

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Commande électrique**

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

Commande par platitude d'une source hybride (pile à
combustible et supercondensateur)

Présenté par :

Fouad Bouzinaoui

Soutenu le : 01 Juin 2015

Devant le jury composé de :

Mr. ABOUBOU Abdennacer

Mr. MOHAMMEDI Messaoud

Mr. HAMMOUDI Mohamed Yassine

Pr

M.A.A

M.A.A

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Commande électrique**

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Commande par platitude d'une source hybride (pile à combustible et supercondensateur)

Présenté par :

Bouzinaoui Fouad

Avis favorable de l'encadreur :

MOHAMMEDI Messaoud

signature

Avis favorable du Président du Jury

ABOUBOU. Abdennacer

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Thème :

Commande par platitude d'une source hybride (pile à combustible et supercondensateur)

Proposé par : Fouad Bouzinaoui

Dirigé par : Mr. MOHAMMEDI Messaoud

RESUMES :

Le but de ce travail est l'utilisation d'un système hybride constitué d'une pile à combustible comme source d'énergie principale et un supercondensateur comme source auxiliaire.

Les systèmes hybrides sont généralement connus comme une source où on met deux ou plusieurs sources de génération (ou de stockage) de l'énergie électrique pour assurer l'alimentation des différentes charges.

Le système hybride afin d'être plus fiable, nous avons utilisé une stratégie de commande appelée commande par platitude. L'importance de cette commande apparaît à la répartition de la puissance entre les sources et la charge et de capacité à s'adapter à toutes les situations.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو استعمال نظام هجين يتكون من خلية وقوديه هي المصدر الرئيسي للطاقة والمكثفات الفائقة كمصدر ثانوي للمساعدة.

الأنظمة الهجينة تعتبر عموما كمصدر للطاقة أين نضع مصدرين أو أكثر لتوليد (أو تخزين) الطاقة الكهربائية من اجل تأمين تغذية مختلف الحمولات.

من اجل أن يكون النظام الهجين أكثر نجاعة استعملنا طريقة التحكم التي تعرف بطريقة التسطیح. أهمية هذه الطريقة تكمن في إمكانية تسيير الطاقة بين مصادر التوليد و الحمولة و قدرتها على التأقلم مع كافة الحالات.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier « Allah » tout puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail. J'exprime toutes nos profondes reconnaissances à mon encadreur

***Mr. MOHAMMEDI MESSOUD** pour le temps consacré à nous écouter, nous orienter et nous corriger tout au long de notre projet. J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury d'accepter de juger ce modeste travail et je souhaite exprimé nos profondes gratitudes à tous les enseignants qui nous ont formé dès la 1^{ère} année jusqu'à la 5^{ème} année à Université Mohamed Khider Biskra.*

*Je tiens remercier **Mr. SAADI RAMZI** et tous les Amis pour ces services*

BOUZINAOU FOUAD

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À mes très chers parents, qui étaient

Toujours à mes cotés, non seulement

Durant ce travail, mais aussi tout

Au long de mes études.

- *Mon très cher père.*
- *Ma très chère mère.*
- *Tous mes frères et sœurs.*
- *À toute ma famille.*

-
À tout mes amis de DJAMOURAÏ, de BISKRA,

À toute la promotion d'électrotechnique.

À tous ceux qui, de près ou loin, par leur soutien

M'ont apporté un plus.

FOUAD BOUZINAOUÏ

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

I.1 Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
I.2 La pile à combustible :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.2. Fonctionnement d'une pile à combustible :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3. Les différents types de piles à combustible :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3.1. La pile alcaline (AFC) :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3.2. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3.3. La pile à acide phosphorique (PAFC) :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3.4. La pile à méthanol direct (DMFC) :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3.5. La pile à oxyde solide (SOFC) :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3.6. La pile à carbonates fondus (MCFC) :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.5. Applications des piles à combustibles :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.5.1 Applications portables :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.5.2 Applications stationnaires :	Erreur ! Signet non défini.
I.2.5.3 Applications embarquées :	Erreur ! Signet non défini.
I.3. Les supercondensateurs :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.1. Principe de fonctionnement :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2. Différents types de supercondensateurs :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2.1. Supercondensateurs pseudo capacitifs :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2.2. Supercondensateurs hybrides :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2.3. Supercondensateurs à double couche électrique :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.3. Applications courantes des supercondensateurs :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.4. Supercondensateurs avantages, inconvénients :	Erreur ! Signet non défini.
I.3.4.2. Les inconvénients :	Erreur ! Signet non défini.
I.4. Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude

II.1. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
II.2 Description et modélisation du système multi-sources:	Erreur ! Signet non défini.
II.2.1 Les équations du système :	Erreur ! Signet non défini.
II.2.2. Modélisation du convertisseur connecté à la PAC :	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3. Modélisation du convertisseur connecté au pack de supercondensateurs (Hacheur parallèle réversible en courant) :	Erreur ! Signet non défini.
II.4. Hybridation des dispositifs électrochimiques :	Erreur ! Signet non défini.
II.4.1. Concept d'hybridation :	Erreur ! Signet non défini.
II.5. Commande par platitude du système multi-sources :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.1. Stratégie de contrôle des sources hybrides :	Erreur ! Signet non défini.
II.5.2 Etude de la platitude des systèmes étudiés :	Erreur ! Signet non défini.
II.6. La commande par platitude :	Erreur ! Signet non défini.
II.6.1. Définition de la théorie de platitude :	Erreur ! Signet non défini.
II.6.2. Loi de contrôle :	Erreur ! Signet non défini.
II.6.3. Asservissement de la sortie plate à sa référence :	Erreur ! Signet non défini.
II.7. Conclusion :	37

Chapitre III : Commande de la source hybride : pile à combustible/ supercondensateurs

III. 1. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Les résultats de simulation :	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Conclusion :	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale	44

Liste des figures

Chapitre I :

(Fig. I. 1):Expérience de Sir W. Grove en 1839.

(Fig. I. 2) :Schéma de principe d'une cellule de pile a combustible

(Fig. I. 3) :schéma du principe des supercondensateurs

(Fig. I. 4) :Principe de la couche double électrique

(Fig. I. 5) :Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique

Chapitre II :

(Fig. II. 1):Description du système multi-sources étudié

(Fig. II.2) :Diagramme du système multi-sources

(Fig. **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**3) :Hacheur boost (élevateur) lié à la PAC

(Fig. **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**4) : Hacheur parallèle réversible en courant (Buck-boost)

(Fig. II.5):La régulation d'énergie de bus continu de la source hybride

(Fig. II.6) : La régulation d'énergie totale de la source hybride

Chapitre III :

(Fig. III. 1) :Le profil de charge

(Fig. III. 2):La tension V_{BUS} , V_{BUSREF} et le courant I_{Ch}

(Fig. **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**I. 3):La tension V_{FC} et le courant I_{FC} et sa référence

(Fig. **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**I. 4):La tension V_{SC} , le courant I_{SC} et sa référence

(Fig. III. 5):La puissance de P_{Ch} , P_{FC} et P_{SC}

Liste des figures

Liste des tableaux

Tableau. I.1: Comparaison des différents types de piles à combustible.

Tableau. I.2 : Tableau du principe de fonctionnement d'une pile

Tableau. III.1 : Tableau du paramètre du système

Liste des symboles

V_{PAC}	La tension de la PAC
V_{BUS}	La tension du bus continu
I_{PAC}	Le courant équivalent demandé à la PAC
I_{bus}	Le courant équivalent demandé aux bus continu
$L_{PàC}$	Représente l'inductance du hacheur
C_{BUS}	La capacité connectée au bus continu
V_{SC}	La tension des supercondensateurs
I_{SC}	Le courant équivalent demandé au pack de supercondensateurs
I_{SC_dc}	Le courant des SC injecté ou débité dans le bus continu
L_{SC}	Représente l'inductance du hacheur
AFC	La pile alcaline
PEMFC	Piles à membrane électrolyte polymérique
PAFC	La pile à acide phosphorique
DMFC	La pile à méthanol direct
SOFC	La pile à oxyde solide
MCFC	La pile à carbonates fondus
DC	Courant continu
x	Vecteur d'état
u	Vecteur d'entrée
y	Vecteur de sortie plate
y_l	La sortie plate
C_l	La capacité de la charge
v_l	Le variable d'état du système
I_{Ch}	Courant de la charge
T	Période de
r	Nombre fini de dérivées

p_1	La variable de contrôle
p_{1max}	La puissance maximale d'entrée du convertisseur
y_{1ref}	La trajectoire de référence
y_{fcref}	Le courant de référence
k_{11}	Le coefficient
k_{12}	Le coefficient
w_n	Représente respectivement l'amortissement
ξ	La pulsation naturelle désirée
α	Le rapport cyclique

Introduction Générale

Aujourd'hui, les dispositifs électrochimiques trouvent de nouvelles applications aussi bien dans l'industrie que chez le particulier notamment dans les systèmes embarqués où une source autonome d'énergie est nécessaire pour alimenter les charges électriques. Parmi les dispositifs électrochimiques supercondensateurs et les piles à combustible sont les sources électrochimiques ayant les énergies spécifiques les plus élevées. Elles sont reconnues comme une des technologies les plus prometteuses pour répondre aux futurs besoins de production d'électricité.

L'hybridation des dispositifs électrochimique consiste à combiner deux ou plus de deux dispositifs (qui contiennent au moins un élément de stockage) de manière à cumuler les avantages de chacun d'entre eux tout en tenant compte des spécifications de chacun. Ces sources hybrides combinent donc par principe les avantages d'une énergie spécifique très élevée et d'une puissance spécifique importante disponible sur des durées appréciables.

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une réaction chimique d'oxydoréduction. Cette réaction fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité.

Un supercondensateur peut être un bon choix comme source auxiliaire (source de puissance instantanée), la puissance du supercondensateur spécifique élevée et la densité d'énergie de supercondensateurs est inférieure de celle sources avec un facteur moyen de dix. Dans ce mémoire, nous choisirons cet élément de stockage comme source auxiliaire de puissance eu égard aux applications traitées.

Il existe de nombreux travaux sur la gestion d'énergie des systèmes hybrides à une ou plusieurs sources et organes de stockage. La plus simple de ces structures consiste en une connexion directe des sources principale et auxiliaire (pile à combustible et supercondensateurs), Bien que cette hybridation soit très simple, la gestion énergétique du système n'est pas optimale.

Dans le premier chapitre, nous commençons par des généralités d'une source hybride (pile à combustible et supercondensateurs), nécessaire à son fonctionnement, et les différents

Introduction Générale

types de chaque source. Enfin nous terminerons le chapitre par des avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous allons développer la modélisation et la description d'une source hybride d'énergie, constituée d'une pile à combustible et supercondensateurs connectés via des convertisseurs entre les sources d'énergies et la charge. Aussi les équations du système, et l'hybridation des dispositifs électrochimiques. Enfin les stratégies de contrôle et la commande par platitude d'une source hybride étudiée.

Le troisième chapitre, contiendra les paramètres du système aussi les résultats de simulation avec les interprétations des résultats.

Finalement, nous clôturerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

I.1 Introduction :

Les sources hybrides, combinaison de deux ou plus des sources d'énergie et de puissance, a été un sujet de recherche depuis les années 90. Différentes structures et méthodes de contrôle de systèmes hybrides utilisant des dispositifs électrochimiques comme source ou organe de stockage ont été élaborées.

Ce chapitre commence par présenter brièvement les dispositifs électrochimiques que sont les piles à combustibles et les supercondensateurs. Les piles à combustibles et les batteries sont des générateurs électrochimiques capables de restituer sous forme électrique une énergie stockée chimiquement. Nous distinguons usuellement la pile à combustible, pour laquelle les réactions mises en jeu sont irréversibles, de l'accumulateur qui, à l'inverse, est rechargeable. Le terme de batterie désigne quant à lui une association série et/ou parallèle de générateurs élémentaires. Les supercondensateurs quant à eux, sont des organes de stockage d'énergie électrique avec une puissance spécifique très élevée.

