

# Commande non-linéaire d'un système pile à combustible / supercondensateur

M. HILAIRET, O. BETHOUX, T. AZIB, R. TALJ

Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP) / SPEE-Labs, CNRS UMR 8507 ;  
SUPELEC ; Université Pierre et Marie Curie P6 ; Université Paris-Sud 11 ;  
11 rue Curie, Plateau de Moulon F91192 Gif sur Yvette CEDEX  
*mickael.hilaret@lgep.supelec.fr, olivier.bethoux@lgep.supelec.fr*

**Résumé**— Cet article présente la conception d'une loi de commande non-linéaire d'une structure d'hybridation énergétique associant une pile à combustible à membrane d'échange de protons avec des supercondensateurs, pour des applications à forte dynamique de puissance instantanée. La conception de la commande est basée sur la méthode de l'Assignment de l'Interconnexion et d'Amortissement - Commande basée sur la Passivité, et comparée à une architecture de commande plus classique élaborée à partir de régulateurs à action proportionnelle-intégrale. Les propriétés de stabilité, les degrés de réglage et les performances de cette nouvelle loi de commande sont discutées.

**Mots-clés**— Pile à combustible (PàC), supercondensateurs (SCs), hybridation énergétique, gestion d'énergie, passivité, commande IDA-PBC.

## I. INTRODUCTION

Afin de respecter les normes environnementales, le développement de véhicules électriques ou hybrides s'intensifie depuis l'année 2009. Dans ce contexte, le développement de système pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) comme source principale d'énergie est envisagé. L'association du réservoir d'hydrogène et de la PEMFC permettrait d'augmenter l'autonomie du véhicule et sa puissance. Toutefois, afin de garantir un bon état de santé de la pile, il est nécessaire que la pile débite un courant lentement variable, au plus de l'ordre de 4A/s, pour une PEMFC de 0,5kW/12,5V [1], et de l'ordre de 10A/s pour une PEMFC de 20kW/48V [2].

Pour répondre aux exigences des applications automobiles en terme de dynamique de puissance, la pile doit être associée à des sources secondaires, comme des batteries de puissance et/ou des SCs. Ainsi, une source hybride (dite aussi multi-sources) se compose d'un ensemble de sources permettant d'assurer les énergies permanente, transitoire et impulsionnelle, tantôt absorbées, tantôt fournies, par la charge.

Cet article présente une source d'énergie permanente, transitoire et unidirectionnelle en puissance (la pile à combustible) assistée d'une source d'énergie impulsionnelle réversible (les SCs). Plusieurs architectures électriques de ce système hybride existent et peuvent être classifiées en trois catégories [3], [4] : série, cascade, et parallèle. L'étude de la littérature associée a montré que l'architecture parallèle est la structure la plus avantageuse [3], [4], [5] : elle présente des contraintes plus faibles sur les composants, une facilité de gestion d'énergie et une fiabilité accrue. Trois topologies de structures parallèles pour le système de puissance hybride PàC/SCs peuvent être distinguées. Les trois objectifs majeurs de cette hybridation sont le respect de la dynamique de la pile à combustible (limitée principalement

par le temps de réponse du compresseur d'air), le contrôle de l'état de charge du dispositif de stockage (SCs) et la réponse à la puissance (positive ou négative) exigée par la charge.

La structure parallèle directe consiste à interconnecter chaque source à la charge. Compte-tenu de l'impédance plus élevée des PEMFC par rapport à celle des SCs, elle permet une prise en compte naturelle des contraintes de chaque source. Elle établit par ailleurs une corrélation souvent favorable entre état de charge des SCs et puissance instantanée de la charge. Par ailleurs, les spécificités de la PàC ne peuvent être totalement assurées car les pertes ohmiques des SCs induisent une transmission partielle des transitoires du courant de la charge vers la pile. Ceci ne peut être pallier que par une capacité des SCs surévaluée [6].

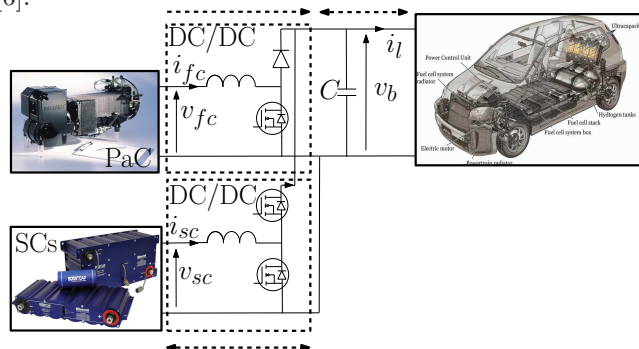


Fig. 1. Structure hybride PàC/SCs étudiée.

