

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FLILIÈRE: ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION: RÉSEAUX ÉLECTRIQUES



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie électrique

Commande d'un système hybride (PàC-Batterie) par passivité et logique floue

Réalisé par: **Mohamed Taki-eddine SEKSAF**

Devant le jury composé de:

Naïma RAHOUA	MAA, Université de Biskra	Président
Messaoud MOHAMMEDI	MCB, Université de Biskra	Rapporteur
Mohamed Yacine HAMMOUDI	MCB, Université de Biskra	Examineur

Année Universitaire 2017/2018

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : **Réseaux Électriques**



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

Master

en génie électrique

Thème

*Commande d'un système hybride (PàC-Batterie) par
passivité et logique floue*

Présenté par

Mohamed Taki-eddine SEKSAF

Avis favorable de l'encadreur

Avis favorable du président de jury:

Cachet et signature

DÉDICACE

À

mes très chers parents,

mes frères,mes soeurs,

*mes amis surtout 'Affar Housseem'et
'Meghazzi bakhouche Abdessatar',*

La mémoire de mes grand parents,

tous ceux qui comptent pour moi.

REMERCIEMENTS

A vant toute chose, je remercie DIEU qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

J'exprime toute gratitude à mon encadreur Mr. Messaoud MOHAMMEDI pour ses conseils durant la réalisation de mon travail de fin d'étude.

Je voudrais spécialement remercier docteur Mohamed Yacine HAMMOUDI pour son esprit ouvert, pour son accord de m'accueillir dans mon projet de fin d'étude, Je suis fier d'avoir la chance de profiter de ses larges expériences et connaissances, ses remarques et ses suggestions clairvoyantes, aussi que je n'oublie pas le président madame Naïma RAHOUA pour avoir accepté d'en présider le jury puis les membres du jury. Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour la formulation qu'ils m'ont donné durant mon cycle d'étude. Enfin je remercie, avec toute la suprême sincérité tout ceux qui ont aidé de près ou de loin à terminer et réaliser mon projet de fin d'étude.

L'utilisation des systèmes hybrides en combinant plusieurs sources devient plus en plus très important. Pour réduire la consommation des systèmes électriques, l'idée consiste à récupérer l'énergie lorsqu'il est possible, et la réutiliser lorsque le système est en le besoin. L'énergie peut être emmagasinée dans les organes de stockage comme les batteries. Cette unité de stockage peut fournir et récupérer de l'énergie durant le régime transitoire et le régime permanent.

Dans ce mémoire, nous étudions un système hybride (FC/Batterie) utilisant une pile à combustible (FC) en tant que source principale, un bus continu et une batterie comme source d'alimentation auxiliaire. Ce système est modélisé par des équations dans l'espace d'état . La commande du système est effectuée par l'utilisation d'un contrôleur flou pour déterminer le courant de référence désiré de la batterie et par un contrôleur basé sur la passivité. Ce dernier a pour but de forcer le courant de suivre sa référence. La commande basée sur la passivité (PBC) est une technique non linéaire très puissante, qui traite des informations importantes des systèmes telles que l'énergie totale. La preuve de stabilité et les résultats de simulation sont donnés.

Mots clés: Pile à combustible, Batterie, Commande basée sur la passivité, Assignation de l'interconnexion et de l'amortissement, Système Hamiltonien commandé par ports, Logique floue, Système hybride.

The use of hybrid systems by combining several sources becomes more important. To reduce the consumption of electrical systems, the idea is to recover energy where possible, and reuse when the system is in need. Energy can be stored in storage organs such as the supercapacitor. This storage unit can provide and recover energy during transient and steady state conditions.

In this work, we study a hybrid system (FC / Battery) using a fuel cell (FC) as a main source, a DC link and a battery as auxiliary power source. This system is modeled by state space equations. The control of the system is performed by using a fuzzy logic controller to determine the desired reference current of the battery and with a passivity based controller. The latter aims to force the current to follow its reference. Passive-Based Control (PBC) is a very powerful non-linear technique that treats important system information such as total energy. Stability proof and simulation results are given.

Keywords : Fuel cell, Battery, Passivity-Based Control, Interconnection and damping assignment, Port Controlled Hamiltonian System, Fuzzy Logic System, Hybrid System.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction Générale</i>	1
1 Généralités sur les piles à combustible et les batteries	3
1.1 Introduction	3
1.2 Pile à combustible	4
1.2.1 Historique	4
1.2.2 Principe de fonctionnement	5
1.2.3 Déférents types de piles à combustible	7
1.2.4 Applications des piles a combustible	7
1.2.5 Caractéristique tension-courant des piles à combustible	10
1.3 Batterie	11
1.3.1 Principe de fonctionnement	12
1.3.2 Modélisation des batteries	13
1.3.3 État de charge de la batterie (SoC_B)	14
1.4 Conclusion	15
2 Commande par passivité et logique floue	16
2.1 Introduction	16
2.2 Commande par la logique floue	16
2.3 Contrôle par la logique floue	18
2.4 Interface de fuzzification	18
2.5 Base de règles du système	19
2.6 Machine d'inférence floue	19

2.7	Interface de défuzzification	19
2.7.1	Avantages et inconvénients de réglage par logique floue	20
2.8	Commande basée sur la passivité (IDA PBC)	20
2.8.1	Principe	20
2.8.2	Conclusion	23
3	Commande du système hybride PàC/Batterie	24
3.1	Introduction	24
3.2	Structure de la source d'énergie hybride	24
3.3	Modélisation du système	25
3.4	gestion de l'énergie	27
3.5	Fonction de l'énergie	29
3.6	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC	30
3.7	Loi de commande de IDA-PBC	31
3.8	Simulation et interprétation des résultats	33
3.9	Conclusion	38
	<i>Conclusion Générale</i>	39

LISTE DES FIGURES

1.1	Pile à combustible de Grove en 1839.	5
1.2	Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC . .	6
1.3	Caractéristique tension-courant d'une pile PEM [Pay09].	10
1.4	principe de fonctionnement d'un accumulateur en décharge, en charge	12
1.5	Modèle simple d'une batterie [Zan10].	13
2.1	Configuration générale d'un contrôleur flou.	17
2.2	Schéma explicatif de la logique floue.	18
3.1	Structure de la source hybride FC/Batterie.	25
3.2	Structure globale de la commande du système hybride.	28
3.3	a) Tension de bus continu et sa référence. b) Courant de la charge.	35
3.4	a) Tension de la pile à combustible. b) Courant de la pile à combustible. .	35
3.5	a) Tension de la batterie. b) Courant de la batterie et sa référence.	36
3.6	a) Commande du convertisseur Boost du FC. b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie.	36
3.7	a) QH_2 de la pile à combustible. b) SoC de la batterie.	37
3.8	Transfert de puissances.	37
3.9	Transfert de puissances.	38

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Différentes technologies de piles à combustibles [Pay09].	9
1.2	Matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques [Pai10].	15
3.1	La base des règles de la logique floue	33
3.2	Les paramètres de la charge et la commande.	34
3.3	Les paramètres de la batterie et du bus continu.	34

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La croissante consommation mondiale en énergie primaire ainsi que la raréfaction prévue à moyen terme des combustibles fossiles et leur impact non négligeable sur l'environnement, font de l'hydrogène l'un des vecteurs énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles.

La pile à combustible, est un élément électrochimique permettant de convertir l'énergie de l'hydrogène en électricité, est le moyen par excellence pour utiliser ce vecteur énergétique afin d'alimenter des charges électriques, notamment dans le cadre du transport. Le véhicule à pile à combustible, alimenté directement en hydrogène n'engendre donc aucune pollution atmosphérique locale et est très peu bruyant.

Les piles à combustible sont encore à ce jour des sources à fort courant et à faible niveau de tension. Leur utilisation dans des chaînes de traction de véhicule passe souvent par une élévation de la tension en utilisant des convertisseurs statiques adaptés. L'optimisation globale de ces chaînes de traction passe par l'hybridation de la pile en utilisant un système de stockage d'énergie. Ce système de stockage contient une ou plusieurs sources d'énergie auxiliaires permettant d'effectuer les opérations de démarrage et de récupérer l'énergie lors des freinages. Les batteries et les supercondensateurs (SCs) sont les technologies les plus couramment utilisées à bord des véhicules électriques hybrides. La combinaison de ces sources forme un système hybride (SH) de manière à profiter des avantages de chacune d'elles.

Le système hybride, Pile à combustible/Batterie que nous allons étudier, sera modélisé par un système à variables d'état. Ceci a une forte non linéarité à cause du couplage de la commande des hacheurs avec quelques états du système. Ce système à variables d'état

sera exprimé par la représentation hamiltonienne par ports.

L'objectif de ce travail est de concevoir un contrôleur qui assure la régulation de la tension du bus continu et force le courant de la batterie de suivre sa référence. La gestion de l'énergie est effectuée par l'utilisation d'un contrôleur flou pour déterminer le courant de référence désiré de la batterie. Pour cela nous adoptons l'approche Commande Basée sur la Passivité avec Assignation d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA-PBC) qui est une approche récente et très intéressante, qui s'étend sur une classe plus large de systèmes physiques non linéaires.

Dans le premier chapitre, nous présentons deux sources électriques utilisées dans les systèmes hybrides, notamment les piles à combustible, les batteries électrochimiques en s'appuyant sur plusieurs références bibliographiques. Après une présentation générale de ces sources d'énergies, nous exposons leurs principes de fonctionnement et leurs modélisations usuelles.

Le deuxième chapitre représente l'architecture d'un système flou en déterminant ses entrées et sorties pour une meilleure compréhension des ensembles flous et des opérateurs flous. Ainsi, le principe de la commande par passivité avec l'approche (IDA-PBC) qui sera utilisée pour commander notre système.

Dans le troisième chapitre, nous appliquons la commande par passivité à notre système étudié, pour assurer d'une part la régulation du bus continu et d'autre part la poursuite du courant de référence de la batterie généré par la logique floue.

Enfin, une conclusion générale permet de faire le bilan de cette commande appliquée au système hybride étudié.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES PILES À COMBUSTIBLE ET LES BATTERIES

1.1 Introduction

*L*e premier chapitre de ce chapitre est dédié à la présentation de deux sources d'énergie propres aux piles à combustible, les batteries. Pour chacune de ces sources, nous présentons leurs caractéristiques physiques.

Une pile à combustible est un générateur dans lequel la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple dihydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. Si d'autres combinaisons sont possibles, la pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile dihydrogène-dioxygène ou dihydrogène-air (ceci s'expliquant notamment par l'abondance des ressources en hydrogène sur Terre et la facilité de production du dihydrogène).

Une batterie d'accumulateurs, ou plus communément une batterie, est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension et de capacité désirée. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellules .

1.2 Pile à combustible

Les piles à combustibles sont des moyens de production de l'énergie électrique, considérées comme des sources d'énergie de par leur grande densité d'énergie. Le diagramme de *Ragone* présenté par la figure permettant de comparer les performances énergétiques de différents dispositifs. Ce dernier montre que les piles à combustible présentent les densités d'énergie les plus élevées par rapport aux autres dispositifs [Moh16].

1.2.1 Historique

C'est un peu avant 1840 que William GROVE avocat britannique passionné de la physique, décrit la première pile à combustible (appelée fuel cell dans la littérature anglo-saxonne). Elle utilise de l'hydrogène et d'oxygène, fonctionne à basse température, possède des électrodes de platine et emploie de l'acide sulfurique comme électrolyte. Pendant une centaine d'années, de nombreuses recherches théoriques furent menées tant en thermodynamique qu'en électro-chimie. Des progrès pratiques furent également accomplis, révélant les potentialités indéniables de la filière. Cependant, en 1939, le bilan du premier siècle de recherches était plutôt pessimiste quant à un débouché industriel de grande envergure.

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprirent les études sur les principaux types de générateurs, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". En effet, l'enjeu majeur était de pouvoir embarquer un tri-générateur (électricité, eau et chaleur) à bord des vols habités en préparation. Durant cette longue période, la maturation technologique des piles à combustible a été étroitement associée aux contraintes de la conquête spatiale. Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Wittney aujourd'hui dans le même groupe que IFC (International Fuel Cell). Les premières applications des piles à combustible furent les programmes spatiaux du début des années 60, GEMINI, APOLLO, SPACElab... pour lesquels furent développées des piles à membranes (General Electric), et des piles alcalines sous pression (Pratt and Wittney). Depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grosses entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics, dans le cadre de programmes nationaux ou multi nationaux de diversification énergétique ou de protection

de l'environnement. Les nouveaux développements sont donc désormais orientés vers une baisse des coûts de production, une augmentation de la durée de vie, une augmentation de la fiabilité des systèmes électro-générateurs basés sur les piles à combustible. Aussi, les progrès réalisés ces dernières années (1990 - 2010) dans ces domaines permettent désormais d'envisager l'émergence de marchés de niche pilotés par des normes ou des contraintes importantes (engin à chariot élévateur ou éclairage sur des plateaux de tournage cinématographique par exemple). L'espoir est que ces marchés de faible volume permettent le développement d'une filière hydrogène de la fabrication de l'hydrogène à son utilisation en passant par son stockage et son transport. Si l'expérience se révèle positive sur tous les aspects évoqués, cette filière pourrait alors se généraliser à un horizon de dix à vingt ans et faire de l'hydrogène un nouveau vecteur d'énergie [Azi10].

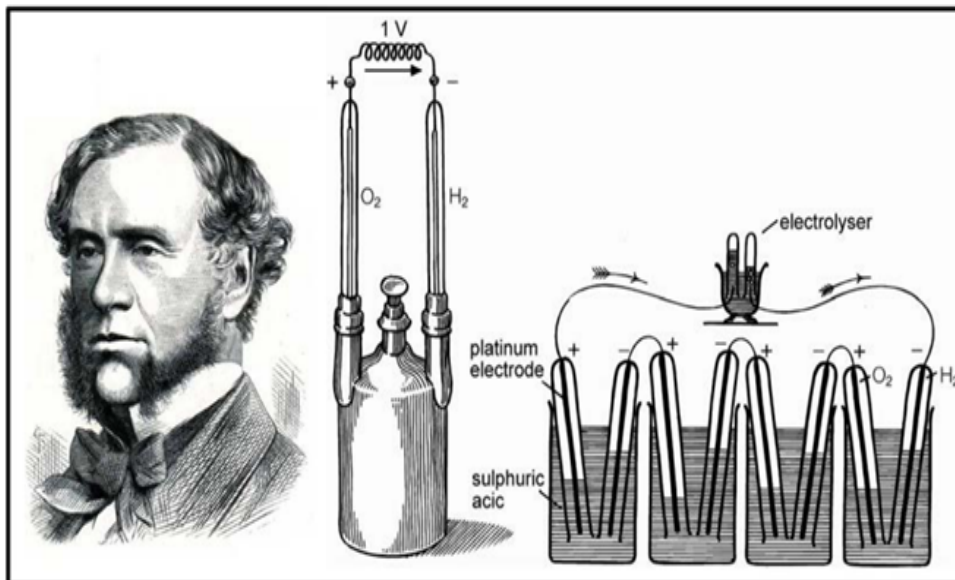


Fig 1.1: Pile à combustible de Grove en 1839.

1.2.2 Principe de fonctionnement

La pile à combustible est le siège d'une réaction d'oxydoréduction qui convertit une énergie chimique en énergie électrique, mais les réactifs sont stockés dans des réservoirs extérieurs à la pile elle-même. Le combustible est dans la plupart des cas du dihydrogène qui réagit avec du dioxygène pour former de l'eau suivant la réaction globale :



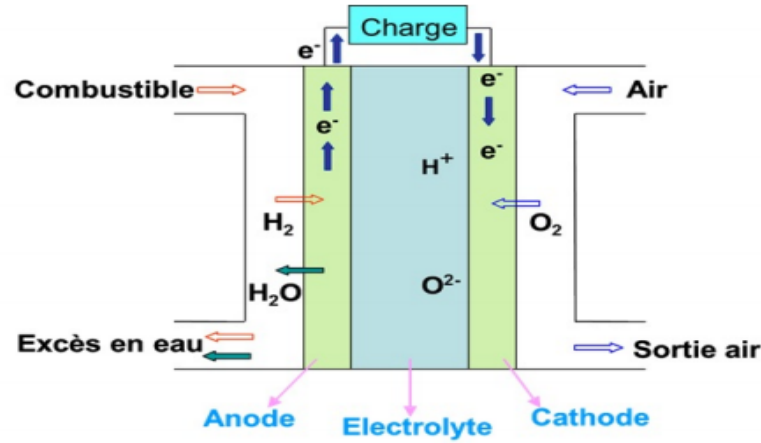


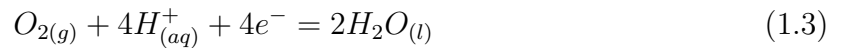
Fig 1.2: Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC .

Suivant les conditions de la transformation, l'eau peut être à l'état liquide ou gazeux. Cette réaction globale provient de deux demi-réactions, l'une d'oxydation du dihydrogène et l'autre de réduction du dioxygène. Celles-ci diffèrent selon la nature acide ou alcaline de l'électrolyte.

Pour une pile acide, le couple redox à l'électrode négative est H^+/H_2 , ce qui donne la demi-réaction :



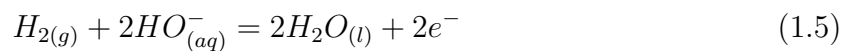
Le couple redox à l'électrode positive est O_2/H_2O , ce qui donne la demi-réaction :



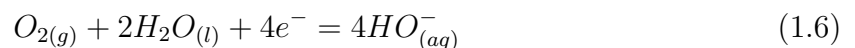
La réaction globale est donc bien :



L'eau est produite à l'électrode positive, du côté de l'air. Pour une pile alcaline, la demi-réaction à l'électrode négative est :



et la demi-réaction à l'électrode positive est :



La réaction globale est la même que pour la pile acide. L'eau est produite à l'électrode négative, du côté du dihydrogène [May10] .

1.2.3 Déférents types de piles à combustible

Il existe actuellement cinq technologies de piles à combustible classées selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement, basse ($< 150^{\circ}C$), moyenne ($200^{\circ}C$), haute ($650^{\circ}C - 1000^{\circ}C$) [Sak13].

1. Pile à membrane polymère échangeuse de protons, Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC
2. Pile à acide phosphorique, Phosphoric Acid Fuel Cell : PAFC.
3. Pile à oxyde solide , Solid Oxide Fuel Cell :SOFC.
4. Pile à carbonate de fondu, Molten Caronat Fuel Cell : MCFC.
5. Pile alcaline,Alkaline Fuel Cell :AFC.
6. Pile alimentée directement par méthanol, Direct Methnol Fuel Cell :DMFC .

1.2.4 Applications des piles a combustible

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées .

Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa

technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ $0,80' / Wh$.

Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude).

Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible .

Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [Sak13] .

Tableau 1.1: Différentes technologies de piles à combustibles [Pay09].

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Basse Température				Haute Température	
Température	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220°C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbone fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol..	hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs KW	200KW à 10MW	1W à 100KW	1KW à 100MW	500KW à 10MW
Rendement Electrique	30-45%	30-45%	35-45% 75% en cogénération	55-60%	50-55% 70% en cogénération	50-60%
Applications	spatial Transport stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial Défense Equipements portables	Stationnaire cogénération	Stationnaire cogénération
Principaux constructeurs	Ballard nuevera axane* helion* (*français)	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- westing- house sulzer	IFC Hitachi Fuji

1.2.5 Caractéristique tension-courant des piles à combustible

De nombreux travaux proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (Figure 1.3) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} , la surtension ohmique V_{ohm} et la surtension de concentration V_{conc} [Mes16] :

$$V_{pile} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1.7)$$

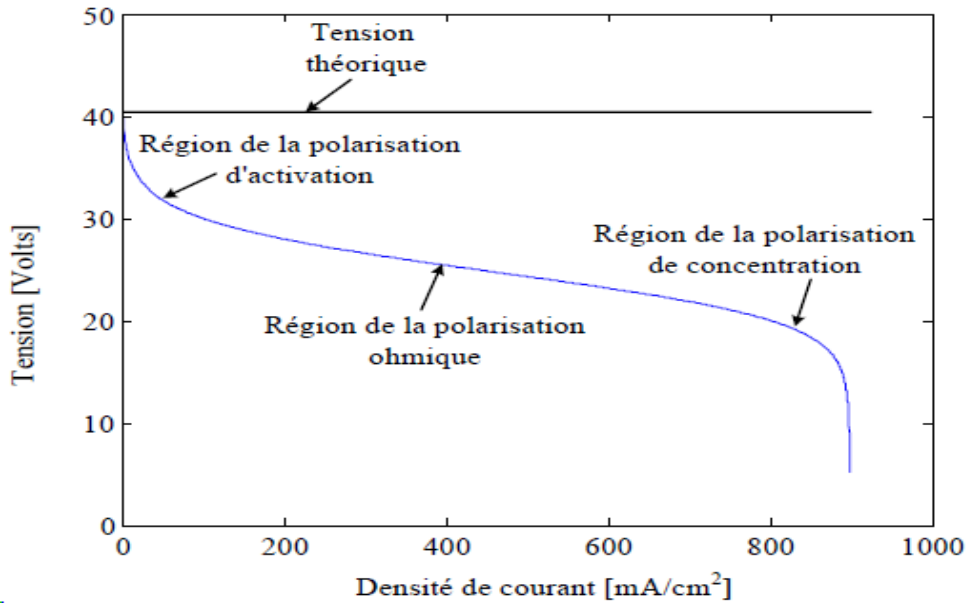


Fig 1.3: Caractéristique tension-courant d'une pile PEM [Pay09].