Nous effectuerons tout d'abord un rappel chronologique de l'évolution des dispositifs. Ensuite nous présenterons leurs principes de fonctionnement ainsi que les modèles électriques de chacun. Puis nous présenterons les applications des dispositifs électrochimiques en comparant leurs énergies et puissances spécifiques. Nous étudierons enfin les structures et les méthodes de commandes usuelles des systèmes hybrides d'énergie électrique [1].

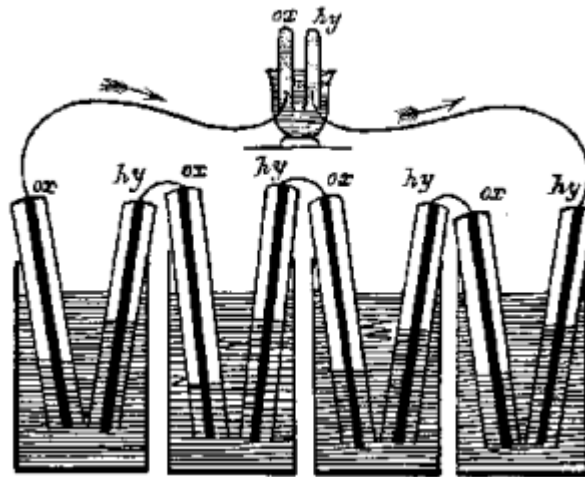
I.2 La pile à combustible :

Il y a 150 ans, en 1839, la première pile à combustible a été inventée par Sir William Robert Grove. Depuis, il est connu comme "le Père de la pile à combustible". Ses expériences sur l'électrolyse – l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène ont mené à la première mention d'un dispositif qui plus tard se nommera pile à combustible. Il a pensé qu'il était possible de renverser le procédé d'électrolyse et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. Pour vérifier cette théorie il a enfermé deux bandes de platines dans des bouteilles séparées, l'une contenant de l'hydrogène l'autre de l'oxygène. Quand ces récipients ont été immergés dans de l'acide sulfurique dilué un courant a commencé à s'établir entre les deux électrodes et de l'eau s'est formée dans les bouteilles de gaz. Pour augmenter la tension produite, il a placé plusieurs de ces dispositifs en série et a produit ce qu'il a appelé une "batterie à gaz", le précurseur de la pile à combustible moderne [1].

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

La pile à combustible a connu une renaissance au début des années 60 lorsqu'un nouvel organisme gouvernemental des USA - the National Aeronautics and Space Administration (NASA) recherchait comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux.

La NASA avait déjà éliminé les batteries car elles étaient trop lourdes, l'énergie solaire car source trop chère et l'énergie nucléaire car trop risquée, et cherchait une source alternative. La pile à combustible est apparue comme une solution possible, et la NASA a attribué un certain nombre de contrats de recherche pour développer cette solution. Cette recherche a mené au développement de la première membrane échangeuse de protons ou "membrane d'électrolyte polymère"[2].



(Fig. I.1): Expérience de Sir W. Grove en 1839.

Ces piles à combustible utilisaient de l'oxygène pur et de l'hydrogène pur et étaient de petite taille, chères et non disponibles dans le commerce. L'intérêt de la NASA pour les piles à combustible et la crise de l'énergie de 1973 ont relancé le développement de ce dispositif. Depuis, la recherche sur les piles à combustible a continué et des piles à combustible ont été utilisées avec succès dans une grande variété d'applications [3].

I.2.2. Fonctionnement d'une pile à combustible :

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante [3]:



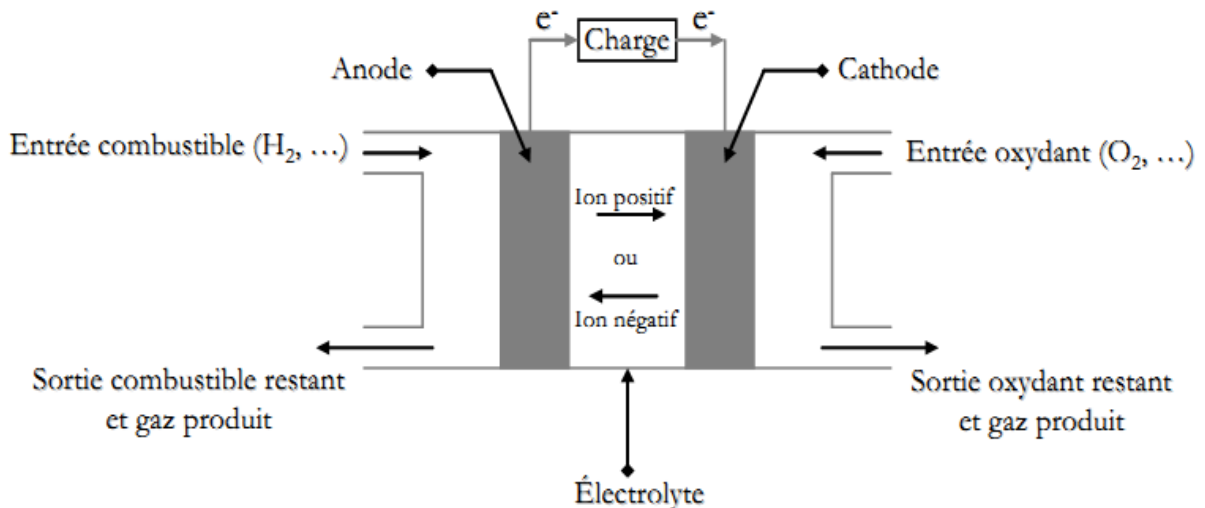
Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :



Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés "points triples"[4].

En ces points, nous trouvons, autour de la particule de catalyseur :

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H^+ .
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e^- .
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.



(Fig. I.2):Schéma de principe d'une cellule de pile a combustible

I.2.3. Les différents types de piles à combustible :

Les piles à combustible sont généralement classifiées par le type d'électrolyte utilisé. Une exception dans cette classification est la pile de type DMFC (*Direct Méthanol Fuel Cell*) qui est en fait une PEMFC, mais utilisant comme carburant du méthanol qui est directement envoyé à l'anode. Une autre caractéristique utilisée pour classer les piles à combustible est leur température de fonctionnement, on distingue ainsi les piles à basse température et les piles à haute température. Les piles à basse température sont les piles alcalines ou AFC (*Alkaline Fuel Cell*), les piles à membrane échangeuse de protons ou PEMFC, les piles à méthanol direct ou DMFC et les piles à acide phosphorique ou PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*). Les piles à haute température fonctionnent entre 600 et 1000 °C. Deux types ont été développés, soit les piles à carbonates fondus ou MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) et les piles à oxyde solide ou SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*). Le tableau 1 récapitule les différents types de piles avec leurs caractéristiques respectives.

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<i>Électrolyte</i>	Solution KOH	Membrane à échange de protons	Membrane à échange de protons	Acide phosphorique	Mélange de Li_2CO_3 et de KCO_3 fondu dans une matrice LiAlO_2	Oxyde de zircon stabilisé ZrO_2 et yttrium Y_2O_3
<i>Type de charge transférée</i>	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
<i>Température de fonctionnement (en °C)</i>	<100	60-120	60-120	160-220	600-800	600-1 000
<i>Combustible</i>	H_2	H_2	Méthanol	H_2	H_2 produit à partir d'hydrocarbures	H_2 et CO produit à partir d'hydrocarbures
<i>Oxydant</i>	O_2	Air	Air	Air	Air	Air

(Tab. I.1): Comparaison des différents types de piles à combustible.

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\leftarrow \text{OH}^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	60-220 °C
MCFC	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{CO}_3^- \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\leftarrow \text{CO}_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^-$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$\text{H}_2 + \text{O}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{O}^- \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CH}_4 + 4\text{O}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8\text{e}^-$	$\leftarrow \text{O}^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^-$	600-1000 °C

(Tab. I.2) : Tableau du principe de fonctionnement d'une pile [5].

I.2.3.1. La pile alcaline (AFC) :

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se retrouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 120 à 150°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes [5] [6]:

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

À l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction:



et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction:



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (HO^-). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques.

L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le CO_2 contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante:



Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage (ou stack) en reliant plusieurs piles en série [5] [6].

I.2.3.2. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) :

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fût ensuite vite remplacé par des AFCs, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de types Nafion (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ $80^\circ C$, de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent:

À l'anode, on a:



et à la cathode, on a:



L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeur d'ions plus efficaces et également moins coûteux.

Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone. Nous verrons les caractéristiques de cette pile plus en détail à la section 3[5] [6].

I.2.3.2.1. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM :

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée. Nous nous intéressons principalement ici à la pile PEM même si certaines des qualités et des défauts de cette pile se retrouvent sur d'autres types de pile [9].

I.2.3.2. 1.1. Avantages des piles à combustible de type PEM :

Les avantages généralement cités sont :

Un rendement de conversion important ; grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées.

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

-un générateur propre ; les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs (CO_2 , NO_x) au niveau du cœur de pile.

-un système modulable ; les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.

-un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas de partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes. De ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels [9].

I.2.3.2. 1.2. Inconvénients des piles à combustible de type PEM :

Elles présentent aussi quelques inconvénients :

Un fonctionnement à basse température imposé par les membranes actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le cœur de pile par de l'hydrogène pur ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant.

Une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrication élevé, bien que la structure du cœur de pile soit assez simple.

Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées [9].

I.2.3.3. La pile à acide phosphorique (PAFC) :

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans différents endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans le cas de la PEMFC, avec des températures de fonctionnement variant de 150 à 220°C, on a donc :

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

à l'anode:



et à la cathode:



Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique (aussi un électrolyte conducteur de protons), un liquide, alors qu'il s'agit d'un polymère solide dans le cas de la PEMFC. Au début du développement des PAFCs, on a utilisé l'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile. Mais avec les progrès faits dans les matériaux utilisés pour la construction des piles, la concentration en acide est maintenant de 100%. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone.

Comme dans le cas des PEMFCs, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une stocké. On procède actuellement à l'essai d'autres catalyseurs pour ce type de piles à combustible: fer-cobalt, titane, chrome, zirconium [5] [6].

I.2.3.4. La pile à méthanol direct (DMFC) :

Il ne faut pas confondre cette pile avec les piles qui utilisent du méthanol (ou éthanol) comme source d'hydrogène par le reformage externe (la pile à méthanol indirect). La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent (à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C):

À l'anode on a:



Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

et à la cathode on a:



Il est important de noter que dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme c'est le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane.

Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables (moment dipolaire), les molécules de méthanol sont aussi bien transportées vers la cathode que les molécules d'eau par un processus de drag osmotique. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels dû à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile.

La traversée du méthanol à travers la membrane dépend de plusieurs facteurs, les plus importants étant la perméabilité (et donc proportionnel à l'épaisseur) de la membrane, la concentration en méthanol, la température de fonctionnement, et les performances de l'anode elle-même. La membrane est un facteur très important dans le problème de la traversée du méthanol ; une membrane fine permet d'avoir une résistance de la pile moins importante, mais elle tend à avoir une plus grande perméabilité au méthanol. Une membrane épaisse est donc avantageuse dans le cas des piles au méthanol. Comme pour les PEMFCs, les plaques bipolaires sont faites de graphite, de métal ou de matériaux composites. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone, qui est l'intermédiaire dans la réaction [5] [6].

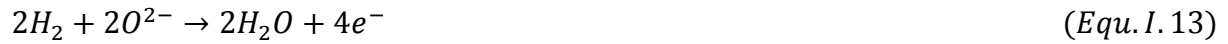
I.2.3.5. La pile à oxyde solide (SOFC) :

Le principe de fonctionnement des SOFCs est basé sur le mécanisme suivant: l'oxygène est dissocié à la cathode en O^{2-} puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur



ou:



et à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction:



La caractéristique principale des SOFCs réside donc dans leur haute température de fonctionnement (600 à 1 000 °C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Cette température présente un double avantage. Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, qui pourront être facilement reformés en se passant de catalyseur à base de métaux nobles. Elle produit d'autre part une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération, le rendement pouvant atteindre ainsi 80%. Mais elle présente également un inconvénient, la mise en température est longue et complique toute utilisation à cycles courts et répétitifs (comme dans le cas des transports).