La structure parallèle à deux convertisseurs (Fig. 1) consiste à associer à chaque source un convertisseur statique [7]. Elle permet de maîtriser parfaitement le flux de puissance de chaque source. Toutefois, ses inconvénients sont les inévitables pertes associées à chaque convertisseur statique et un coût plus élevé. En particulier, la puissance délivrée par la source permanente (PàC) est continuellement diminuée par les pertes de son convertisseur.

La structure parallèle à un convertisseur consiste à connecter directement la PàC à la charge et à n'utiliser qu'un seul convertisseur "d'interface" pour régler les flux de puissance [8]. Ce convertisseur n'est utilisé que de manière intermittente, puisqu'il assure l'adaptation des grandeurs électriques (tension / courant) entre les SCs et la charge. Ses avantages principaux sont la simplicité et la réduction des pertes et des coûts liés aux interfaces de gestion de puissance.

Ces deux dernières architectures peuvent parfaitement répondre aux exigences mentionnées. Ce papier se consacre à l'étude de la structure présentée sur la Fig. 1.

## II. STRATÉGIE DE COMMANDE BASÉE SUR DES RÉGULATEURS PI

Une première stratégie de contrôle des degrés de liberté de la structure à deux convertisseurs a été développée dans [8]. Elle s'appuie sur le découplage fréquentiel des réponses de chaque source (Fig. 2), vis-à-vis des sollicitations de la charge [9]. Le condensateur du bus continu filtre les hautes fréquences (i.e. supérieure au kHz), le SC associé à son convertisseur fournit les moyennes fréquences (du kHz au Hz) et la PaC assure les basses fréquences (inférieure au Hz). Ce découplage fréquentiel des spécificités des sources induit naturellement une stratégie de gestion basée sur des boucles en cascade présentée dans la Fig. 3.

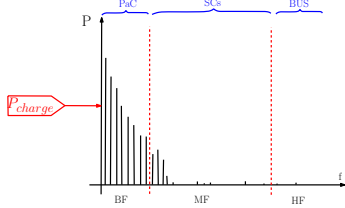


Fig. 2. Principe de base de la décomposition fréquentielle.

Toute modification de la puissance de charge induit une variation de la tension du bus. Il semble donc judicieux d'utiliser cette grandeur afin de solliciter les SCs pour les transitoires rapides en calculant la référence du courant  $i_{sc}^*$ , et ainsi réguler la tension de bus à sa référence. Par ailleurs, la boucle extérieure de tension associée à la gestion de SCs doit maintenir la tension de bus constante à sa référence  $v_b^*$  fixée à 50V.

D'autre part, plus cette poursuite de tension sera rapide, plus la valeur de capacité  $C$  sera petite. Le courant de référence  $i_{sc}^*$  calculé doit avoir une valeur absolue plus basse que le courant nominal ( $|i_{sc}| < i_{nom}$ ), lié à l'échauffement et l'efficacité énergétique. Cela est assuré par un signal délivré par la fonction de saturation qui permet de plus à la tension  $v_{sc}$  d'être maintenue dans l'intervalle  $[(v_{sc})_{min}, (v_{sc})_{max}]$ . De même que pour les boucles de courant, le correcteur est à action proportionnelle-intégrale. Ainsi, la bande passante de cette boucle est choisie au dixième de celle du courant. Cependant, la sollicitation de l'assistance entraînerait une décharge permanente des SCs, ce qui imposerait un surdimensionnement de ces derniers pour qu'ils soient capables de fournir en permanence de la puissance lors des transitoires rapides. Par conséquent, le système de commande doit contrôler l'état de charge des SCs. Cela peut être assuré par une boucle de compensation dont le but est de réguler la tension des SCs  $v_{sc}$  à leurs références  $v_{sc}^*$ .

Le correcteur mis en place dans la boucle de compensation est à action proportionnelle-intégrale. Ainsi, sa bande passante est choisie pour respecter les contraintes de la PaC, de l'ordre du Hz. Cette fréquence est très inférieure à celle des boucles de courant et de tension du bus. Aussi, la boucle de compensation génère t'elle une consigne de courant  $i_{fc}^*$  lente. Cela respecte le découplage fréquentiel nécessaire au découplage des boucles imbriquées et autorise la bonne régulation des SCs à leurs niveaux de tension de référence.