1.2.5.1 Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel:

$$V_{act} = A \cdot \ln \left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0} \right) \quad (1.8)$$

où I_{FC} est le courant délivré par la pile à combustible, i_0 le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode - électrolyte, i_n le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et A la pente de la droite de Tafel.

1.2.5.2 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_m \cdot (I_{FC} + i_n) \quad (1.9)$$

où R_m est la résistance totale de la pile à combustible.

1.2.5.3 Pertes de concentration

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé (sa pression tomberait à zéro), et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse:

$$V_{conc} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right) \quad (1.10)$$

1.3 Batterie

Les batteries sont des sources électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement, et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement. Les batteries peuvent être classées en batteries primaires ou secondaires. Les batteries primaires (les piles) sont utilisées une seule fois parce que les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont irréversibles. Les batteries secondaires (les accumulateurs), les seules qui nous intéressent dans ce mémoire, sont réutilisables. Dans ces batteries, les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont réversibles .

Les batteries sont généralement composées de plusieurs cellules empilées ensemble, la tension d'une cellule élémentaire étant faible (de l'ordre au maximum de quelques volts). Une cellule est une unité complète qui possède toutes les propriétés électrochimiques. Fondamentalement, une cellule de batterie est constituée de trois éléments : deux électrodes (positive et négative) immergées dans un électrolyte [TAL14].

1.3.1 Principe de fonctionnement

Un accumulateur est un dispositif électrochimique qui permet la conversion réversible d'énergie chimique en énergie électrique. En charge, l'énergie électrique est convertie et stockée sous forme d'énergie chimique à travers des réactions d'oxydoréduction. En décharge, l'élément fonctionne en mode générateur. Dans ce cas, l'énergie chimique est convertie en énergie électrique, et les réactions inverses se produisent aux électrodes.

Un accumulateur est constitué principalement, de deux électrodes qui permettent de stocker les électrons à l'issue des réactions électrochimiques d'oxydoréduction. Ces électrodes sont immergées dans l'électrolyte qui permet le transport des espèces ioniques d'une électrode à l'autre. Le séparateur permet l'isolation électrique pour assurer le passage des électrons via le circuit électrique extérieur. Enfin, pour assurer le contact avec ce circuit extérieur, des collecteurs de courant, bons conducteurs électroniques, sont présents à chaque électrode. La figure (1.4) présente le schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur pour les modes de décharge (a) et de charge (b).

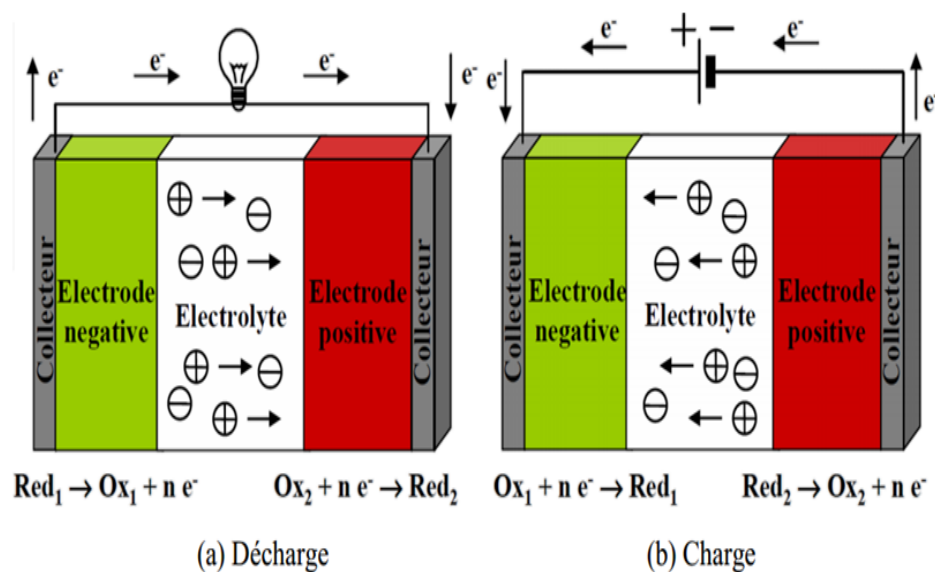


Fig 1.4: principe de fonctionnement d'un accumulateur en décharge, en charge .

Généralement, on entend par accumulateur la cellule électrochimique composée de deux électrodes et de l'électrolyte. La dénomination batterie désigne plutôt l'ensemble de cellules connectées en série ou/et en parallèle, d'où le nom de batterie d'accumulateur. Néanmoins, le terme de batterie est souvent appliqué à la cellule seule ou élément. Pour distinguer les électrodes, en considérant la décharge, l'électrode négative est appelée anode car elle est le siège de réactions d'oxydation et l'électrode positive, siège de réactions de réduction, est appelée cathode. En revanche, en charge, les réactions aux électrodes sont inversées: oxydation à la positive et réduction à la négative. Avec les avancées technologiques, plusieurs batteries ont été développées dans l'histoire, des premières batteries plomb jusqu'aux fameuses batteries lithium d'aujourd'hui [Edd13].

1.3.2 Modélisation des batteries

Le modèle le plus simple d'une batterie est représenté sur la (Figure 1.5). Il est constitué d'une source de tension correspondant à la tension de circuit ouvert V_o en série avec une résistance ($r_s = R_{ohm} + R_{int}$) constituée de deux termes. R_{int} (résistance interne) terme variable représente la réaction chimique et correspond aux chutes de tension dues à une réaction d'activation et à la concentration d'électrolytes. R_{ohm} (résistance ohmique) est constante et correspond à la résistance des conducteurs.

La détermination analytique exacte de la résistance ou de la chute de tension de la batterie est difficile et est généralement obtenue par des essais expérimentaux. La chute de tension augmente avec une augmentation du courant de décharge et une diminution de l'énergie stockée.

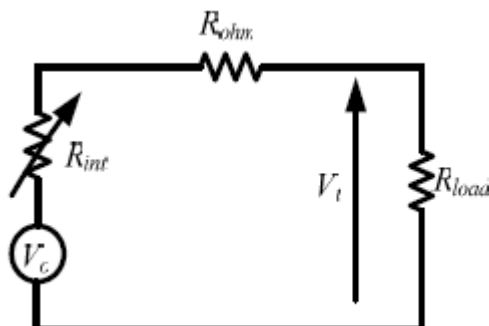


Fig 1.5: Modèle simple d'une batterie [Zan10].

La tension de sortie ($V_t = V_o - r_s I$) est régie par la loi classique des générateurs de tension non idéaux. Ce modèle de base est particulièrement simple à mettre en application,

mais il ne tient pas compte des variations d'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge, de la concentration en électrolyte, de la température ou encore du nombre de cycles qu'a déjà subi la batterie. Ce modèle ne permet donc pas d'obtenir un modèle précis de comportement dynamique, mais il peut être suffisant lors d'un premier dimensionnement d'équipement d'électronique de puissance [Zan10].

1.3.3 État de charge de la batterie (SoC_B)

L'état de charge d'une batterie est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. L'état de charge est un paramètre très important pour gérer correctement la batterie [Moh16].

$$SoC_B(t) = SoC_B(t_0) - \frac{1}{C_N} \int_{t_1}^{t_2} I_B(t) dt \quad (1.11)$$

Où, $SoC_B(t_0)$ est l'état de charge initial, $I_B(t)$ représente le courant traversant la batterie et C_N la capacité nominale de la batterie exprimée en Ah ($1 Ah = 3600 C$) [Mon09]. Tout comme la capacité, cet indicateur dépend des conditions de mesures, notamment, la température.

Remarque

Il y a d'autres indicateurs qui caractérisent les batteries, la profondeur de décharge (DoD) qui est le rapport entre la capacité utile et la pleine capacité de la batterie et l'état de santé (SoH) qui prend en compte les pertes de capacité dues à la dégradation de la batterie. Le (SoH) est défini par le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité totale obtenue lorsque la batterie était neuve [Sad13].

$$DoD = 1 - SoC_B \quad (1.12)$$

$$SoH = \frac{C_{Actuelle}^{Tot}}{C_{Neuve}^{Tot}} \quad (1.13)$$

La connaissance de ces indicateurs permet d'identifier en temps réel le mode de fonctionnement de la batterie.

Type de batterie	$E_B(V)$	Anode	Cathode	Électrolyte
Acide-Plomb	2.1	PbO_2	Pb	H_2SO_4
Nickel-Cadmium	1.2	Ni	Cd	KOH
Nickel-Fer	1.2	Ni	Fe	KOH
Nickel-Zinc	1.7	Ni	ZnO_2	KOH
Nickel-Métal Hydrure	1.23	Ni	Métal Hydrure	KOH
Aluminium-Air	1.5	Al	O_2	KOH
Zinc-Air	1.65	Zn	O_2	KOH
Sodium-Soufre	2.1	S	Na	βAl_2O_3
Sodium-Nickel	2.1 – 2.2	$NiCl$	Na	βAl_2O_3
Lithium-Sulfate de Fer	1.75 – 2.1	FeS_2	$LiAl$ ou $LiSi$	$LiCl/KCl$
Lithium-Ion	3.6	Intercalation de carbone	$LiCoO_2$	Organique

Tableau 1.2: Matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques [Pai10].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de piles à combustible et batteries électrochimiques, leurs caractéristiques et principes de fonctionnement. Ainsi que le modèle statique de la PàC de type PEMFC et le modèle simplifié des batteries. La pile à combustible (FC) peut être utilisée comme une source principale. Elle peut fournir une énergie propre, mais son coût est très élevé par rapport aux sources d'énergie conventionnelles (batteries).

CHAPITRE 2

COMMANDE PAR PASSIVITÉ ET LOGIQUE FLOUE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va introduire la commande basée sur la passivité et la logique floue dédiés à un système hybride; où la pile à combustible est la source principale et une batterie est une source secondaire; en contrôlant la tension du bus continu à travers la commande des convertisseurs DC/DC.

2.2 Commande par la logique floue

De façon générale, un système de commande a pour objectif de piloter l'entrée d'un processus afin d'obtenir un fonctionnement correct de ce dernier. Lorsqu'on dispose d'un modèle plus ou moins précis du système à commander, on peut utiliser un contrôleur de structure standard, fixe ou adaptatif, dont les paramètres seront évalués à partir du modèle. Malheureusement, lorsque le système est difficilement modélisable, la conception du contrôleur peut s'avérer très complexe, sinon impossible.