Pour ces raisons, la technologie SOFC se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW). Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un ébauché dans la propulsion navale, voire terrestre (trains, camion...).

La mise au point de ce type de pile implique, de par cette haute température de fonctionnement, la résolution de problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux assez complexes, ainsi que d'assemblage et d'étanchéité.

Une des particularités de la SOFC est son électrolyte solide, habituellement du Zirconium (Zr₂) dopé d'une mole de 8 à 10% d'ytterbium (Y₃+), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O²⁻). Les SOFCs peuvent être de conceptions planes, monolithiques et tubulaires, et utiliser de l'acier inoxydable, de l'acier austénitique, des matériaux céramiques selon les températures de fonctionnement et l'électrolyte désiré [5] [6].

I.2.3.6. La pile à carbonates fondus (MCFC) :

Le développement des piles à combustible à carbonates fondus a débuté dans le milieu du vingtième siècle. Les avantages et les inconvénients de ce type de pile sont sensiblement les mêmes que dans le cas des SOFCs. La température élevée améliore énormément la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend ainsi inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs.

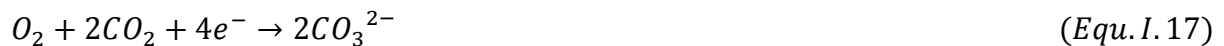
Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voir supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus, les MCFCs peuvent utiliser une large gamme de carburant (grâce au reformage interne), et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO_2 comme c'est le cas pour les piles à basses températures.

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction:



et à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a:



Ici, du dioxyde de carbone et de l'oxygène sont consommés la cathode et l'ion de carbonate (CO_3^{2-}) voyage de la cathode à l'anode.

L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium ($LiAlO_2$). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel du côté de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée [5] [6].

I.2.5. Applications des piles à combustibles :

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées [7].

I.2.5.1 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 [7].

I.2.5.2 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 [7].

I.2.5.3 Applications embarquées :

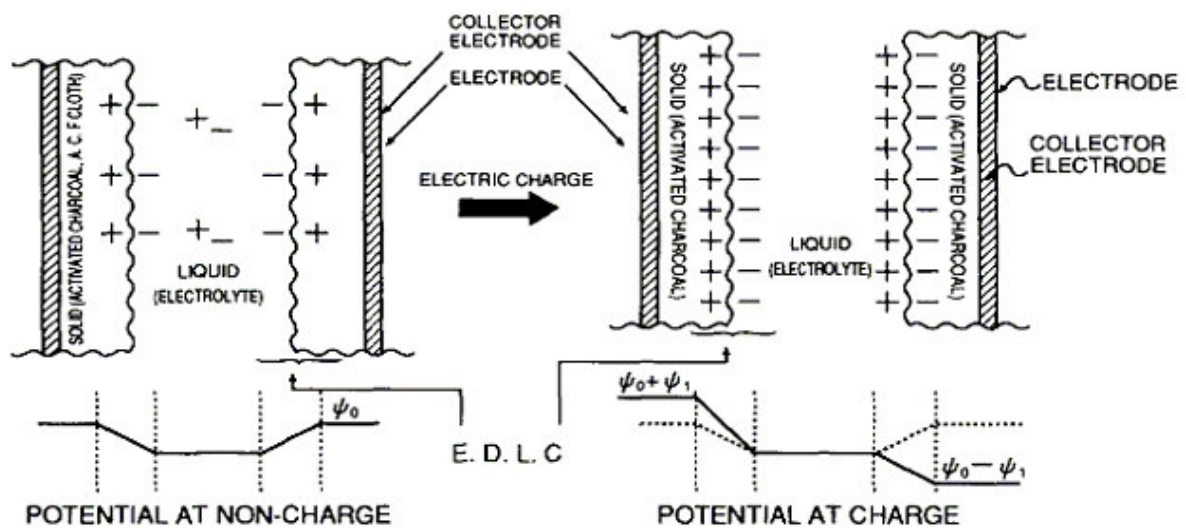
Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux 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 [7].

I.3. Les supercondensateurs :

La recherche s'est accentuée ces dernières années sur les moyens énergétiques pour remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la pile à combustible... La complexité de l'intégration de ces alternatives réside dans leurs applications aux systèmes embarqués comme pour le cas des véhicules hybrides et véhicule pile à combustible. En effet, le problème est que ces sources d'énergie sont limitées en puissance. Les récents développements dans le domaine électrochimique ont donnés naissance à un nouvel élément de stockage de l'énergie électrique ; le supercondensateur qui s'avère une des solutions à ce type de problème. Il est placé entre les batteries et les condensateurs classiques aux niveaux puissance et énergie. Sa capacité peut atteindre des valeurs très élevées (jusqu'à 5000F) avec une tension maximale de charge jusqu'à 2,7V. Pour sa forte puissance, il se montre aujourd'hui comme une bonne alternative permettant une amélioration de la puissance des systèmes. Par exemple, il peut être introduit en parallèle avec la pile à combustible et ainsi répondre aux demandes de fortes puissances en régime transitoire (accélération, récupération de l'énergie de freinage). Une bonne gestion de l'énergie disponible permet d'optimiser la consommation énergétique des systèmes et ainsi d'améliorer le rendement. Pour assurer le bon fonctionnement de ces éléments, une caractérisation des supercondensateurs en fonction des contraintes auxquels seront soumis est obligatoire. Ces contraintes sont : la température du milieu, la fréquence d'utilisation et la tension de charge [8].

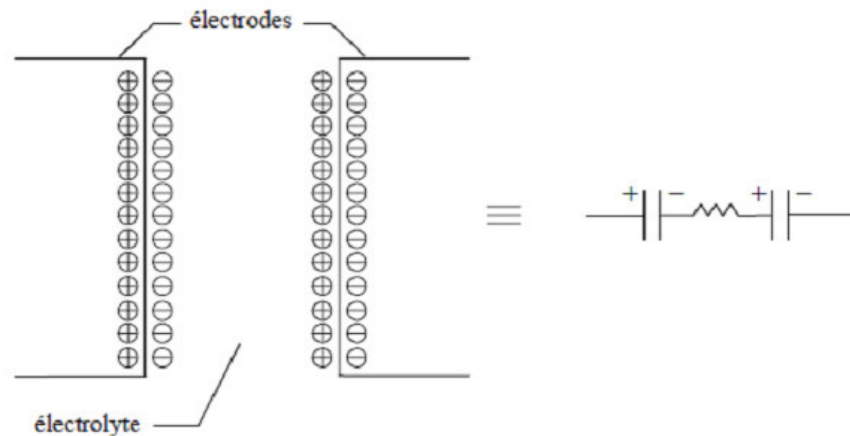
I.3.1. Principe de fonctionnement :

En 1853, le physicien Hermann Von Helmholtz observa, suite à l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un électrolyte, que le phénomène de décomposition de l'électrolyte faisait apparaître un seuil de tension en dessous duquel le comportement du système était principalement capacitif. Ce faisant Helmholtz découvrait le principe de base des supercondensateurs, à savoir les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide.



(Fig. I.3) : Schéma du principe des supercondensateurs

Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace, appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres, et dans laquelle règne un champ électrique, relativement intense, de l'ordre de 10 kV m^{-1} . Un supercondensateur peut donc être schématisé, comme figure II.4, par deux capacités représentatives des charges stockées, et connectées en série par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte [9].



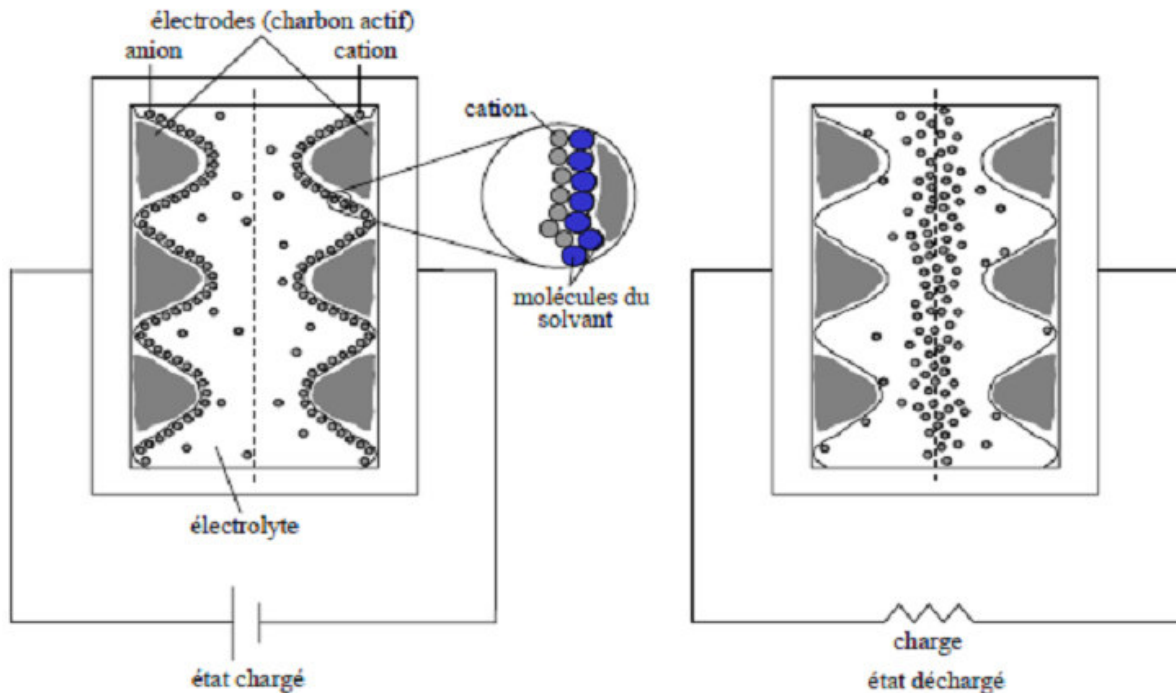
(Fig. I.4) : Principe de la couche double électrique [9].

Les supercondensateurs sont donc, pour la plupart des dispositifs commercialisés (en l'occurrence ceux qui nous intéressent ici, c'est-à-dire ceux dits à couche double électrique), des capacités à part entière. Le stockage d'énergie est, de fait, d'origine électrostatique, et non pas électrochimique comme dans le cas des accumulateurs, ce qui leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée, typiquement d'un seul ordre de grandeur inférieure à celle des condensateurs électrolytiques classiques.

Leur différence fondamentale avec ces derniers réside dans l'absence apparente de couche diélectrique, la fonction diélectrique du dispositif étant assurée par les molécules du solvant.

Il en résulte des capacités surfaciques élevées, comprises entre $10 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ et $30 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$, et en revanche une tenue en tension modeste, limitée par la décomposition du solvant, de l'ordre de 2.5 V nominal pour un solvant organique [9].

Pour exploiter au mieux les potentialités de cette couche double électrique en termes d'énergie spécifique et de capacité volumique, il convient d'accroître la surface de contact entre électrode et électrolyte sans augmenter outre mesure le volume total de l'ensemble. On a recours pour ce faire à des matériaux d'électrodes poreux de très grande surface spécifique, comme le charbon actif qui présente des surfaces spécifiques supérieures à $1000 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ (Fig. I.5).



(Fig. I.5) : Structure interne des supercondensateurs à couche double électrique.

Notons donc deux caractéristiques importantes des supercondensateurs, conséquences du principe de stockage d'énergie électrostatique par couche double électrique : leur réversibilité en tension, bien que ces dispositifs soient fournis avec un sens de polarisation, et leur faible tenue en tension, limitée à quelques volts (par cellule élémentaire), suivant la nature du solvant électrolytique. L'énergie spécifique des supercondensateurs, typiquement de 5 Wh.kg^{-1} , reste néanmoins nettement supérieure à celle des condensateurs électrolytiques classiques, conséquence de valeurs de capacité extrêmement élevées. Toutefois, pour la plupart des applications d'électronique de puissance, cette limitation sévère en tenue en tension rend incontournables la mise en série et les différents problèmes associés (équilibrage, mise en parallèle, ...) [10].

