-M Timmermans, P Van De Bossche, and J Van Mierlo. Classification of electric modelling and characterization methods of lithium-ion batteries for vehicle applications. In *Proceedings of the European Electric Vehicle Congress, Brussels, Belgium*, pages 13–16, 2014.
- [62] Ximing Wang, Hongwen He, Fengchun Sun, and Jieli Zhang. Application study on the dynamic programming algorithm for energy management of plug-in hybrid electric vehicles. *Energies*, 8(4):3225–3244, 2015.
- [63] Gregory L Plett. *Battery management systems, Volume I: Battery modeling*, volume 1. Artech House, 2015.
- [64] Essam M Allam. Study vehicle battery simulation and monitoring system. *American Journal of Modeling and Optimization*, 3(2):40–49, 2015.

-
- [65] Hongwen He, Rui Xiong, and Jinxin Fan. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *energies*, 4(4):582–598, 2011.
- [66] Peng Lin, Peng Jin, Aixiao Zou, and Zhenpo Wang. Real-time identification of partnership for a new generation of vehicles battery model parameters based on the model reference adaptive system. *International Journal of Energy Research*, 45(6):9351–9368, 2021.
- [67] Yanan Gou and Xuezheng Han. Study of soc dynamic estimation method of power lithium battery. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 452, page 032057. IOP Publishing, 2018.
- [68] Fei Zhang, Guangjun Liu, and Lijin Fang. A battery state of charge estimation method with extended kalman filter. In *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1008–1013. IEEE, 2008.
- [69] Paul Zarchan. *Progress in astronautics and aeronautics: fundamentals of Kalman filtering: a practical approach*, volume 208. Aiaa, 2005.
- [70] Gary Bishop, Greg Welch, et al. An introduction to the kalman filter. *Proc of SIGGRAPH, Course*, 8(27599-23175):41, 2001.
- [71] Bizhong Xia, Zizhou Lao, Ruifeng Zhang, Yong Tian, Guanghao Chen, Zhen Sun, Wei Wang, Wei Sun, Yongzhi Lai, Mingwang Wang, et al. Online parameter identification and state of charge estimation of lithium-ion batteries based on forgetting factor recursive least squares and nonlinear kalman filter. *Energies*, 11(1):3, 2017.
- [72] Zhihao Yu, Ruituo Huai, and Linjing Xiao. State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using a kalman filter based on local linearization. *Energies*, 8(8):7854–7873, 2015.
- [73] Fredrik Gustafsson and Gustaf Hendeby. Some relations between extended and unscented kalman filters. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(2):545–555, 2011.
- [74] Yong Luo, Pengwei Qi, Yingzhe Kan, Jiayu Huang, Huan Huang, Jianwen Luo, Jianan Wang, Yongheng Wei, Renjie Xiao, and Shuang Zhao. State of charge estimation method based on the extended kalman filter algorithm with consideration of time-varying battery parameters. *International Journal of Energy Research*, 44(13):10538–10550, 2020.

-
- [75] Mehdi Gholizadeh and Alireza Yazdizadeh. State of charge estimation of a lithium-ion battery using robust non-linear observer approach. *IET Electrical Systems in Transportation*, 9(1):1–7, 2019.
- [76] Namrata Padalale and MR Sindhu. State of charge (soc) determination through extended kalman filter in battery management systems. In *2023 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, pages 1–6. IEEE, 2023.
- [77] Welch Greg and Bishop Gary. An introduction to the kalman filter, 2006.
- [78] Gregory L Plett. Extended kalman filtering for battery management systems of lipb-based hev battery packs: Part 1. background. *Journal of Power sources*, 134(2):252–261, 2004.
- [79] Djaballah Younes, Mohamed Boudiaf, and Negadi Karim. Energy management based hybrid fuel cell/battery for electric vehicle using type 2 fuzzy logic controller. *International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering*, 12(1), 2023.
- [80] Soteris A Kalogirou. Applications of artificial neural-networks for energy systems. *Applied energy*, 67(1-2):17–35, 2000.
- [81] Soteris A Kalogirou. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 5(4):373–401, 2001.
- [82] Yi Zhang, Xiaohan Shi, Hengxu Zhang, Yongji Cao, and Vladimir Terzija. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136:107744, 2022.
- [83] Bikramjit S Bhangu, Paul Bentley, David A Stone, and Christopher M Bingham. Non-linear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles. *IEEE transactions on vehicular technology*, 54(3):783–794, 2005.
- [84] SN Sivanandam, Sai Sumathi, and SN Deepa. *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer, 2007.
- [85] Constantin Volosencu and Marco Antonio Aceves-Fernandez. *Fuzzy Logic*. BoD–Books on Demand, 2020.
- [86] Thomas Vetter. Fuel cell converter fcdc500 dc/dc: Hyfindr, 2023.
-