Lorsqu'un opérateur humain commande manuellement un système, les actions qu'il réalise sont dictées par une connaissance subjective du fonctionnement de ce système. Par exemple, s'il fait "froid" dans une pièce, on "augmente" le chauffage ; s'il fait "très froid", on "chauffe plus". Cette commande du système peut être envisagée de façon différente selon la personne qui la réalise : la sensation de "froid" n'est pas directement liée à une

mesure de la température.

Ce principe est à la base de la commande floue. La mesure réalisée sur le système ("température ") est prise en compte par l'intermédiaire d'une variable linguistique ("froid", "tiède", "chaud"), qui est issue d'une analyse par un expert humain. Ensuite, l'action à réaliser est déduite à la fois d'un ensemble de règles de commande ("s'il fait froid, on chauffe plus" . . .) et de l'état du système, qualifié par la variable linguistique. Enfin, la commande finale du système est créée en utilisant les conclusions de la déduction . En résumé, un contrôleur flou comporte les différents éléments suivants [Dia10] :

- Un sous-système d'interface avec le flou, composé en général d'un ensemble de variables linguistiques.
- Une base de connaissances : "base de données" et "base de règles linguistiques de commande".
- Un sous-système réalisant un raisonnement en utilisant des méthodes issues de la logique floue.
- Un sous-système d'interface avec le non flou, qui fournit la ou les commandes envoyées au système.

La figure (2.1) montre la structure générale d'un contrôleur flou. Le fonctionnement précis de chacun des sous-ensembles est décrit dans la suite de ce chapitre.

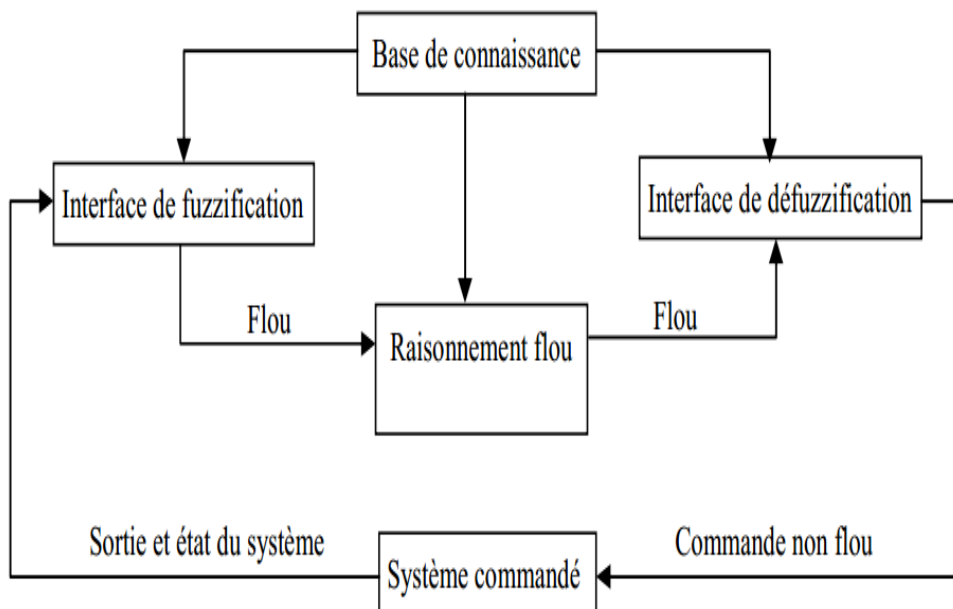


Fig 2.1: Configuration générale d'un contrôleur flou.

2.3 Contrôle par la logique floue

On peut représenter un système de type MISO ou MIMO (*Multi-Inputs Single-Output* ou *Multi-Inputs Multi-Outputs*) par l'approche de Mamdani qui nous donne un système flou où les entrées sont la quantité d'hydrogène (QH_2), l'état de charge de la batterie (SoC_B) et la sortie est le courant de référence désiré de sources la batterie \bar{I}_B ; ce courant de référence est utilisé dans la commande basée sur la passivité (PBC), comme le montre la figure (2.2).

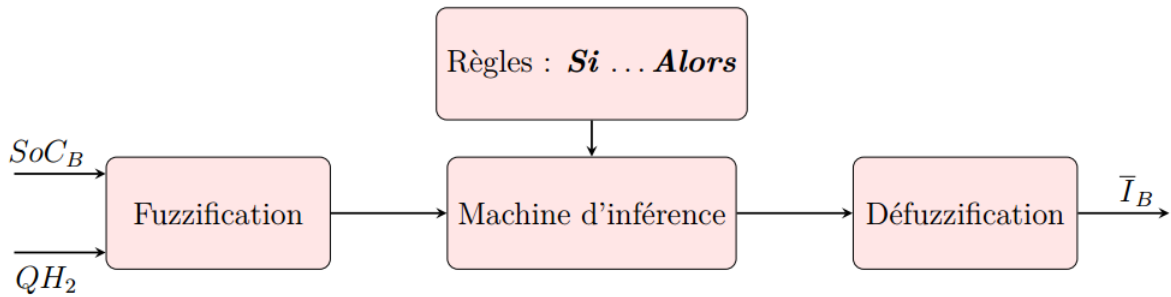


Fig 2.2: Schéma explicatif de la logique floue.

2.4 Interface de fuzzification

La fuzzification a pour rôle la conversion d'une grandeur physique en une grandeur linguistique. Il s'agit d'une projection de la variable physique sur les ensembles flous la caractérisant. Cette opération permet d'avoir une mesure précise sur le degré d'appartenance de la variable d'entrée à chaque ensemble flou. Pour chaque variable d'entrée et de sortie sélectionnée, nous définissons deux ou plusieurs fonctions d'appartenance (*membership functions (MF)*), généralement trois, mais peuvent être plus. Nous devons définir une catégorie qualitative pour chacune d'entre eux, par exemple : faible, moyenne ou élevée. Souvent les formes triangulaires et trapézoïdales sont les plus utilisées comme des fonctions d'appartenance, bien qu'il n'existe pas de règles précises sur ce choix.

Dans le cadre de ce chapitre, l'état de charge de la batterie (SoC_B) est classé en trois statuts différents appelés $SoC_B(Bas)$, $SoC_B(Moy)$ et $SoC_B(Haut)$. De même, la quantité d'hydrogène est attribué en trois régions $QH_2(Bas)$, $QH_2(Moy)$ et $QH_2(Haut)$.

2.5 Base de règles du système

La base de règles floues est un ensemble de règles linguistiques définies avec la condition (*Si... Alors...*). Les règles de nombre M ($j = 1, 2, \dots, M$) sont représentées par la condition suivante [KEK10] :

$$\text{Règle } j : \text{ **Si** } x_1 \text{ est } A_1^j \text{ et } x_2 \text{ est } A_2^j \text{ et } \dots \text{ et } x_n \text{ est } A_n^j \text{ **Alors** } y \text{ est } B^j \quad (2.1)$$

Où x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) sont les paramètres d'entrée de la logique floue et la variable de sortie est notée y . Les fonctions d'appartenance $\mu_{SoC_{B_i^j}}(x_i)$ et $\mu_{QH_{2_i^j}}(x_i)$ sont représentées comme un terme d'entrée linguistique A_i^j . B^j est un terme linguistique pour la sortie floue [MBA+13].

2.6 Machine d'inférence floue

La machine d'inférence floue est une logique de prise de décision qui convertit les différentes entrées fuzzifiées en sorties floues selon la base de règles. Dans notre système, la sortie floue est décidée par les règles assignées pour SoC_B et QH_2 .

2.7 Interface de défuzzification

la défuzzification est la transformation d'une information floue en une information déterminée (concrétisation). Les valeurs obtenues, lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles floues de la variable de sortie, définissent une fonction d'appartenance. Il s'agit de convertir cette information en des grandeurs déterminées (non floues ou nettes). Parmi les stratégies de défuzzification, on cite la méthode du centre de gravité, la méthode du maximum et la méthode de la moyenne des maximums.

2.7.1 Avantages et inconvénients de réglage par logique floue

2.7.1.1 Avantages

Les avantages principaux des régulateurs flous sont les suivants :

1. L'incorporation directe des informations floues et linguistiques, provenant d'un expert humain, dans le système flou.
2. Il n'y a pas nécessaire de faire un modèle mathématique du système à régler.
3. Le système flou est un approximateur universel, c'est-à-dire, il est suffisamment générale pour générer n'importe quelle action.
4. La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain.
5. On peut maîtriser les systèmes non linéaires et difficiles à modéliser.

2.7.1.2 Inconvénients

1. Manque de directives précises pour la conception d'un régulateur .
2. Précision de réglage en général peu élevé.

2.8 Commande basée sur la passivité (IDA PBC)

2.8.1 Principe

Cette approche utilise la commande basée sur la passivité (PBC Passivity Based Controller) pour la gestion d'énergie du système hybride. Elle consiste à développer une commande linéaire ou non- linéaire ayant les mêmes objectifs que les stratégies précédentes et garantissant directement la stabilité du système bouclé au travers de la régulation du flux de puissance par balance d'énergie.

La commande basée sur la passivité (PBC) est une technique bien établie pour la commande des systèmes mécaniques. Cette dénomination a été introduite pour la première fois dans [OS89] pour définir une méthodologie de conception de commandes assurant la stabilité des systèmes en les rendant passif. La PBC permet d'obtenir des contrôleurs

robustes qui ont une interprétation physique claire en termes d'interconnexions du système avec son environnement. De plus, la PBC dispose d'une stabilité robuste vis-à-vis des effets dissipatifs non modélisés et exhibe des performances robustes.

Un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u; x \in \mathfrak{R}^n; u \in \mathfrak{R}^m \\ y = h(x); y \in \mathfrak{R}^m \end{cases} \quad (2.2)$$

est dit passif par rapport à la fonction de cadence d'approvisionnement $s(u, y) = u^T y$, s'il existe une fonction non négative C^0 , appelée fonction de stockage, $H : \mathfrak{R}^n \longrightarrow \mathfrak{R}^+$, vérifiant $H(0) = 0$, et telle que toutes conditions initiales x_0 , pour tout $t > 0$ et toute entrée de commande $u(\cdot)$, l'inégalité suivante est vérifiée:

$$H(x(t)) - H(x_0) \leq \int_0^t u^t(s)y(s)ds \quad (2.3)$$

C'est-à-dire, la quantité d'énergie stockée dans un intervalle de temps n'est jamais supérieure à l'énergie totale fournie durant cette période.

Les conséquences immédiates de la passivité sont que :

Si $x = 0$ et $y = 0$ alors la fonction d'énergie H est décroissante. Donc, les systèmes passifs avec une fonction de stockage H définie positive sont stables au sens de Lyapunov. Le lecteur souhaitant approfondir cette analyse peut se référer à pour obtenir des détails supplémentaires.