I.3.2. Différents types de supercondensateurs :

Il existe trois types de supercondensateurs qui se différencient par leur mode de fonctionnement : les supercondensateurs pseudocapacitifs, les supercondensateurs hybrides et les supercondensateurs à double couche électrochimique [11].

I.3.2.1. Supercondensateurs pseudo capacitifs :

Ce type de supercondensateurs met en jeu des réactions faradiques de surface. Il existe ainsi deux types principaux de supercondensateurs pseudocapacitifs : les supercondensateurs à base d'oxydes métalliques et ceux à base de polymères conducteurs.

Dans les supercondensateurs à base d'oxydes métalliques, la capacité est due à des réactions redox à la surface et dans le volume du matériau d'électrode. Elle est dépendante de la quantité de charges transférées, elle-même dépendante de la tension appliquée. Les oxydes des métaux de transition possèdent un grand nombre d'états d'oxydation. Ils peuvent être préparés avec une grande surface spécifique et certains sont conducteurs. Les oxydes métalliques sont donc de bons matériaux pour développer les supercondensateurs.

Dans les supercondensateurs à base de polymères conducteurs, le polymère peut recevoir un excès d'électrons par réduction ou donner des électrons par oxydation. Les polymères sont conducteurs car l'excès de charges peut être délocalisé sur la chaîne du polymère en raison de l'alternance de liaisons simple et multiple. Ce phénomène est réversible, les polymères conducteurs électroniques peuvent stocker des charges et les restituer c'est pourquoi ils sont intéressants pour la réalisation de supercondensateur [11].

I.3.2.2. Supercondensateurs hybrides :

Ces supercondensateurs sont composés de deux électrodes dissymétriques : une électrode est de type capacitif et l'autre de type pseudocapacitif ou batterie. Ces supercondensateurs essaient de tirer parti de chaque type de composant. L'électrode pseudocapacitive permet d'obtenir une grande densité d'énergie, l'électrode capacitive permet d'obtenir une grande densité de puissance [11].

I.3.2.3. Supercondensateurs à double couche électrique :

Les supercondensateurs réalisés à partir de charbon actif utilisent le principe de la double couche électrique. Ce sont ces condensateurs utilisés dans les systèmes hybrides [11].

I.3.3. Applications courantes des supercondensateurs :

Les supercondensateurs sont utilisés dans les applications du domaine du transport, pour la conception des véhicules électriques et hybrides, dans le but de diminuer l'émission

Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible et super condensateur

de gaz à effet de serre et de la pollution acoustique, en améliorant l'efficacité énergétique et en minimisant le coût de transport grâce à la récupération d'énergie notamment.

Deux exemples d'applications couramment envisagées sont :

- De permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des supercondensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start...).
- La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberonnage en station pendant l'arrêt.

I.3.4. Supercondensateurs avantages, inconvénients :

I.3.4.1. Les avantages [12] :

- Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques.
- Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques.
- Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides.
- Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement).
- ESR (résistance série) très basse.
- Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée).
- Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel.
- Charge très rapide.

I.3.4.2. Les inconvénients [12] :

- Basse énergie spécifique (10 Wh/kg).
- Plage de tension limitée.
- Technologie moins mûre que celle des batteries.
- Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques.
- Energie spécifique plus faible que celle des batteries.
- Coût.

I.4. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter les dispositifs électrochimiques que sont les piles à combustible, les supercondensateurs. Nous avons ensuite détaillé les stratégies usuelles d'hybridation associant ces différentes sources et expliqué la raison de telles associations. Nous avons ensuite exposé les différentes stratégies de commande utilisées actuellement dans le contrôle des sources hybrides d'énergie électrique en exposant les points forts et les faiblesses de chaque approche.

Dans ce mémoire, nous allons proposer une structure simple d'hybridation constituée d'une pile à combustible (source principale) et d'un pack de supercondensateurs (source auxiliaire), association pertinente puisque dans le plan de Ragone, pile à combustible et supercondensateur ont respectivement une énergie spécifique et une puissance spécifique élevée. Nous allons développer une stratégie de commande sans commutation d'algorithme. Cette stratégie confère des propriétés dynamiques élevées aussi bien en asservissement qu'en régulation.

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

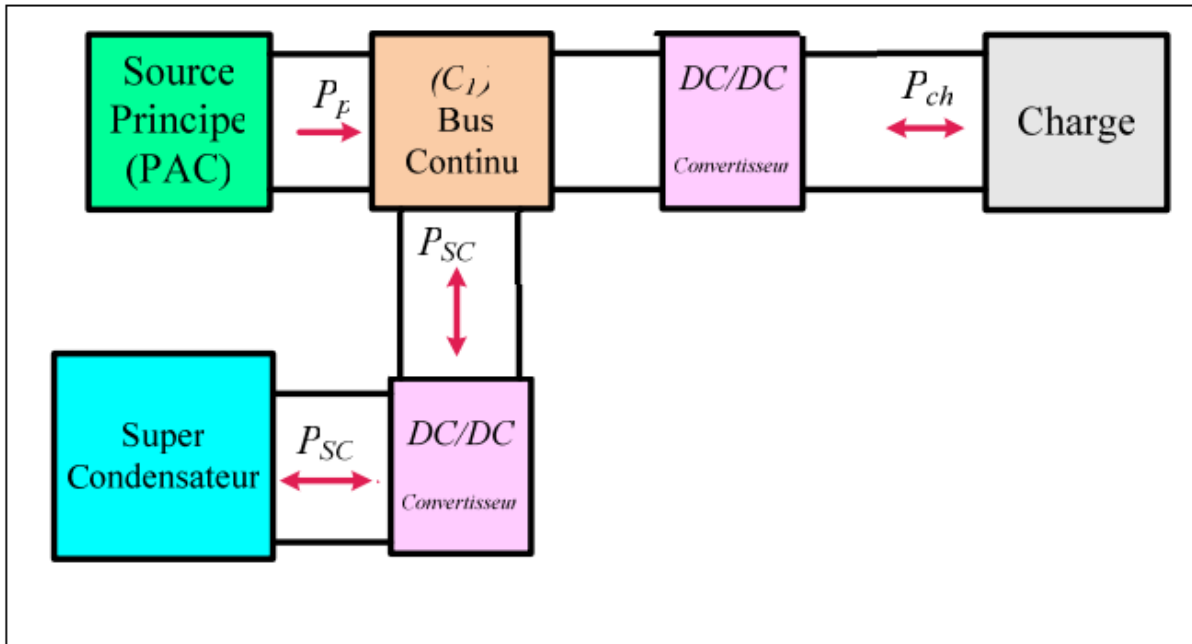
II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, en admettant des hypothèses simplificatrices justifiées, nous développons d'abord des modèles des systèmes hybrides étudiés, grâce auxquelles nous mettons en évidence que ces systèmes sont "différentiellement plats". Dans une seconde étape, nous développons une stratégie de la gestion de flux d'énergie sans commutation d'algorithme, sachant que les différents modes de fonctionnement sont gérés à l'aide des trajectoires de référence imposées aux sorties des systèmes étudiés. Les résultats de simulation effectués avec le logiciel de simulation numérique Matlab-Simulink vont être présentés pour les deux architectures de puissance étudiées. Le dimensionnement des paramètres de contrôle permettant la prise en compte des contraintes inhérentes à l'utilisation d'une PAC comme source principale d'énergie va être effectué et validé par des résultats de simulation. Quant aux paramètres du système lui-même, une méthodologie permettant le dimensionnement des condensateurs va être développée. Un comparatif des deux structures portant sur leur rendement dans différents modes d'opération va être présenté. Afin de valider les modélisations proposées et les algorithmes de contrôle développés, une validation expérimentale a été mise en œuvre, sachant que la pile à combustible a été émulée dans ce chapitre à l'aide d'une alimentation continue programmée de manière à reproduire le comportement statique de la PAC.

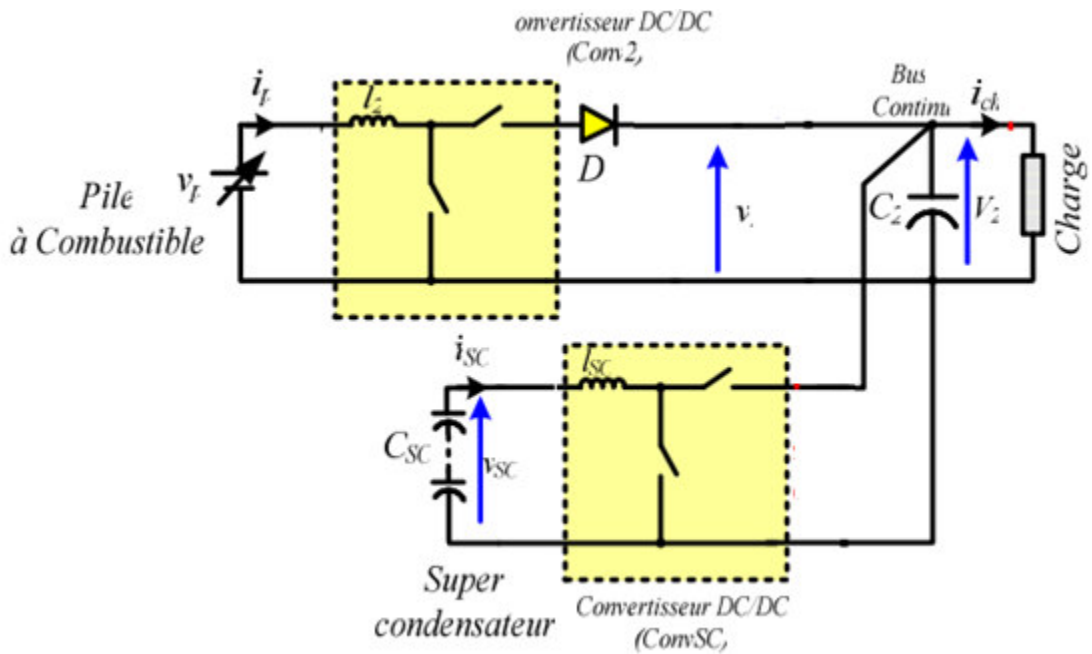
II.2 Description et modélisation du système multi-sources:

Pour les systèmes multi-sources où la source principale est une source électrochimique (pile à combustible) et source auxiliaire (super condensateur). Les organes de stockage d'énergie sont connectés au système multi-sources avec deux convertisseurs (figure II.1)[11].