-
- [87] Anu Varghese, Lekshmi R Chandran, and Arun Rajendran. Power flow control of solar pv based islanded low voltage dc microgrid with battery management system. In *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [88] DC Regulated. Supervisory control of an adaptive-droop regulated dc microgrid with battery management capability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013.
- [89] Said Belhadj, Karim Belmokhtar, and Kaci Ghedamsi. Improvement of energy management control strategy of fuel cell hybrid electric vehicles based on artificial intelligence techniques. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 52(6), 2019.
- [90] Qi Li, Weirong Chen, Yankun Li, Shukui Liu, and Jin Huang. Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1):514–525, 2012.
- [91] Dongxu Li, Bing Xu, Jie Tian, and Zheshu Ma. Energy management strategy for fuel cell and battery hybrid vehicle based on fuzzy logic. *Processes*, 8(8):882, 2020.
- [92] Rabah Araria, Karim Negadi, Mohamed Boudiaf, Fabrizio Marignetti, et al. Non-linear control of dc-dc converters for battery power management in electric vehicle application. *PPrzeglad Elektrotechniczny*, 96, 2020.
- [93] Qian Xun, Yujing Liu, and Elna Holmberg. A comparative study of fuel cell electric vehicles hybridization with battery or supercapacitor. In *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pages 389–394. IEEE, 2018.
- [94] Qi Li, Weirong Chen, Shukui Liu, Zhiyu You, Shiyong Tao, and Yankun Li. Power management strategy based on adaptive neuro-fuzzy inference system for fuel cell-battery hybrid vehicle. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(1), 2012.
- [95] Alessandro Ferrara, Michael Okoli, Stefan Jakubek, and Christoph Hametner. Energy management of heavy-duty fuel cell electric vehicles: Model predictive control for fuel consumption and lifetime optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2):14205–14210, 2020.
- [96] Samson Obu Showers and Atanda Kamoru Raji. State-of-the-art review of fuel cell hybrid electric vehicle energy management systems. *AIMS Energy*, 10(3):458–485, 2022.

-
- [97] Mustapha Habib. Rule-based energy management strategy optimized using pso for fuel cell/battery electric vehicle. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 3(1), 2015.
- [98] Xiao Hu, Shikun Liu, Ke Song, Yuan Gao, and Tong Zhang. Novel fuzzy control energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles considering state of health. *Energies*, 14(20):6481, 2021.
- [99] Razieh Ghaderi, Mohsen Kandidayeni, Mehdi Soleymani, Loic Boulon, and Hicham Chaoui. Online energy management of a hybrid fuel cell vehicle considering the performance variation of the power sources. *IET Electrical Systems in Transportation*, 10(4):360–368, 2020.
- [100] Maher Al-Flehawee and Auday Al-Mayyahi. Energy management for hybrid electric vehicles using rule based strategy and pi control tuned by particle swarming optimization algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(6):5938, 2022.
- [101] *Performance Comparison of Different Power Management Control Strategies for a Hybrid Fuel Cell/Battery Vehicle*, volume Volume 1: Applied Mechanics; Automotive Systems; Biomedical Biotechnology Engineering; Computational Mechanics; Design; Digital Manufacturing; Education; Marine and Aerospace Applications of *Engineering Systems Design and Analysis*, 07 2014.
- [102] Jizheng Liu, Zhenpo Wang, Yankai Hou, Changhui Qu, Jichao Hong, and Ni Lin. Data-driven energy management and velocity prediction for four-wheel-independent-driving electric vehicles. *eTransportation*, 9:100119, 2021.
- [103] Wenxin Xiao, Lei Wang, Dongyin Liu, and Wenwen Zhang. An optimized energy management strategy for fuel cell hybrid vehicles. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 612, page 042088. IOP Publishing, 2019.
- [104] Yangyang Li, Xintao Deng, Biao Liu, Jugang Ma, Fuyuan Yang, and Minggao Ouyang. Energy management of a parallel hybrid electric vehicle based on lyapunov algorithm. *Etransportation*, 13:100184, 2022.
- [105] Sabah Saib, Zahir Hamouda, and Khoudir Marouani. Energy management in a fuel cell hybrid electric vehicle using a fuzzy logic approach. In *2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B)*, pages 1–4. IEEE, 2017.
-