La PBC définit donc une méthode de synthèse d'un contrôleur qui stabilise le système étudié en le rendant passif. Plus précisément, cet effet stabilisant s'obtient en injectant l'amortissement nécessaire dans le système afin d'amener une fonction d'énergie vers un minimum à l'équilibre souhaité. Bien qu'il y ait beaucoup de variantes à cette idée fondamentale, la PBC peut être largement classifiée dans deux grandes catégories. La PBC classique pour laquelle le concepteur de l'asservissement choisit à priori la fonction de stockage (en générale quadratique), puis conçoit le contrôleur qui rend la fonction de stockage non croissante.

Dans la seconde classe de PBC, la fonction de stockage de la boucle fermée est libre, mais le concepteur s'impose une structure de contrôle, par exemple Lagrangienne ou Hamiltonienne commandé par port (PCH). Il caractérise ensuite l'ensemble des fonctions

d'énergie assignables. Cette caractérisation est donnée en termes de solutions d'équation différentielles partielles (EDP). Les exemples les plus notables de cette approche sont les systèmes Lagrangienne, et une nouvelle méthodologie d'élaboration de la commande appelée Assignation de l'Interconnexion et de l'Amortissement (IDA-PBC), Interconnetion and Damping Assignment approach). C'est cette dernière méthode que nous avons adoptée dans ce travail.

L'approche PCH consiste, tout d'abord, à identifier la fonction d'énergie naturelle du système que l'on nommera $H(x)$, puis de réécrire le système non linéaire de (éq 2.2) en fonction du gradient de la fonction d'énergie [Azi10] :

$$\nabla H(x) = \left[\frac{\partial H}{\partial x_1}(x) \quad \frac{\partial H}{\partial x_2}(x) \quad \dots \quad \frac{\partial H}{\partial x_n}(x) \right]^T \quad (2.4)$$

Ainsi, la forme PCH du système initiale (éq 2.2) est :

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - \mathfrak{R}(x)] \nabla H(x) + g(x)u \\ y = g^T(x) \nabla H(x) \end{cases} \quad (2.5)$$

où y est la sortie considérée, $J(x)$ est une matrice antisymétrique de dimension $n \times n$ représentant les interconnexions entre les états, et $\mathfrak{R}(x)$ est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

L'équation (2.5) montre que la structure PCH fournit des renseignements énergétiques essentiels à la synthèse du système bouclé. Ainsi, la matrice d'interconnexion $J(x)$ donne d'ores et déjà une indication sur l'échange ou la balance d'énergie entre les variables, tandis que la propriété de semi-définie positive de la matrice d'amortissement $\mathfrak{R}(x)$ indique que les termes appartenant à cette matrice sont des termes associés à la dissipation.

Pour mettre en place la méthodologie de l'Assignation de l'Interconnexion et de l'Amortissement, prenant l'exemple du système non-linéaire donné par 1, que l'on veut stabiliser autour d'un point d'équilibre $\bar{x} \in \mathfrak{R}^n$. Le système (2.2) en boucle fermée avec la commande u , telle que :

$$u = \left[g^T(x).g(x) \right]^{-1} g^T(x) \{ [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x) \nabla H_d - f(x)] \} \quad (2.6)$$

À la forme PCH suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \\ y = g^T(x) \nabla H_d \end{cases} \quad (2.7)$$

On peut démontrer que le système est asymptotiquement stable si, de plus, on vérifie la condition suivante; le plus grand ensemble invariant du système en boucle fermée (2.7) contenu dans $\{x \in \mathfrak{R}^n \mid \dot{H}_d = 0\}$ est égale à \bar{x} .

2.8.2 Conclusion

Dans ce chapitre une brève introduction de la notion de Passivité et de la Commande-Basée sur la Passivité (PBC) est donnée. Une commande récente est la PBC par Assignation d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA-PBC).

D'un point de vue mathématique, un système flou définit une relation non linéaire d'un espace d'entrée vers un espace de sortie, et d'un point de vue logique, un système flou est une machine de prise de décision composée de deux parties essentielles : la Contrôle par la logique floue et la commande par la logique floue. L'architecteur d'un système flou est déterminée par une meilleure compréhension des ensembles flous et des opérateurs flous.

CHAPITRE 3

COMMANDE DU SYSTÈME HYBRIDE PÀC/BATTERIE

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce travail une conception d'une source d'alimentation hybride DC en utilisant une pile à combustible comme source d'énergie principale et une batterie comme unité de stockage auxiliaire. Ce système hybride constitue un système non linéaire où nous voulons le commander par la commande basée sur la passivité et la logique floue.

3.2 Structure de la source d'énergie hybride

La (Figure 3.1), montre la source d'énergie hybride étudiée inclue un bus continu « *DC link* » alimenté par une pile à combustible (FC) via un convertisseur élévateur DC/DC, ce qui met à jour la tension V_{DL} à sa valeur de référence V_d , et une batterie comme source secondaire, qui est connecté au bus continu par un convertisseur bidirectionnel DC/DC.

La charge est alimentée par les deux sources durant les phases permanentes et les phase transitoires et la batterie se recharge durant les phases de récupération de l'énergie.

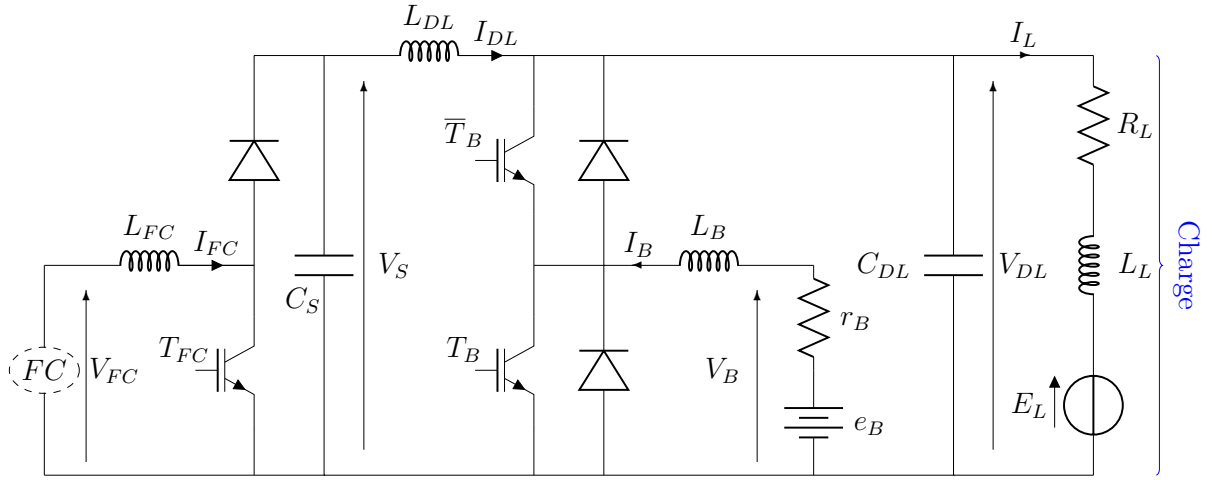


Fig 3.1: Structure de la source hybride FC/Batterie.

3.3 Modélisation du système

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse de différentes séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T . Chaque état est représenté par une équation différentielle.

- Lorsque T_{FC} est fermé:

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} \\ I_{FC} = C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

- Lorsque T_{FC} est ouvert:

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} + V_S \\ I_{FC} = C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \end{cases} \quad (3.2)$$

En posant $U_{FC} = 1$ lorsque l'interrupteur T_{FC} est fermé et $U_{FC} = 0$ pour T_{FC} ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique, que nous qualifions de modèles instantanés. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$\begin{cases} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S] \\ C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} = [(1 - U_{FC}) I_{FC} - I_{DL}] \end{cases} \quad (3.3)$$

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande U et les variables d'état V_S et I_{FC} .

$$\begin{cases} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S] \\ \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} - I_{DL}] \end{cases} \quad (3.4)$$

$$U_B = 1 \implies \begin{cases} T = 1 \\ \bar{T} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad U_B = 0 \implies \begin{cases} T = 0 \\ \bar{T} = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_S - V_{DL}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_B) \cdot I_B - I_L] \end{cases} \quad (3.5)$$

avec: $V_b = e_B - r_B I_B$

$$\begin{cases} \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B I_B - (1 - U_B) \cdot V_{DL}] \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} - I_{DL}] \\ \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_B) \cdot I_B - I_L] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_S - V_{DL}] \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B I_B - (1 - U_B) \cdot V_{DL}] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{cases} \quad (3.8)$$

U_{FC} : la commande du convertisseur élévateur de la pile à combustible (FC).

U_b : la commande du convertisseur bidirectionnel de la batterie.

Selon la structure de la source hybride de la (Figure 3.1), le modèle global du système est écrit dans l'espace d'état sous la forme suivante:

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [V_S, I_{FC}, V_{DL}, I_{DL}, I_B, I_L]^T$$

Le modèle global de variable d'état d'ordre six est alors:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC}).x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}).x_1] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [x_4 + (1 - U_B).x_5 - x_6] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B x_5 - (1 - U_B).x_3] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_L} [x_3 - R_L x_6 - E_L] \end{cases} \quad (3.9)$$

Le modèle statique de la pile est donné comme suit:

$$V_{FC} = E_0 - A.\ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) - R_m.(I_{FC} + i_n) - B.\ln\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L}\right) \quad (3.10)$$

Avec: $V_{FC} = f(x_2)$.

E_0 est la tension mesurée en circuit ouvert, I_{FC} est le courant fourni, i_0 est le courant d'échange, A est la pente de la ligne de Tafel, i_L est le courant de limite, B est la constante du transfert de masse, i_n est de le courant interne et R_m est la résistance de membrane et de contacts.

Dans la suite, V_{FC} sera considéré comme perturbation mesurée, et de la considération physique, $V_{FC} \in [0; V_d]$, où V_d est la tension désirée du bus continu.

La figure (3.2) montre la structure globale de la commande de notre système hybride (pile à combustible/batterie). Dans cette structure les signaux de commande sont générés par la commande par passivité et le courant désiré de la batterie \bar{I}_B est déterminé par la logique floue en fonction de l'état de charge de la batterie SoC_B et la quantité de l'hydrogène QH_2 .