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :



(Fig. II.1) :Description du système multi-sources



(Fig. II.2) :Diagramme du système multi-sources étudié

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

II.2.1 Les équations du système :

$$V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt}; \quad U_{FC} = 1 \text{ Equ (II.1)}$$

$$V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} + V_{Bus}; \quad U_{FC} = 0 \quad \text{Equ(II.2)}$$

$$V_{SC} = L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt}; \quad U_{SC} = 1 \quad \text{Equ (II.3)}$$

$$V_{SC} = L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt} + V_{Bus}; \quad U_{SC} = 0 \quad \text{Equ(II.4)}$$

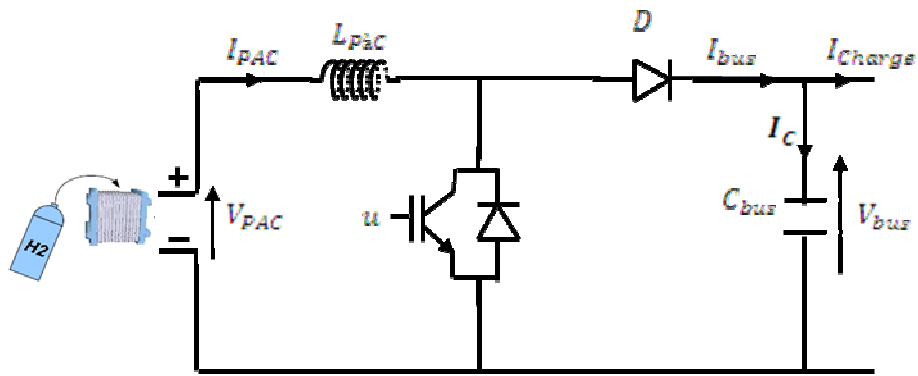
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC})V_{Bus} - r_{FC} * I_{FC}] \\ \frac{dI_{SC}}{dt} = \frac{1}{L_{SC}} [V_{SC} - (1 - U_{SC})V_{Bus} - r_{SC} * I_{SC}] \\ \frac{dV_{Bus}}{dt} = \frac{1}{C_{Bus}} [(1 - U_{FC})I_{FC} + (1 - U_{SC})I_{SC} - I_{Ch}] \\ \frac{dI_{Ch}}{dt} = \frac{1}{L_{Ch}} [V_{Bus} - R_{Ch} * I_{Ch}] \end{array} \right. \quad \text{Equ (II.5)}$$

II.2.2. Modélisation du convertisseur connecté à la PAC :

Pour optimiser le fonctionnement de la PAC, on utilise un étage d'adaptation entre la PAC et la charge dont le but est d'optimiser le transfert de puissance. Habituellement, cet étage est constitué d'un hacheur parallèle unidirectionnel « booste ». Bien sûr, ces étages présentent un surcoût par rapport à la connexion directe.

La tension de sortie V_{Bus} est réglée par le rapport cyclique α . Avec α étant le rapport entre T_{off} ; la période de conduction de l'interrupteur, et la période de hachage T [13].

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :



(Fig.I.3) : Hacheur boost (élévateur) lié à la PAC

La figure (II.3) représente le schéma électrique du hacheur élévateur où :

V_{FC} La tension de la PAC

V_{Bus} La tension du bus continu

I_{FC} Le courant équivalent demandé à la PAC

I_{bus} Le courant équivalent demandé aux bus continu

L_{FC} Représente l'inductance du hacheur

C_{Bus} La capacité connectée au bus continu

Pour notre étude, les hypothèses suivantes ont été faites pour la modélisation :

- Les interrupteurs sont idéaux : quand ils conduisent, leur résistance est nulle. Elle est infinie, quand ils sont bloqués. Les commutations sont considérées comme instantanées.
- Les éléments passifs (résistances de charge ou de perte, inductances et capacités) sont linéaires et invariants.
- Les sources de tension maintiennent leur tension continue indépendamment du courant fourni.

Les équations du modèle instantané sont données ci-dessous:

$$L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} - V_{Bus}(1 - u) \quad \text{Equ (II. 6)}$$

$$C_{Bus} \frac{dV_{Bus}}{dt} = (1 - u)I_{FC} - I_{Ch} \quad \text{Equ (II. 7)}$$

Où : u est l'ordre de commande du hacheur qui peut être 1 ou 0 ; 1 quand l'interrupteur est fermé, 0 quand il est ouvert.

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

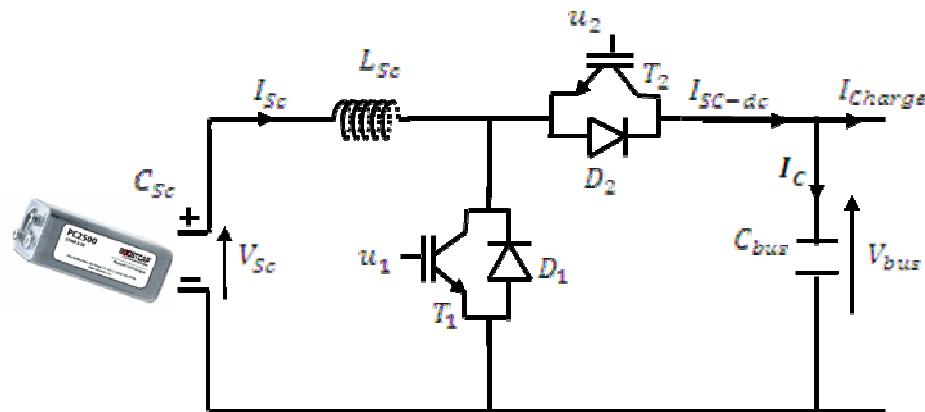
Le modèle moyen est simplement obtenu par la substitution de l'ordre de commande u par α . Ce signal pourra avoir des valeurs comprises entre 0 et 1. Le modèle statique est représenté par les équations suivantes [13]:

$$V_{Bus} = \frac{V_{FC}}{1 - \alpha} Equ \quad (II.8)$$

$$I_{FC} = \frac{I_{bus}}{1 - \alpha} Equ \quad (II.9)$$

II.2.3. Modélisation du convertisseur connecté au pack de supercondensateurs (Hacheur parallèle réversible en courant) :

Dans le cas où le hacheur utilisé doit permettre un fonctionnement en charge et en décharge des supercondensateurs, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur réversible en courant est utilisé. Ce convertisseur permet d'élever la tension du pack, mais également de maintenir cette tension en sortie à une valeur fixe, au moyen de la régulation de tension dont il est muni. Il donne aussi une flexibilité à la source (SC), parce qu'un tel arrangement élimine la condition de tension des supercondensateurs[14].



(Fig.I.4) :Hacheur parallèle réversible en courant (Buck-boost)

La figure (II.4) représente le schéma électrique du hacheur buck-boost où :

V_{Sc} La tension des supercondensateurs

I_{Sc} Le courant équivalent demandé au pack de supercondensateurs

I_{Sc_dc} Le courant des SC injecté ou débité dans le bus continu

L_{Sc} Représente l'inductance du hacheur

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

La modélisation est faite comme précédemment, à la seule différence que le convertisseur possède deux modes de fonctionnement distincts. Quand le pack SC est en mode de charge, le convertisseur se comporte comme un hacheur abaisseur, et quand il est en mode de décharge, il se comporte comme un hacheur élévateur.

Après l'analyse des séquences de fonctionnement de cet hacheur, et en posant u_1 et u_2 comme des variables binaires représentant respectivement, l'état de conduction des interrupteurs, on obtient les équations différentielles suivantes [14] :

- Dans le mode de fonctionnement élévateur ($I_{Sc} > 0$)

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{Sc} \frac{dI_{Sc}}{dt} = V_{Sc} - V_{Bus}(1 - u_1) \\ I_{Sc-dc} = I_{Sc}(1 - u_1) \\ \frac{dV_{Sc}}{dt} = -\frac{I_{Sc}}{C_{Sc}} \end{array} \right. \quad \text{Equ (II. 10)}$$

- Dans le mode de fonctionnement abaisseur ($I_{Sc} < 0$)

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{Sc} \frac{dI_{Sc}}{dt} = V_{Sc} - V_{Bus}u_2 \\ I_{Sc-dc} = I_{Sc}u_2 \\ \frac{dV_{Sc}}{dt} = -\frac{I_{Sc}}{C_{Sc}} \end{array} \right. \quad \text{Equ (II. 11)}$$

Afin de ne pas court-circuiter la source de tension, les commandes u_1 et u_2 doivent être complémentaires ($u_2 = \overline{u_1} = 1 - u_1$), donc les deux modèles sont similaires, ils peuvent être écrits par un seul système en posant $u_1 = u$:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{Sc} \frac{dI_{Sc}}{dt} = V_{Sc} - V_{Bus}(1 - u) \\ I_{Sc-dc} = I_{Sc}(1 - u) \\ \frac{dV_{Sc}}{dt} = -\frac{I_{Sc}}{C_{Sc}} \end{array} \right. \quad \text{Equ (II. 12)}$$

Le modèle moyen est donné par les équations suivantes ; en remplaçant u par α comme on a fait précédemment [14]:

- Dans le mode de fonctionnement élévateur

$$V_{Bus} = \frac{V_{Sc}}{1 - \alpha} \quad \text{Equ (II. 13)}$$

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

$$I_{Sc} = \frac{I_{ch}}{1 - \alpha} Equ \quad (II. 14)$$

- Dans le mode de fonctionnement abaisseur

$$V_{Sc} = \alpha V_{Bus} Equ \quad (II. 15)$$

$$I_{ch} = \frac{I_{Sc}}{\alpha} Equ \quad (II. 16)$$

II.4. Hybridation des dispositifs électrochimiques :

II.4.1. Concept d'hybridation :

L'hybridation des dispositifs électrochimique consiste à combiner deux ou plus dispositifs (qui contient au moins un élément stockage) de manière à combiner les avantages respectifs de chacun tout en minimisant leurs inconvénients.

Par exemple, l'hybridation d'une batterie électrochimique (ou une pile à combustible) avec un supercondensateur peut surmonter les problèmes de la faible puissance spécifique des batteries (ou des piles à combustible) et de la faible énergie spécifique des supercondensateurs. Les auteurs en ont utilisé les avantages des batteries et supercondensateurs en les associant avec un diesel générateur [15].

Quant aux piles à combustible, nous pouvons non seulement compenser la faiblesse de la puissance spécifique, mais aussi surmonter les constantes de temps élevées des piles à combustible [16] (plusieurs centaines de millisecondes).

Cette limitation dynamique est due principalement au système d'alimentation en carburant, (pompes, valves, et dans certains cas, un réformateur de l'hydrogène)[17].

Une augmentation instantanée de l'énergie consommée impliquera une forte chute de tension de la pile à combustible sur un temps très court, dite de "sous-alimentation" ("fuel starvation" en anglais)[18]. Qui peut éventuellement être destructif pour un stack et dans le cas d'un contrôle en flux adapté.

L'hybridation, qui par principe, combinent les avantages de deux technologies (énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante et disponible sur des durées appréciables pour la seconde), permet en particulier de dissocier les

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire, l'intérêt principale résidant ici dans un gain substantiel en termes de volume et de masse [18].

Dans un système hybride, trois régimes de fonctionnement peuvent être définis :

- un régime dit "normal", pour lequel la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la source principale. La source principale fournit alors de l'énergie à l'organe de stockage et à la charge.
- un régime dit "décharge", pour lequel la puissance de la charge est supérieure à la puissance maximale de la source principale. Par conséquent, la source principale et l'organe de stockage fournissent de l'énergie à la charge.
- un régime dit "récupération", pour lequel l'utilisation fournit de l'énergie à l'organe de stockage (et peut être à la source principale, si elle est rechargeable).

II.5. Commande par platitude du système multi-sources :

II.5.1. Stratégie de contrôle des sources hybrides :

Dans une partie, nous avons proposé une structure de source électrique hybride associant une pile à combustible PEM et un supercondensateur ; la pile à combustible constituant la source principale d'énergie, le pack de supercondensateurs étant lui utilisé pour assurer la continuité de l'approvisionnement en énergie lors des régimes transitoires, des passages en mode de surcharge ou de récupération. Dans cette partie, nous allons détailler une stratégie de gestion d'énergie pour source hybride basée sur la notion de platitude qui ne nécessite pas de commutation d'algorithme et ceci quel que soient les modes d'opération de la source hybride. Dans un premier temps, nous montrerons que les systèmes d'ordre réduit développés précédemment vérifient les conditions de platitude des systèmes différentiels. Puis nous détaillerons alors la stratégie de gestion d'énergie proposée pour assurer un fonctionnement optimal du système.