-
- [106] Hongtao Zhang, Yanzhou Qin, Xianguo Li, Xinzhi Liu, and Jinyue Yan. Power management optimization in plug-in hybrid electric vehicles subject to uncertain driving cycles. *ETransportation*, 3:100029, 2020.
- [107] Weiwei Xin, Enyong Xu, Weiguang Zheng, Haibo Feng, and Jirong Qin. Optimal energy management of fuel cell hybrid electric vehicle based on model predictive control and on-line mass estimation. *Energy Reports*, 8:4964–4974, 2022.
- [108] R Sai Chandan, TL Sai Kiran, G Swapna, and T Vijay Muni. Intelligent control strategy for energy management system with fc/battery/sc. *Journal of critical reviews*, 7(2):344–348, 2020.
- [109] Dragan Erickson, Robert W.;Maksimović. *Fundamentals of Power Electronics*. Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2020.
- [110] Daniel W Hart and Daniel W Hart. *Power electronics*, volume 166. McGraw-Hill New York, 2011.
- [111] Jiang You, Weiyan Fan, Lijun Yu, Bin Fu, and Mengyan Liao. Disturbance rejection control method of double-switch buck-boost converter using combined control strategy. *Energies*, 12(2):278, 2019.
- [112] NE Zakzouk, A El Dyasty, A Ahmed, and SM El Safty. Power flow control of a standalone photovoltaic-fuel cell-battery hybrid system. In *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pages 431–436. IEEE, 2018.
- [113] Hegazy Rezk, Ahmed M Nassef, Mohammad Ali Abdelkareem, Abdul Hai Alami, and Ahmed Fathy. Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(8):6110–6126, 2021.
- [114] Ahmed Fathy, Hegazy Rezk, and Ahmed M Nassef. Robust hydrogen-consumption-minimization strategy based salp swarm algorithm for energy management of fuel cell/supercapacitor/batteries in highly fluctuated load condition. *Renewable energy*, 139:147–160, 2019.
- [115] Alessandro Ferrara and Christoph Hametner. Impact of energy management strategies on hydrogen consumption and start-up/shut-down cycles in fuel cell-ultracapacitor-battery vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(6):5692–5703, 2021.

- [116] Xueqin Lü, Siwei Li, XiangHuan He, Chengzhi Xie, Songjie He, Yuzhe Xu, Jian Fang, Min Zhang, and Xingwu Yang. Hybrid electric vehicles: A review of energy management strategies based on model predictive control. *Journal of Energy Storage*, 56:106112, 2022.
- [117] Seyedeh Mahsa Sotoudeh and Baisravan HomChaudhuri. A deep learning-based approach to eco-driving based energy management of hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023.
- [118] Younes Djaballah, Karim Negadi, and Mohamed Boudiaf. Enhanced lithium-ion battery state of charge estimation in electric vehicles using extended kalman filter and deep neural network. *International Journal of Dynamics and Control*, pages 1–8, 2024.