3.4 gestion de l'énergie

Dans ce système source hybride, nous voulons voir le comportement du système . Le vecteur d'espace d'état à l'équilibre est :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6]^T$$

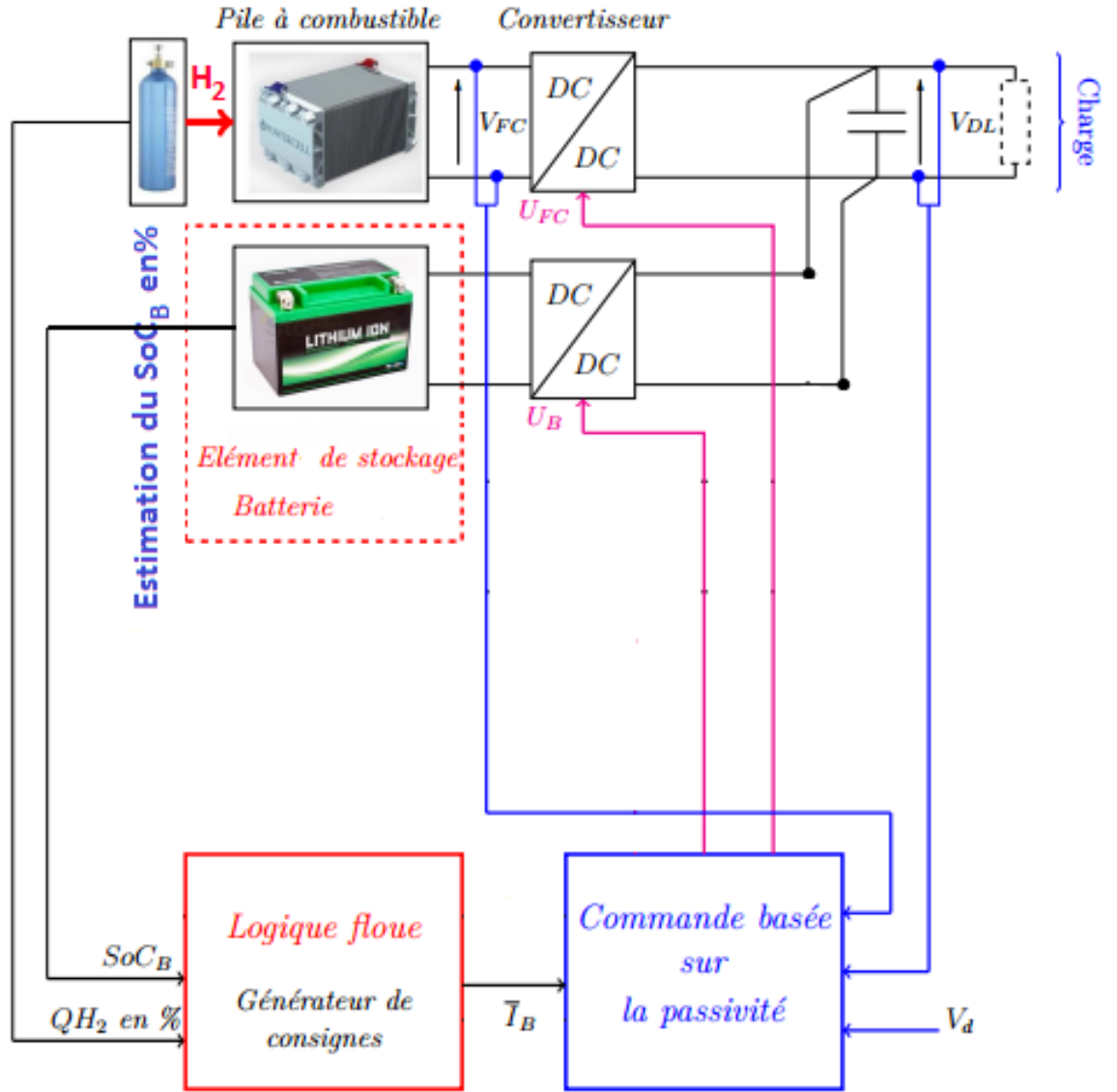


Fig 3.2: Structure globale de la commande du système hybride.

A l'équilibre, le système de l'équation (3.9) devient :

$$\begin{cases}
 \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\bar{\mu}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_4] \\
 \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\bar{\mu}_1 \bar{x}_1 + V_{FC}] \\
 \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\bar{x}_4 + \bar{\mu}_2 \bar{x}_5 - \bar{x}_6] \\
 \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\
 \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{L_B} [-\bar{\mu}_2 \bar{x}_3 - r_B \bar{x}_5 + e_B] \\
 \dot{\bar{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_3 - R_L \bar{x}_6 - E_L]
 \end{cases} \quad (3.11)$$

Après des simples calculs, nous définissons :

$$\bar{x} = \left[V_d, \bar{I}_{FC}, V_d, \bar{I}_{DL}, \bar{I}_B, \frac{V_d - E_L}{R_L} \right]^T \quad (3.12)$$

À partir du système (3.11), nous pouvons exprimer le vecteur de la commande $\bar{\mu}$ par :

$$\begin{cases} \bar{\mu}_1 = \frac{1}{V_d}(V_{FC} - L_{FC}\dot{\bar{x}}_2) \\ \bar{\mu}_2 = \frac{1}{V_d}(e_B - r_B\bar{x}_5 - L_B\dot{\bar{x}}_5) \end{cases} \quad (3.13)$$

Où $\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}), (1 - \bar{U}_B)]^T$.

et

$$\bar{V}_B = (e_B - r_B\bar{x}_5)$$

Où V_B est la tension de la batterie, e_B est la force électromotrice de la batterie, et r_B est la résistance interne de la batterie.

3.5 Fonction de l'énergie

La commande basée sur la passivité nécessite la connaissance de la fonction d'énergie désirée; la fonction d'énergie naturelle du système est :

$$H = \frac{1}{2}x^T Q x \quad (3.14)$$

Où $Q = \text{diag}\{C_S; L_{FC}; C_{DL}; C_B; L_B; L_L\}$ est une matrice diagonale. La fonction d'énergie désirée en boucle fermée est:

$$H_d = \frac{1}{2}\tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad (3.15)$$

Où $\tilde{x} = x - \bar{x}$ est le nouveau vecteur d'état, il définit l'erreur entre l'état x et sa valeur à l'équilibre \bar{x} . Le modèle d'état en fonction de l'erreur devient:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\mu_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_4 + (\mu_1 - \bar{\mu}_1) \cdot \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_1 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1) \cdot \bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\tilde{x}_4 + \mu_2 \tilde{x}_5 - \tilde{x}_6 + (\mu_2 - \bar{\mu}_2) \bar{x}_5] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{L_B} [-\mu_2 \tilde{x}_3 - r_B \tilde{x}_5 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \cdot \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_3 - R_L \tilde{x}_6] \end{cases} \quad (3.16)$$

3.6 Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC

La représentation PCH du système d'équations (3.16), par le gradient de l'énergie désirée (3.15), est donnée par l'équation suivante:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S}(\mu) - \mathfrak{R}] \nabla H_d + A \quad (3.17)$$

avec:

$$\nabla H_d = [C_S \tilde{x}_1; L_{FC} \tilde{x}_2; C_{DL} \tilde{x}_3; L_{DL} \tilde{x}_4; L_B \tilde{x}_5; L_L \tilde{x}_6]^T \quad (3.18)$$

et

$$[\mathfrak{S}(\mu) - \mathfrak{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & \frac{-1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DL} L_B} & 0 & \frac{-r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Où $\mathfrak{S}(\mu) = -\mathfrak{S}^T(\mu)$ est une matrice antisymétrique qui définit les interconnexions entre les variables d'état. $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}^T \geq 0$ est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \cdot \bar{x}_2] \\ \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1) \cdot \bar{x}_1] \\ \frac{1}{C_{DL}} [(\mu_2 - \bar{\mu}_2) \cdot \bar{x}_5] \\ 0 \\ \frac{1}{L_B} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2) \cdot \bar{x}_3] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

3.7 Loi de commande de IDA-PBC

La méthode *IDA – PBC* consiste à proposer une loi de commande qui stabilise le système au sens de Lyapounov, en modifiant les matrices $\mathfrak{S}(\mu)$ et \mathfrak{R} afin d'obtenir une dynamique en boucle fermée sous la forme de l'équation suivante:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S}(\mu) - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \quad (3.21)$$

Pour éliminer la matrice A , il faut choisir $\mu_1 = \bar{\mu}_1$ et $\mu_2 = \bar{\mu}_2$, mais l'amortissement naturel du système ne suffit pas pour atteindre rapidement les valeurs à l'équilibre.

Les lois de commande suivantes sont proposées :

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_B = \bar{U}_B - r \tilde{x}_5 \end{cases} \quad (3.22)$$

Où r est un paramètre positif qui représente un gain de réglage. En utilisant les lois de commande précédentes (3.22), (3.13) la fonction de la dérivée de l'erreur devient sous la forme de l'équation suivante:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S}(\mu) - \mathfrak{R}'] \nabla H_d + A' \quad (3.23)$$

Où

$$[\mathfrak{S}(\mu) - \mathfrak{R}'] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & \frac{-1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DL} L_B} & 0 & -\frac{r_B + rV_d}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\text{et } \mathfrak{R}' = \text{diag}\left\{0; 0; 0; 0; \frac{r_B + rV_d}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2}\right\} = \mathfrak{R}'^T$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r\bar{x}_5\tilde{x}_5}{C_{DL}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r\bar{x}_5}{C_{DL} L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \nabla H_d = \mathcal{F} \nabla H_d \quad (3.25)$$

$$[\mathfrak{R}' - \mathcal{F}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r\bar{x}_5}{C_{DL} L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r_B + rV_d}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Preuve de stabilité:

$$\dot{\hat{x}} = [\mathfrak{S}(\mu) - \mathfrak{R}'] \nabla H_d + \mathcal{F} \nabla H_d$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\hat{x}} = \nabla H_d^T \mathfrak{S} \nabla H_d - \nabla H_d^T [\mathfrak{R}' - \mathcal{F}] \nabla H_d$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T [\mathcal{F} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \leq 0$$

La dérivée de la fonction d'énergie désirée (3.15) au long de la trajectoire de (3.23) est non positive si et seulement si, la matrice suivante est définie non négative $[\mathfrak{R}' - \mathcal{F}] \geq 0$.

La matrice $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$ est définie semi-négative si et seulement si toutes ses valeurs propres sont négative. La matrice $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$ est une matrice triangulaire supérieure dont ses valeurs propres sont négatives : $0; 0; 0; 0; \frac{-r_B + rV_d}{L_B^2}; \frac{-R_L}{L_L^2}$, tandis que les constantes r, V_d, r_B, L_B, R_L et L_L sont positives. Alors, le système est globalement stable en boucle fermée.