II.5.2 Etude de la platitude des systèmes étudiés :

Les contrôles basés sur la passivité des systèmes différentiels trouvent leur intérêt dans les situations où la génération de trajectoire prédéfinie est utile au contrôle du système. Dans le domaine du génie électrique, l'énergie totale stockée dans un convertisseur de puissance est souvent considérée comme sortie plate du système. Contrairement à d'autres travaux dans lesquels cette sortie plate est utilisée pour générer la trajectoire de référence, les variations de

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

l'énergie électromagnétique stockée dans l'inductance ont été négligées dans l'approche que nous allons présenter. En effet, lorsque l'énergie totale stockée dans le convertisseur (somme de l'énergie électromagnétique stockée dans les éléments inductifs et l'énergie électrostatique stockée dans les condensateurs) est considérée comme une sortie plate, les paramètres de système doivent être bien connus pour générer correctement les trajectoires de références de la sortie plate. La plupart des articles publiés couplent le contrôle basé sur la notion de platitude avec des estimateurs paramétriques permettant d'améliorer la connaissance des paramètres du système. Néanmoins, l'utilisation de ces estimateurs augmente la complexité du contrôle, le temps de calcul et impose des contraintes sur les performances dynamiques des asservissements des grandeurs de sortie. En outre, une autre limitation de ce type de contrôle est que le courant dans l'élément inductif n'est pas directement contrôlé. Il s'en suit un risque de surintensité en régime transitoire avec ce type de contrôle ce qui limite son application en fait aux petites puissances de fonctionnement. Il est possible toutefois de modifier la nature de la trajectoire de référence pour assurer une limitation en courant dans l'élément inductif. En général, la stratégie consiste lorsque l'énergie totale du système suit sa référence, à rajouter à la trajectoire de référence un terme dépendant de l'erreur de courant. Cette stratégie conduit cependant à des risques de "chattering" lorsque l'énergie totale stockée dans le convertisseur et sa référence sont voisines. En conséquence, dans le travail présenté ci-dessous, afin de simplifier la stratégie de contrôle et optimiser les propriétés dynamiques aussi bien en asservissement qu'en rejet de perturbations (extérieures ou dues à des erreurs de modélisation), tous les convertisseurs sont censés être munis d'asservissement en courant possédant une large bande passante. Les erreurs de modélisation dues aux variations d'énergie électromagnétique ou aux erreurs de modélisation seront compensées par les asservissements assurant l'asservissement de la sortie plate à sa référence.

II.6. La commande par platitude :

II.6.1. Définition de la théorie de platitude :

L'idée de la théorie de la platitude différentielle a été introduite par Michel Fliess. L'avantage de cette approche est que les trajectoires du système sont carrément estimées par les trajectoires d'une sortie plate et ses dérivés, sans intégrer aucune équation différentielles. Actuellement ces idées ont été récemment utilisées dans une variété de systèmes non linéaires à travers différents disciplines d'ingénierie, y compris [19] [20] :

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

- Contrôle de la direction de véhicules.
- Contrôle de la pression cathodique et du rapport d'excès d'oxygène d'un système PEMFC.
- Conception d'un algorithme d'orientation pour la phase hypersonique d'un véhicule de levage –corps.
- Contrôle d'un robot spatial avec des axes d'articulation orientés arbitrairement et deux roues d'inertie à la base.
- Contrôle des sources hybrides.

Un système d'équations différentielles ordinaires est dit différentielle plat, s'il existe des variable tel que :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad x \in R^n \text{ Equ (II. 17)} \\ u &= [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \quad u \in R^m \\ y &= [y_1, y_2, \dots, y_s]^T \quad y \in R^s\end{aligned}$$

Ou x le vecteur des variables états, u est le vecteur de contrôle, y est le vecteur des sorties plates, et $(n, m) \in \mathbb{N}$.

Un système est considère plat, si le vecteur de sortie y existe, qui permet d'atteindre les conditions suivantes :

- le vecteur « y » peut s'écrire en fonction de « x » et « u » comme suit :

$$y = \phi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(r)}) \text{ Equ (II. 18)}$$

Avec r , nombre fini de dérivées.

- les vecteurs « x » et « u » peuvent être exprimés en fonction du vecteur des sorties plates « y » et nombre fini de ses dérivées comme suit :

$$\begin{cases} x = \phi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r)}) \\ u = \psi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \end{cases} \text{ Equ (II. 19)}$$

Avec r , nombre fini de dérivées.

Le vecteur des sorties plates « y » et ses dérivées offrent la représentation de la dynamique du système de telle sorte que, si les profils des sorties plates sont connu comme une fonction du temps, alors on peut obtenir les profils de tout l'état du système et les entrées correspondantes. Cette propriété est utilisée pour calculée les trajectoires des sorties plates.

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

De tout évidence, l'avantage de l'approche de platitude différentielle, est que les variable d'état et de contrôle du système, à savoir (x, u) , sont carrément estimés par les trajectoires des sorties plates du vecteur y et de leur dérivées, sans avoir besoin d'intégrer aucune équation différentielle.

II.6.2. Loi de contrôle :

Pour démontrer la platitude de notre système, il faut vérifier qu'il est toujours possible d'exprimer toutes les variables d'état et toutes les variables de contrôle du système en fonction de la sortie plates et d'un nombre fini de dérivées de cette sortie. Pour cela, on définit l'énergie électrostatique stockée dans le condensateur de sortie $[y_T, y_{Bus}]^T$ comme la sortie plate du système, $[P_{FC}, P_{SC}]^T$ comme la variable de contrôle du système et $[v_{FC}, v_{Bus}]^T$ comme la variable d'état du système[21].

Nous supposons que les courants de PAC et supercondensateurs suivent parfaitement leurs valeurs de référence.

$$i_{FC} = i_{FCREF} = \frac{P_{FC}}{v_{FC}} = \frac{P_{FCREF}}{v_{FC}} \quad \text{Equ (II. 20)}$$

$$i_{SC} = i_{SCREF} = \frac{P_{SC}}{v_{SC}} = \frac{P_{SCREF}}{v_{SC}} \quad \text{Equ (II. 21)}$$

L'énergie de bus continu y_{Bus} et l'énergie de supercondensateur peut être écrire comme :

$$y_{Bus} = \frac{1}{2} C_{Bus} v_{Bus}^2 \quad \text{Equ (II. 22)}$$

$$y_{SC} = \frac{1}{2} C_{SC} v_{SC}^2 \quad \text{Equ (II. 23)}$$

L'énergie électrostatique totale stockée dans le condensateur du bus continu C_{Bus} et le supercondensateur C_{SC} s'écrit comme suit:

$$y_T = \frac{1}{2} C_{Bus} v_{Bus}^2 + \frac{1}{2} C_{SC} v_{SC}^2 \quad \text{Equ (II. 24)}$$

La puissance du bus continu est associée à P_{FC0} , P_{SC0} et P_{ch} par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{y}_{Bus} = P_{FC0} + P_{SC0} + P_{ch} \quad \text{Equ (II. 25)}$$

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

Avec :

$$P_{FC0} = P_{FC} - r_{FC} \left(\frac{P_{FC}}{V_{FC}} \right)^2 \quad \text{Equ (II. 26)}$$

$$P_{SC0} = P_{SC} - r_{SC} \left(\frac{P_{SC}}{V_{SC}} \right)^2 \quad \text{Equ (II. 27)}$$

$$P_{ch} = V_{Bus} \cdot i_{ch} = \sqrt{\frac{2y_{Bus}}{C_{Bus}}} \cdot i_{ch} \quad \text{Equ (II. 28)}$$

$$P_{SC} = V_{SC} \cdot i_{SC} = \sqrt{\frac{2y_{SC}}{C_{SC}}} \cdot i_{SC} \quad \text{Equ (II. 29)}$$

Dans le système étudié il ya deux énergies définies comme variables :

- La première est l'énergie du bus continu y_{Bus} .
- La deuxième est l'énergie stockée du supercondensateur y_{SC} .

On propose d'utiliser un supercondensateur, qui est la source d'énergie la plus rapide pour fournir l'énergie au bus-continu. Alors que la pile à combustible (la source d'énergie la plus lente) alimente la capacité du bus continu C_{Bus} et la capacité du supercondensateur C_{SC} pour les garder chargées.

La sortie plate y , le vecteur d'entrée u et le variable d'état x sont définis par:

$$y = \begin{bmatrix} y_{Bus} \\ y_T \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} P_{SCREF} \\ P_{FCREF} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} V_{Bus} \\ V_{SC} \end{bmatrix} \quad \text{Equ (II. 30)}$$

De l'équation (II. 25) et (II. 27), les variables d'état x peuvent être écrites comme:

$$x_1 = \sqrt{\frac{2y_1}{C_{Bus}}} = \varphi_1(y_1) \quad \text{Equ (II. 31)}$$

$$x_2 = \sqrt{\frac{2(y_2 - y_1)}{C_{SC}}} = \varphi_2(y_1 - y_2) \quad \text{Equ (II. 32)}$$

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

D'après l'équation(II.28), les variables de commande peuvent être calculées à partir de la sortie plate y et ses dérivées:

$$u_1 = 2P_{SCMAX} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{y}_1 + \sqrt{\frac{2y_1}{C_{Bus}}} \cdot i_{ch} - P_{FC0}}{P_{SCMAX}} \right)^2} \right] = \psi_1(y_1, \dot{y}_1) \quad \text{Equ (II.33)}$$

$$u_2 = 2P_{FCMAX} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{y}_2 + \sqrt{\frac{2y_1}{C_{Bus}}} \cdot i_{ch}}{P_{FCMAX}} \right)^2} \right] = \psi_2(y_1, \dot{y}_2) \quad \text{Equ (II.34)}$$

Avec :

$$P_{SCMAX} = \frac{V_{SC}^2}{4r_{SC}}, \quad P_{FCMAX} = \frac{V_{FC}^2}{4r_{FC}} \quad \text{Equ (II.35)}$$

II.6.3. Asservissement de la sortie plate à sa référence :

Pour asservir la sortie plate y_1 à sa référence y_{1ref} , on utilise la loi de commande suivante [21]:

$$(\dot{y}_1 - \dot{y}_{1REF}) + k_{11}(y_1 - y_{1REF}) + k_{12} \int (y_1 - y_{1REF}) d\tau = 0 \quad \text{Equ (II.36)}$$

Avec k_{11} et k_{12} sont les coefficients de régulation. Le choix des coefficients s'effectue en étudiant les racines de l'équation caractéristique suivante :

$$P(s) = s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 \quad \text{Equ (II.37)}$$

$$\ddot{e}_1 + k_{11}\dot{e}_1 + k_{12}e_1 = 0 \quad \text{Equ (II.38)}$$

$$P(s) = s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2 \quad \text{Equ (II.39)}$$

$$\begin{cases} k_{11} = 2\xi w_n \\ k_{12} = w_n^2 \end{cases} \quad \text{Equ (II.40)}$$

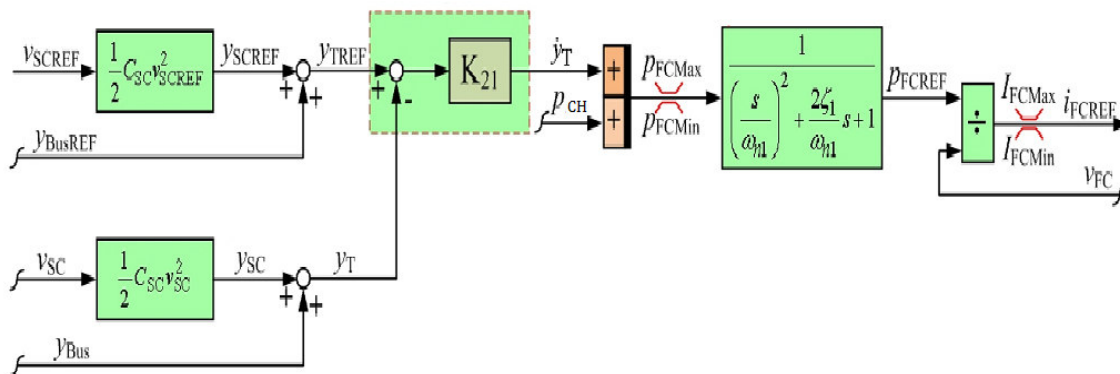
Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :

Pour la régulation d'énergie totale, une trajectoire de référence pour l'énergie du bus continu et représenté par y_{2REF} (y_T).