3.8 Simulation et interprétation des résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en appliquant la commande basée sur la passivité et la logique floue au système non linéaire. Nous avons utilisé la base des règles floues donnée par le tableau (3.1). Dans ce tableau, nous avons neuf règles, par exemple :

$$\text{R\`egle 1 : } \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } \mu_{SoC_B(Bas)} \text{ et } x_2 \text{ est } \mu_{QH_2(Bas)} \ \mathbf{Alors} \ \bar{I}_B \text{ est } 0 \quad (3.27)$$

Si le SoC_B de la batterie et la quantité de H_2 sont dans le mode Bas , alors le courant de référence de la batterie est nul. Dans ce cas, la charge est alimentée uniquement par la pile à combustible.

$$\text{R\`egle 2 : } \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } \mu_{SoC_B(Moy)} \text{ et } x_2 \text{ est } \mu_{QH_2(Bas)} \ \mathbf{Alors} \ \bar{I}_B \text{ est } GPos^1 \quad (3.28)$$

Dans ce mode, la charge est alimentée par les deux sources simultanément.

$$\text{R\`egle 7 : } \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } \mu_{SoC_B(Bas)} \text{ et } x_2 \text{ est } \mu_{QH_2(Haut)} \ \mathbf{Alors} \ \bar{I}_B \text{ est } GNeg^2 \quad (3.29)$$

$QH_2 \backslash SoC_B$	Bas	Moy	$Haut$
Bas	0	$GPos$	Pos
Moy	Neg	Pos	Pos
$Haut$	$GNeg$	0	Pos

Tableau 3.1: La base des règles de la logique floue

¹GPos: Grand positif

²GNeg: Grand négatif

Les différents paramètres de la simulation de cette source hybride sont donnés dans les tableaux (3.2) et (3.3).

Les différents paramètres de simulation sont:

$E_L(V)$	$R_L(\Omega)$	$L_L(mH)$	$r(\Omega)$
10	10	10	0.01

Tableau 3.2: Les paramètres de la charge et la commande.

$C_S(\mu F)$	$C_{DL}(F)$	$e_B(V)$	$r_B(\Omega)$
300	30.10^{-3}	12	50.10^{-3}

Tableau 3.3: Les paramètres de la batterie et du bus continu.

La figure (3.3) présente le comportement de V_{DL} , sa référence V_d et le courant de la charge I_L . Il est claire de voir que V_{DL} suit bien sa référence V_d sans erreur statique et avec un léger dépassement acceptable, environ de 4.52% et le courant I_L tend vers sa valeur à l'équilibre $\frac{V_d - E_L}{R_L}$.

Les figures (3.4) et (3.5) montrent les réponses de la pile à combustible, V_{FC} , I_{FC} et de la batterie, V_B , I_B respectivement. Lorsque la quantité d'hydrogène est en baisse, l'alimentation de la charge se fait par les deux sources en régimes transitoire et permanent. Le courant I_B suit ainsi son signal de référence \bar{I}_B qui est considéré comme l'état de l'équilibre de I_B en PBC.

Les signaux commande U_{FC} du convertisseur Boost de la pile à combustible et U_B du convertisseur Buck-Boost de la batterie sont présentés par la figure (3.6).

Les figures (3.7), (3.9) montrent les variations de QH_2 et SoC_B selon les puissances de la pile à combustible et la batterie fournis à la charge. La puissance de la charge est obtenue à partir du système hybride par la somme des puissances du FC et de la batterie.

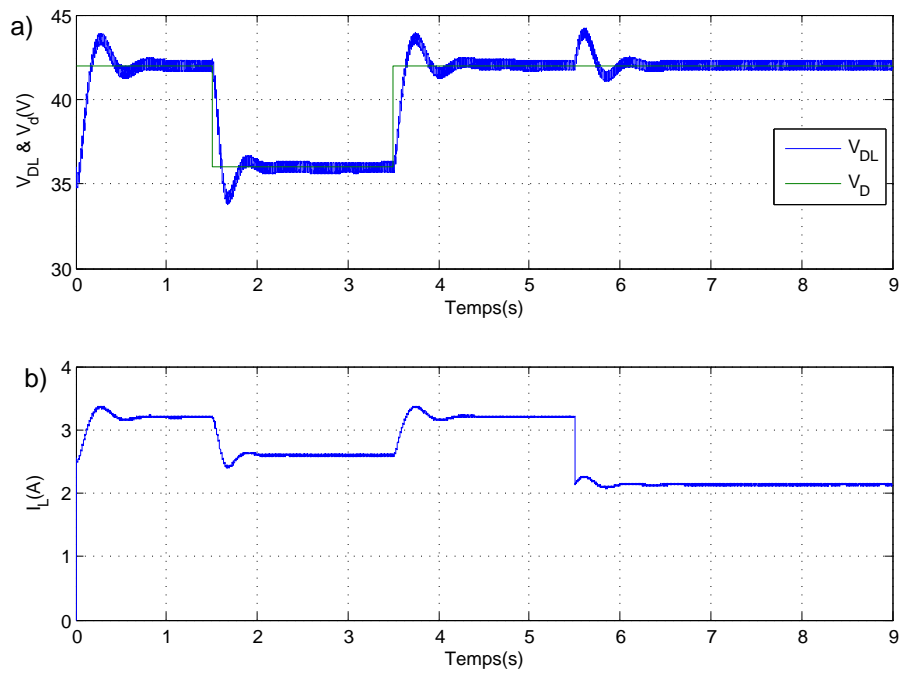


Fig 3.3: a) Tension de bus continu et sa référence.
b) Courant de la charge.

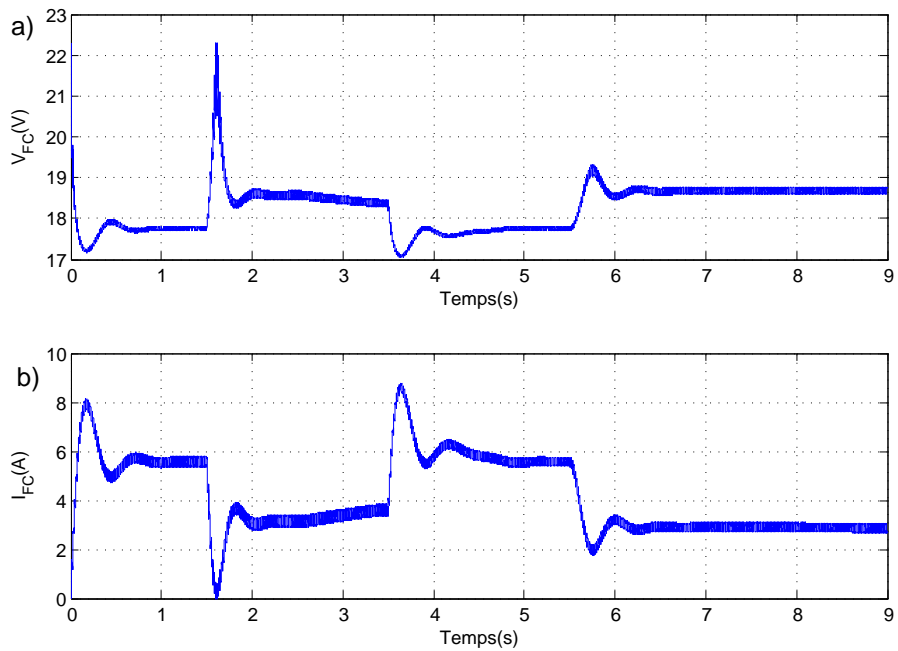


Fig 3.4: a) Tension de la pile à combustible.
b) Courant de la pile à combustible.

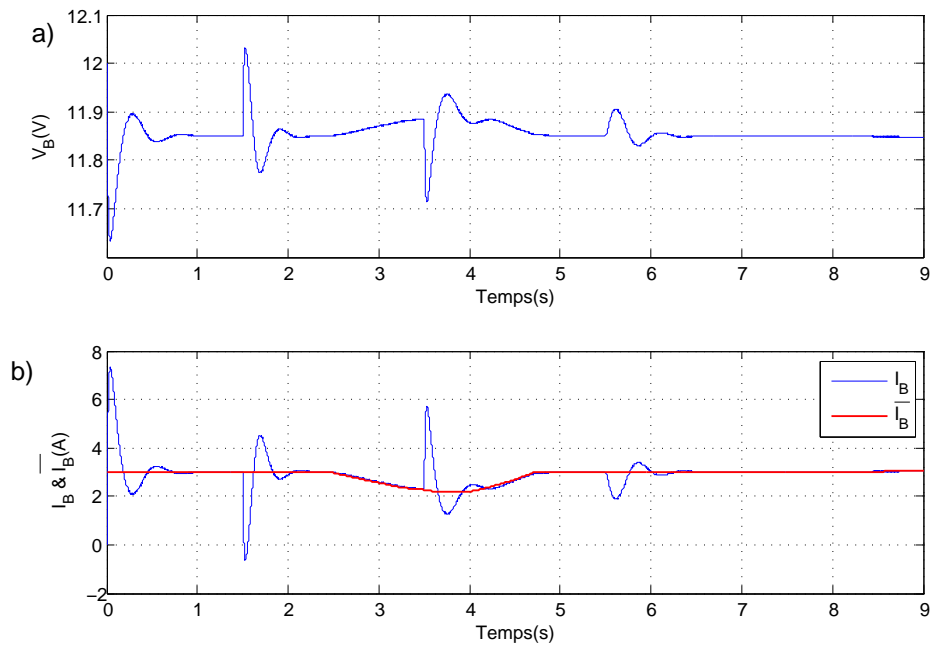


Fig 3.5: a) Tension de la batterie.
b) Courant de la batterie et sa référence.

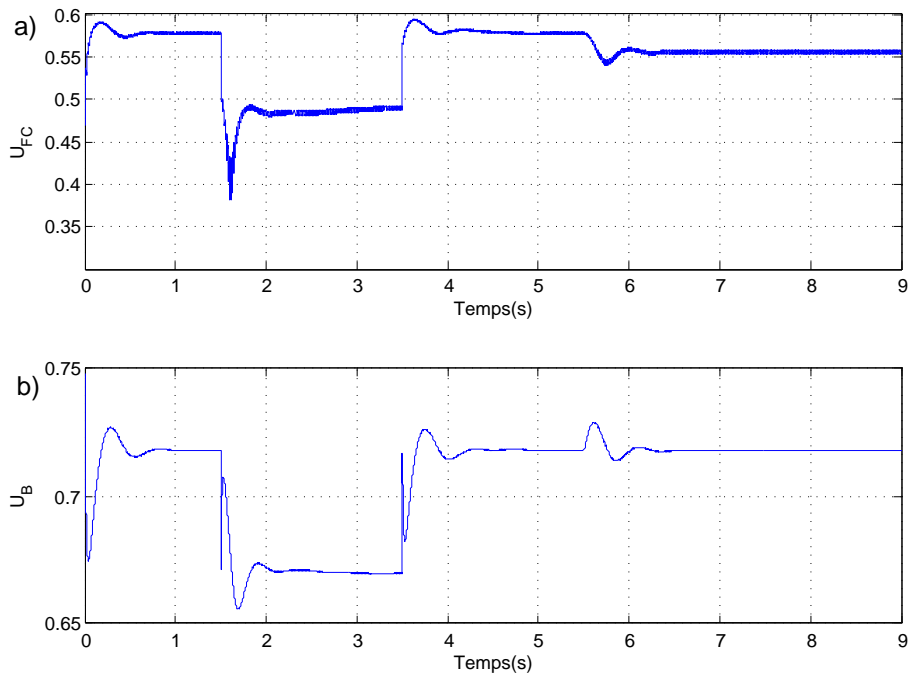


Fig 3.6: a) Commande du convertisseur Boost du FC.
b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie.

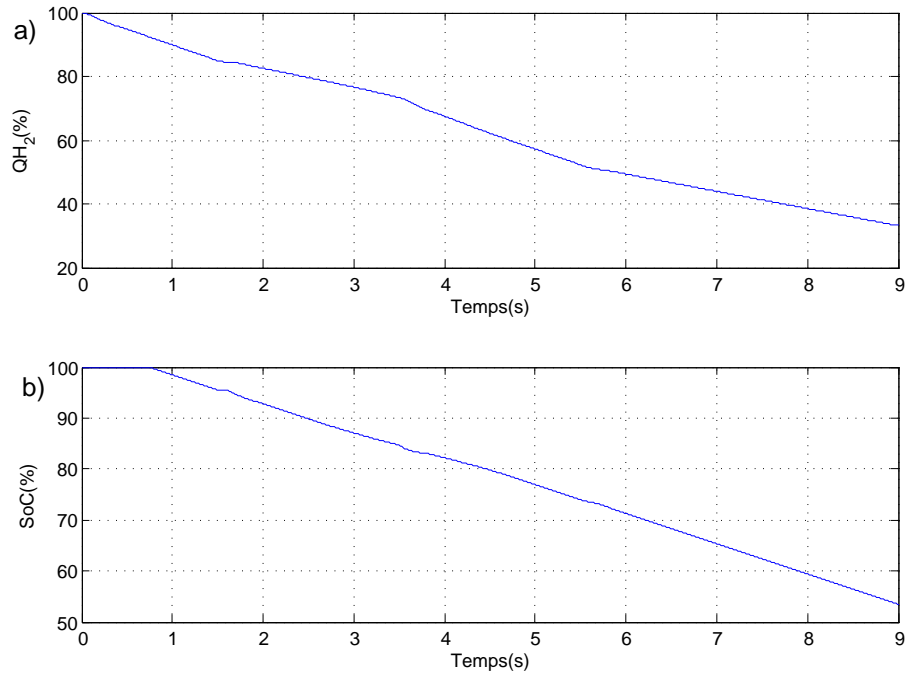


Fig 3.7: a) QH_2 de la pile à combustible.
b) SoC de la batterie.

Le changement de la résistance R_L de la charge à l'instant $t = 5.5$ s de 10 à $15(\Omega)$ est présenté par la figure (3.8). U_{FC} et U_B sont dans l'intervalle $[0, 1]$.

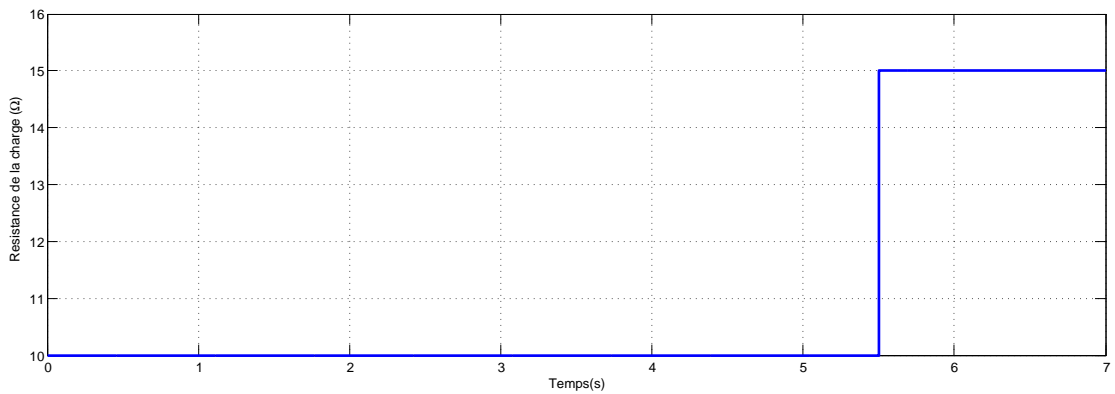


Fig 3.8: Transfert de puissances.

Figure (3.9) présente le transfert des puissances dans le système. Les pics de puissance sont absorbés ou fournis par la batterie P_B , ainsi une puissance douce est fournie par la pile à combustible P_{FC} .

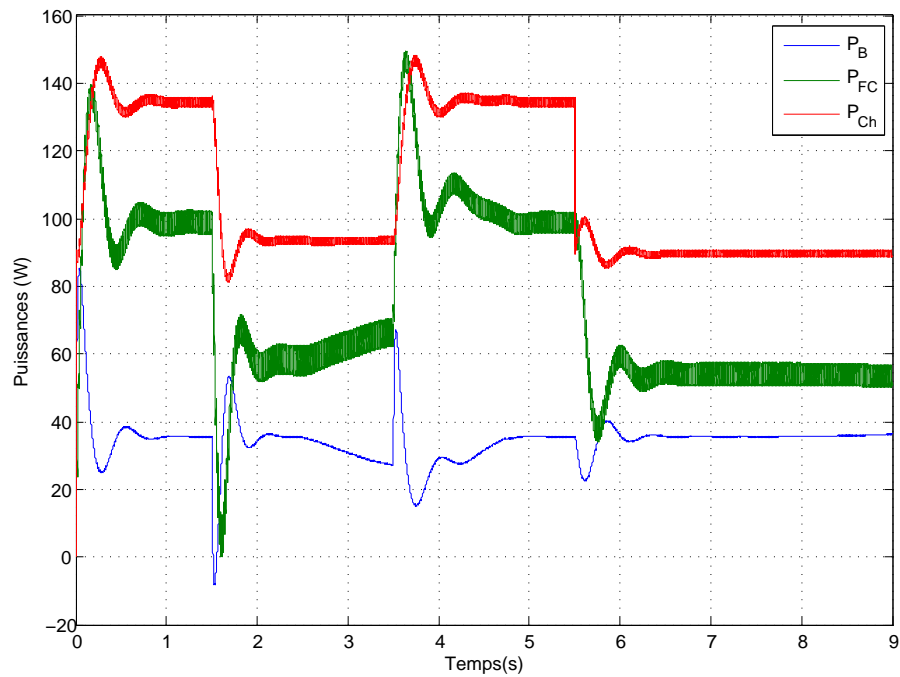


Fig 3.9: Transfert de puissances.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système de source hybride composé d'une pile à combustible comme source d'énergie et une batterie comme unité de stockage. Les lois de commande générées par la commande basée sur la passivité et en utilisant la logique floue pour partager la participation de chaque source à l'alimentation de la charge selon le tableau des règles floues, nous permettent d'obtenir des résultats très encourageants.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail de ce mémoire présenté ici a pour but l'étude de la structure d'un système hybride à pile à combustible destiné à la traction. En générale, la pile à combustible est hybridé avec un moyen de stockage pour couvrir les phases transitoires de fonctionnement (accélération, freinage). La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie utilisées sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique.

Cette étude, a mis en évidence dans ce type d'application, l'utilisation de la technologie PEM pour la pile à combustible et une batterie pour le système de stockage d'énergie.

Ce système hybride est équipé d'une pile à combustible liée au bus continu via un hacheur élévateur. Aussi, la nécessité d'utiliser des systèmes de stockage de l'énergie hybridés avec la PEMFC, afin d'avoir un système permettant un fonctionnement optimal. Le moyen de stockage est connecté au bus continu à travers un convertisseur DC/DC bidirectionnel. Ces deux convertisseurs ont permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de la puissance vers la charge.

Nous avons choisi, dans ce travail deux commandes: le contrôleur flou et le contrôleur basé sur la passivité. Le contrôleur flou a pour but l'optimisation de la consommation de l'hydrogène par l'exploitation de l'énergie de la batterie durant les phases permanentes et les phases transitoires. La deuxième commande, le contrôleur basé sur la passivité utilisant l'approche *IDA-PBC*, a pour rôle la modification de la matrice d'amortissement des systèmes hamiltoniens de notre système hybride étudié pour forcer le courant de la batterie de suivre sa référence générée par le contrôleur flou.

L'utilisation de ces deux contrôleurs donne une performance tout à fait acceptable en

offrant la robustesse nécessaire face aux variations de la charge. Les résultats obtenus montrent qu'ils permettent une bonne répartition de la puissance entre les sources et la charge.

BIBLIOGRAPHY

- [Azi10] Toufik Azib. *Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible: conceptions d'architectures et de leurs commandes*. PhD thesis, Paris 11, 2010. (pages 5, 22).
- [Dia10] MOKEDDEM Diab. *Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques*. PhD thesis, université de Jijel, 2010. (page 17).
- [Edd13] Akram Eddahech. *Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2013. (page 13).
- [KEK10] Lakmal Karunarathne, John T Economou, and Kevin Knowles. Model based power and energy management system for pem fuel cell/li-ion battery driven propulsion system. 2010. (page 19).
- [May10] Pierre Mayé. *Générateurs électrochimiques: Piles, accumulateurs et piles à combustible*. Dunod, 2010. (page 7).
- [MBA⁺13] M Mohammedi, M Becherif, MY Ayad, O Kraa, A Aboubou, and M Bahri. Passivity based control and fuzzy logic estimation applied to dc hybrid power source using fuel cell and supercapacitor. In *Systems and Control (ICSC), 2013 3rd International Conference on*, pages 77–82. IEEE, 2013. (page 19).
- [Mes16] Yassine Messaoudi. Modélisation d'un système hybride (pile à combustible et batterie) par la méthode des secteurs non linéaires, mémoire de master, université mohamed khider-biskra, 2016. (page 10).

- [Moh16] Messaoud Mohammedi. *Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016. (pages 4, 14).
- [Mon09] Maxime Montaru. *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2009. (page 14).
- [OS89] R. ORTEGA and M. SPONG. "adaptive motion control of grid robots: A tutorial", *Automatica*, Vol.25, pp.877-888, 1989. (page 20).
- [Pai10] Damien Paire. *Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010. (pages iv, 15).
- [Pay09] Alireza Payman. *Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges*. *PhD thesis, Polytechnic Institute of Lorraine, Nancy, France*, 2009. (pages iii, iv, 9, 10).
- [Sad13] Redha Sadoun. *Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain-dimensionnement et tests de cyclage*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2013. (page 14).
- [Sak13] Samah Saker. *Modélisation et contrôle du système, pile à combustible, convertisseurs et supercondensateur, mémoire de magister, université mohamed khider-biskra*, 2013. (pages 7, 8).
- [TAL14] Hicham TALBI. *Étude,modélisation et commande par platitude d'une source hybride batterie,supercondensateus,pile à combustible avec une éolienne,connecté via un transformateur multi enroulement pour une application microgrid*, 2014. (page 12).
- [Zan10] Majid Zandi. *Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2010. (pages iii, 13, 14).