Comme l'énergie du supercondensateur est énorme, et définie comme une variable a une dynamique plus lente que l'énergie du bus-continu, un gain proportionnel k_{21} est suffisant. Alors, la loi de commande d'énergie totale définie par :

$$\dot{y}_1 + k_{21}(y_2 - y_{2REF}) = 0 \quad \text{Equ (II. 41)}$$

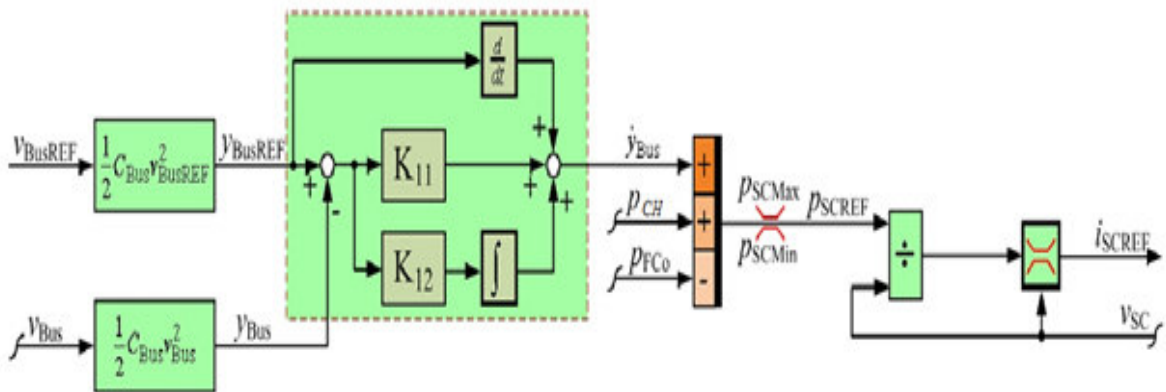
La Figure. II.5 représente la boucle de commande de l'énergie totale. Cette boucle génère la référence de puissance P_{FCREF} . Elle doit être limitée, au sein d'un intervalle maximum (P_{FCMAX} correspondant à une puissance nominale de la PAC) et minimum (fixé à 0 W) et limitée dans la dynamique, ce qui permet le fonctionnement en toute sécurité du PAC par rapport aux contraintes qui sont associés avec le PAC (la prévention d'une PAC Stack du phénomène de manque de carburant [21]).



(Fig. II. 5) La régulation d'énergie totale de la source hybride

La figure II.6 représente la boucle de commande d'énergie de bus continue. Cette boucle génère la référence de puissance P_{SCREF} .

Chapitre II : Modélisation d'un Système Hybride et la commande par platitude :



(Fig. II. 6) :La régulation d'énergie de bus continu de la source hybride

II.7. Conclusion

Ce chapitre présente une méthode de commande pour les systèmes hybrides électrique associant plus de deux sources. Cette commande associe le contrôle basé sur la platitude et un superviseur réalisé autour d'une commande par platitude. La gestion des flux d'énergie dans le système hybride électrique est réalisée par un contrôle basé sur la platitude du système considéré. La répartition des puissances entre les organes de stockage s'effectue grâce à un superviseur utilisant les propriétés de la commande par platitude.

Cette stratégie de contrôle permet la gestion d'énergie dans le système hybride sans commutations d'algorithmes. En utilisant cette stratégie, la prise en compte des contraintes de la source principale ou des organes de stockage peut être réalisée par un dimensionnement adéquat des paramètres du système de contrôle. L'architecture de la structure de conversion doit être optimisée en fonction du profil de puissance de la charge. Cependant, il a été justifié, dans ce chapitre l'utilité d'asservir la tension de la capacité d'entrée pour des raisons de stabilité.

Chapitre III: Commande de la source hybride : pile à combustible/ supercondensateurs

III. 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats de simulation de notre système hybride. Les résultats de simulation sont effectués avec le logiciel de simulation numérique Matlab/Simulink.

III.2. Les résultats de simulation :

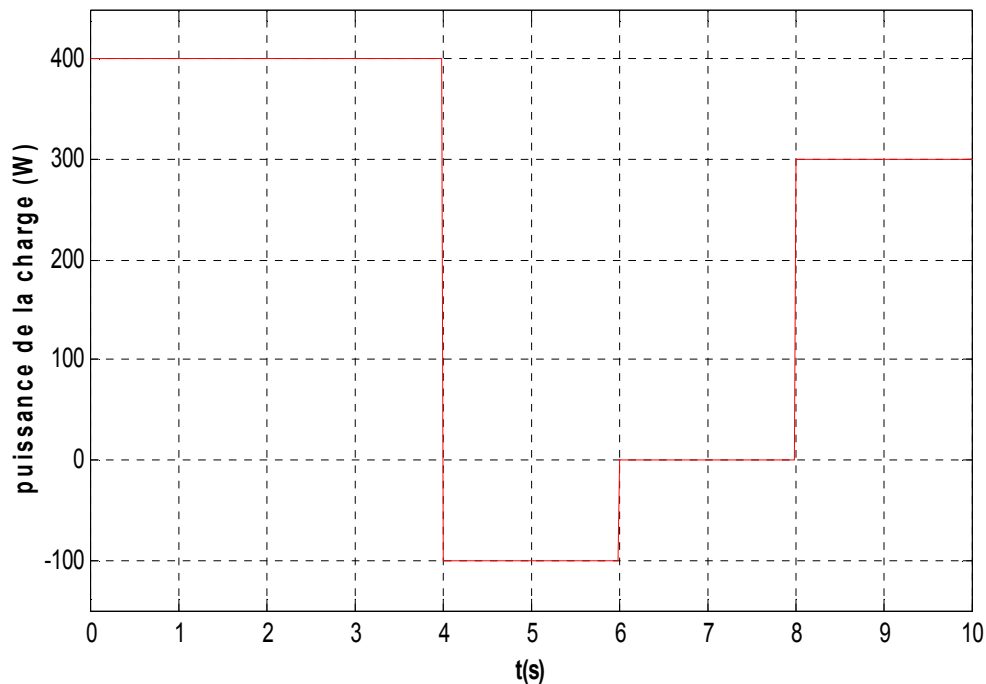
Dans la partie de simulation, nous avons utilisé les différents paramètres de notre sources hybrides qui sont présentés dans la tableau ci-dessous.

Parametre du dispositif
$V_{BusREF} = 42V$
$V_{SCREF} = 15V$
$L_{FC} = 0,2mH$
$r_{FC} = 0,04\Omega$
$L_{SC} = 0,1mH$
$r_{SC} = 0,05\Omega$
$C_{SC} = 175F$
$C_{Bus} = 3mF$

(Tab. III.1) : Tableau du paramètre du système

Pour la section de simulation, nous avons proposé un profil de charge présenté par la figure III. 1.

Pour voir le comportement de la source hybride, nous avons fixé P_{Ch} à 400W dans l'intervalle [0s,4s] et puis à -100W dans l'intervalle[4s,6s] et $P_{Ch}=0$ dans l'intervalle [6s,7s]et finalement $P_{Ch}=300W$ dans l'intervalle [8s,10s].

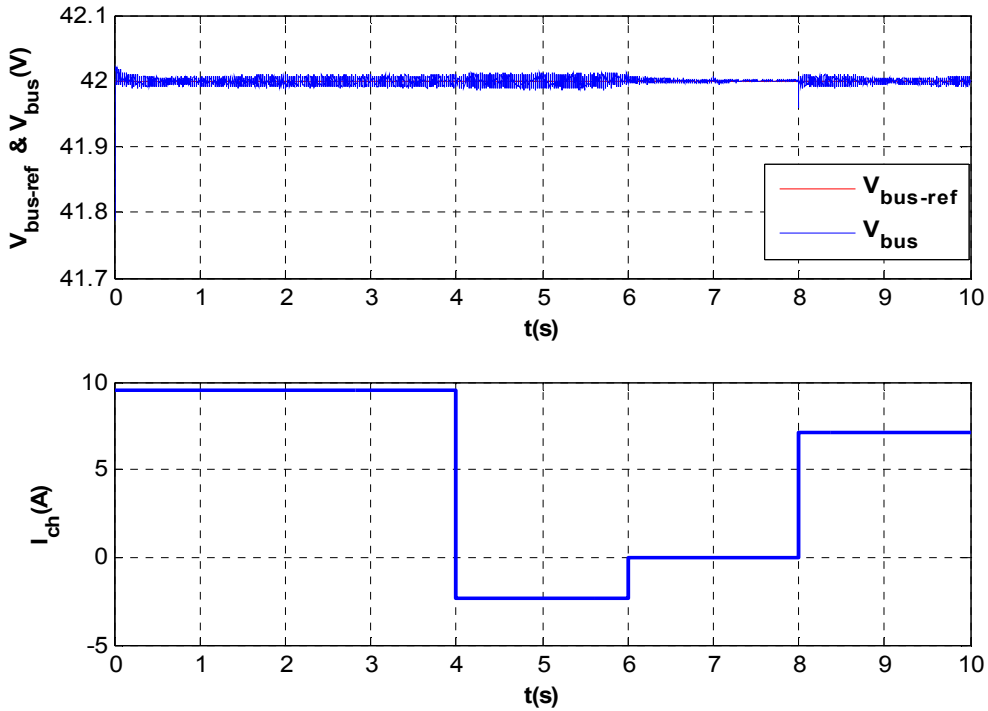


(Fig. III.1) : Le profil de charge

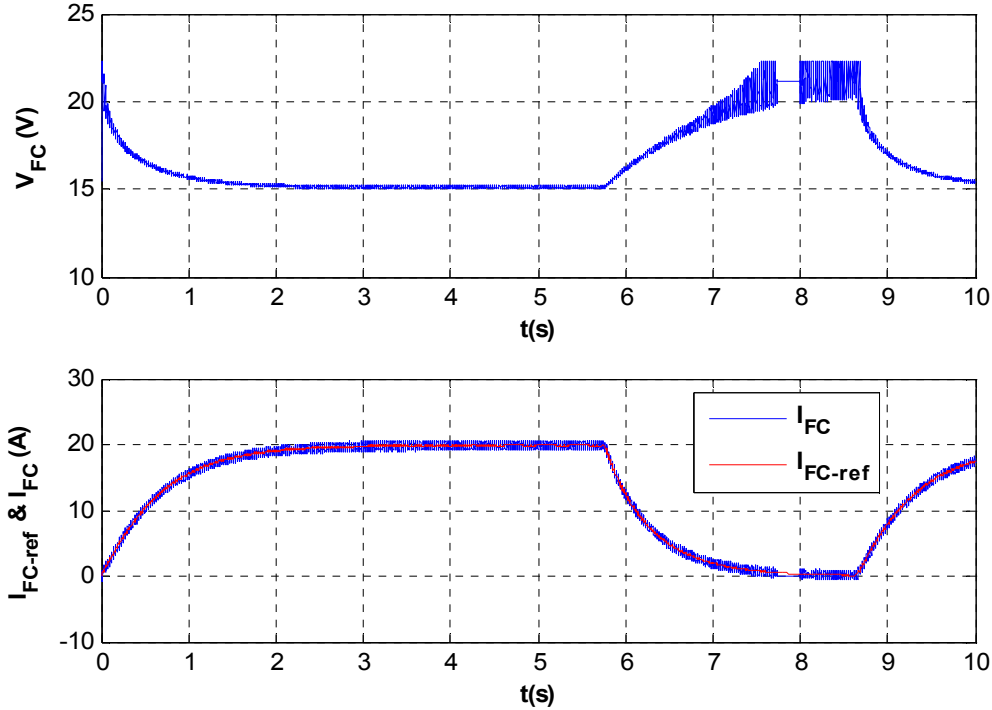
La figure III. 2 présenté la tension du bus-continu et sa référence et le courant de charge. On remarque de la tension V_{BUS} suit bien sa référence qui est égale à 42V quelque soit les variations de la charge sans erreur statique et le courant de la charge varie selon le profil de P_{Ch} .

La figure III. 3. présente les réponses de la pile à combustible V_{FC} et I_{FC} . On remarque que la tension V_{FC} est inversement proportionnelle avec I_{FC} , et le courant I_{FC} suit bien sa référence. Il est remarqué que le courant de la pile augmente en fonction de l'augmentation de la puissance de la charge.

Chapitre III: Commande de la source hybride : pile à combustible/ supercondensateurs



(Fig. III.2) : La tension V_{BUS} , V_{BUSREF} et le courant I_{Ch}

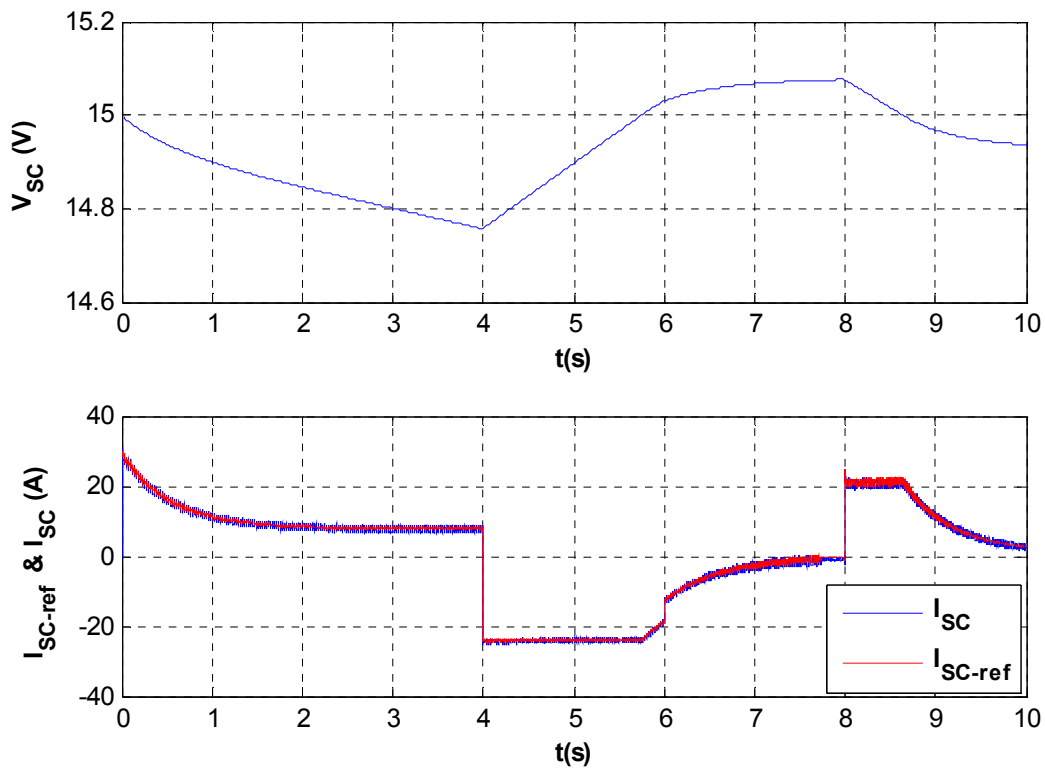


(Fig. III.3): La tension V_{FC} et le courant I_{FC} et sa référence

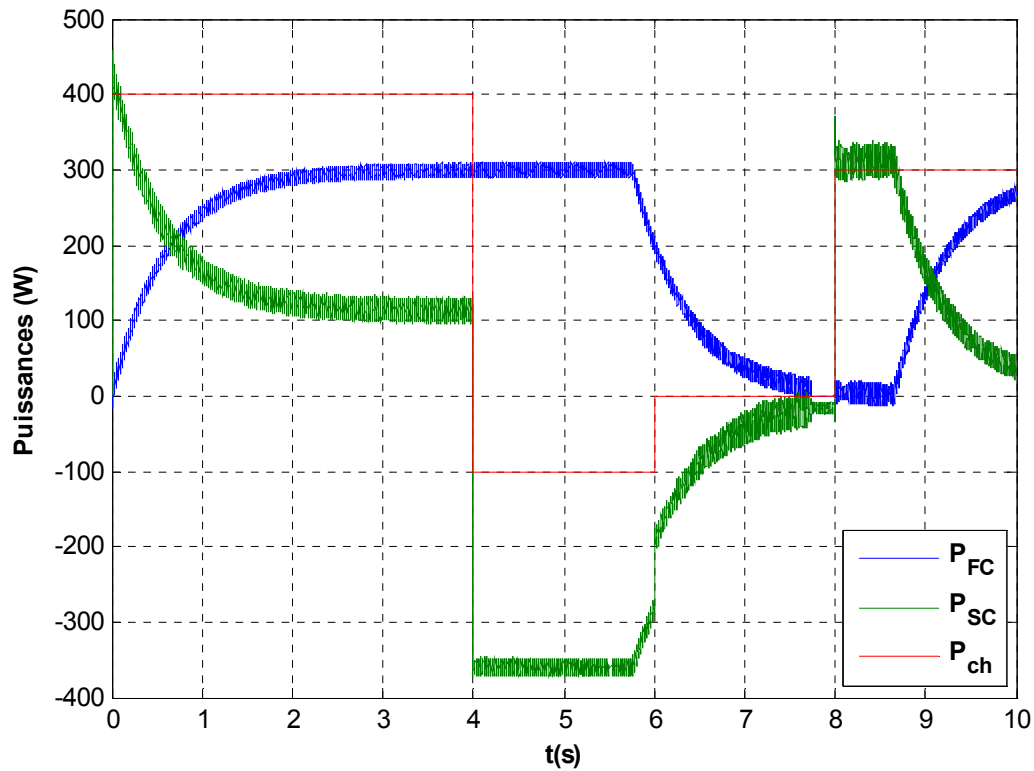
Chapitre III: Commande de la source hybride : pile à combustible/ supercondensateurs

La figure III. 4. présente les réponses du supercondensateur V_{SC} et I_{SC} . On remarque que la tension V_{SC} tombe si I_{SC} est positif et V_{SC} augmente quand I_{SC} est négatif. On observe aussi que I_{SC} suit bien sa référence.

La figure III. 5. présente les puissance des sources P_{FC} et P_{SC} , avec la puissance de la charge. On remarque que durant la période [0s,4s], les deux sources alimentent la charge en même temps. Durant la période [4s,6s], la pile à combustible et la charge fournissent la puissance au supercondensateur. Quant $P_{Ch} = 0$, la pile à combustible alimente le supercondensateur.



(Fig. III.4): La tension V_{SC} , le courant I_{SC} et sa référence



(Fig. III. 5): La puissance de P_{Ch} , P_{FC} et P_{SC}

III.3. Conclusion :

Dans ce chapitre on étudie la commande de la source hybride, pile à combustible et supercondensateur. Le but de la régulation de tension est de maintenir la tension de sortie du bus continu à une valeur fixe 42V quelque soit la variation de la charge. Les résultats présentés ont montré que la stratégie de commande est efficace.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté dans une première partie les différentes sources d'énergie et les dispositifs de stockage utilisés pour la réalisation d'une source hybride d'énergie électrique en expliquant leur mode de fonctionnement et leur modélisation usuelle. Nous avons ensuite détaillé une stratégie de contrôle des hacheurs basée sur le concept de platitude.

Ce mémoire étudié les généralités de la source hybride (la pile à combustible et les supercondensateurs) et le principe de fonctionnement les différents types de chaque source avec leurs applications. Ainsi ses avantages et ses inconvénients.

Les résultats obtenus par simulation confirment la validité des stratégies de commande et de supervision énergétique élaborées aux chapitres 2. La tension de sortie du système hybride électrique reste toujours constante même lors de variations de charge importante. La stratégie de gestion d'énergie utilisée tout comme les algorithmes de commande basés sur le concept de platitude peut être appliquée à toute architecture de source hybride et à la plupart des topologies de convertisseurs.

Cependant, les principales perspectives de ces travaux s'orientent vers la fiabilisation des systèmes multi-sources. Cette fiabilisation peut conduire à une répartition des sources électriques et des organes de stockage permettant de rendre cette structure modulaire et de généraliser le système de contrôle présenté.

Il est bien évident que cette fiabilisation passe par une étude permettant de garantir la stabilité du bus continu à la sortie de la source hybride quelle que soit l'évolution de la puissance absorbée par la charge.

Référence bibliographie :

- [1] S. Thomas, M. Zalbowitz, "Fuel Cells – Green Power, prepared for the U.S. Department of Energy, under contract W-7405-ENG-36," disponible à: <http://education.lanl.gov/resources/fuelcells/fuelcells.pdf>.
- [2] B. Cook, "An introduction to fuel cells and hydrogen technology," Engineering Science and Education Journal, vol. 11, no 6, Dec. 2002, pp. 205- 216.
- [3] J.M. Corrêa, F.A. Farret, L.N. Canha, M. Godoy Simões, "An electrochemical based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach," IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol. 51, no. 5, Oct. 2004, pp. 1103 - 1112.
- [4] J. Lachaize, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction," *Thèse de Doctorat INPT*, Toulouse, 20 Sep. 2004.
- [5] K. Kordesch et G. Simader, *Fuels Cells and Their Applications*, ed VCH (1996).
- [6] Fuel Cell Handbook (5ème édition), EG&G Services, Parson, Inc. Sciences Applications International Corporation (CD ROM).
- [7] SAMAH SAKER « Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur », thèse magister, Université Mohamed Khider – Biskra, Novembre 2014.
- [8] F.RAFIK, H.GUALOUS, R.GALLAY, A.CRAUSAZ, A.BERTHON, « Caractéristique électrique et thermique des supercondensateurs », Actes de Electronique de Puissance du Futur, 4p. , Grenoble, 2006.
- [9] M.-Y. Ayad, « Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues, » Vandoeuvre-les-Nancy, INPL ,2004.

- [10] F.BELHACHEMI, « Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001.
- [11] M. ZANDI, «Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergies électriques», thèse doctorat Université Nancy Institut National Polytechnique de lorraine, 2010.
- [12] D.BOUQUAIN, A.MIRAOU, « Les supercondensateurs : Principe, Modélisation et application. UTBM, Belfort Cedex-France.
- [13] I.VALERO EXPOSITO « Interfaçage et Contrôle Commande de Piles à Combustible pour Applications Stationnaires et Transport ». Thèse de doctorat, Université Joseph FOURIER, Décembre 2004.
- [14] D. PAIRE «Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements Électriques hybrides : application à un ascenseur avec récupération d'énergie ». Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Décembre 2010.
- [15] C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, A. Jeunesse, «Energy management and sizing of storage devices of a hybrid locomotive, » in 12 th Europ. Conf. On Power Elec. And Appl. (EPE'07), Aalborg(Denmark),2-5 Sep 2007.
- [16] R. Gopinath, et al, «Development of a low cost fuel cell inverter system with DSP control, » in :Proc. OF IEEE-PESC'02, Queensland, June 2002.
- [17] T. A. Nergaard, J.F. Ferrell,L.G. Leslie, J.S. Lai, «Design considerations for a 48 V fuel cell to split single phase inverter system with ultracapacitor energy storage, » in,:Proc.of IEEEPESC'02, Queensland, June 2002.
- [18] P. Thounthong, S. Raël, B. Davat, «Control strategy of fuel cell and supercapacitor association for a generation system, » IEEE Trans. Ind Electron ,Vol. 54, no 6, Dec. 2007, pp. 3225-3233.

[19] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. «Sur les systems non linéaires différentiellement plats, » *Comptes rendus de l'Académie des sciences Série 1, Mathématique*, vol. 315, PP. 619-624, 1992.

[20] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. «Flatness and defect of non-linear systems : introductory theory and examples, » *International journal of control*, vol. 61, PP. 1327-1361, 1995.

[21] Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy «Differential Flatness-Based Control for Fuel Cell Hybrid Power Source» January 21-22, 2010 Bangkok, Thailand

Introduction

Générale

Conclusion

Générale

Chapitre III

Chapitre II

Chapitre I

Bibliographie