Le découplage fréquentiel adopté dans [8] valide la démarche exposée et démontre une meilleure efficacité

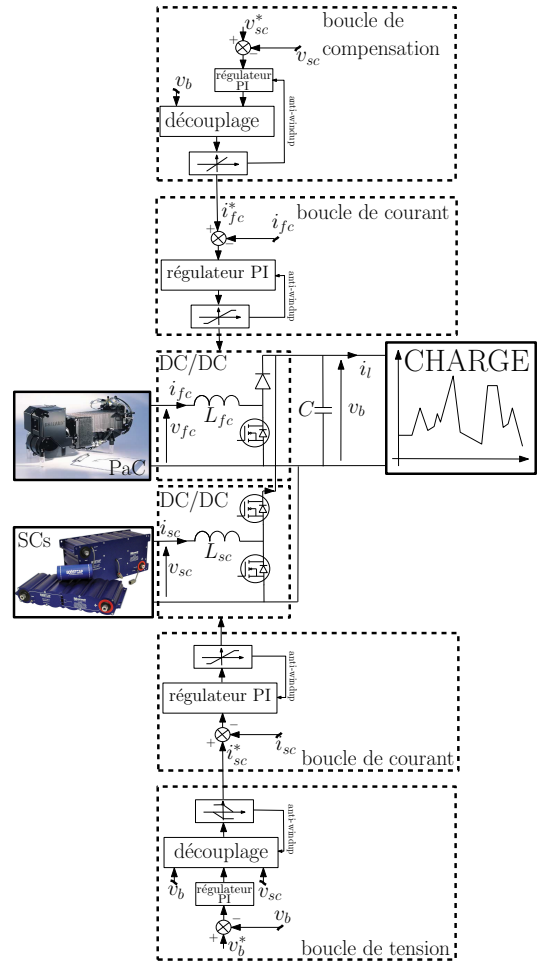


Fig. 3. Schéma de principe de la stratégie de contrôle et de la gestion d'énergie pour la structure à deux convertisseurs.

énergétique que sans assistance [10]. Les SCs assurent les transitoires de puissance, tandis que le courant délivré par la PaC est lentement variable afin d'assurer sa longévité. Les réglages sont basés sur un découplage fréquentiel qui assure la stabilité du système bouclé, bien que celle-ci n'est pas démontrée théoriquement.

Une solution alternative consiste donc à développer une commande linéaire ou non-linéaire ayant les mêmes objectifs et garantissant directement la stabilité du système bouclé. Dans ce travail, nous avons développé une commande basée sur la passivité pour ses nombreux avantages théoriques et pratiques.

## III. STRATÉGIE DE COMMANDE BASÉE SUR LA PASSIVITÉ

### A. Introduction

La seconde stratégie de commande est basée sur la passivité (PBC, Passivity-Based Control). Cette dénomination "commande basée sur la passivité" a été introduite pour la première fois dans [12] pour définir une méthodologie de conception de commandes assurant la stabilité des systèmes en les rendant passif. Un système de la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u; & x \in \mathbb{R}^n; u \in \mathbb{R}^m \\ y &= h(x); & y \in \mathbb{R}^p \end{aligned} \quad (1)$$

est dit passif [13], [14], [15] par rapport à la fonction de cadence d'approvisionnement (supply rate)  $s(u, y) = u^T y$ ,

s'il existe une fonction non négative  $C^0$ , appelée fonction de stockage,  $H : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , vérifiant  $H(0) = 0$ , et telle que pour toutes conditions initiales  $x_0$ , pour tout  $t > 0$  et toute entrée de commande  $u(\cdot)$ , l'inégalité suivante est vérifiée :

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

"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  $u = 0$  ou  $y = 0$  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 [15] pour obtenir des détails supplémentaires

### B. Système Hamiltonien Commandé par Port

La PBC définit 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 grands groupes. La PBC "classique" pour laquelle le concepteur de l'asservissement choisit *a priori* la fonction de stockage (en général 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 laissée libre, mais le concepteur s'impose une structure de contrôle, par exemple Lagrangienne ou Hamiltonienne commandée par port (PCH). Il caractérise ensuite l'ensemble des fonctions d'énergie assignables. Cette caractérisation est donnée en termes de solutions d'équations différentielles partielles (EDP). Les exemples les plus notables de cette approche sont les systèmes Lagrangiens commandés, et l'Assignment d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA pour Interconnection and Damping Assignment) [16]. 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 (1) en fonction du gradient de la fonction d'énergie :

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

Ainsi, la forme PCH du système initial (1) est

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J(x) - \mathcal{R}(x)]\nabla H(x) + g(x)u \\ y &= g^T \nabla H(x) \end{aligned} \quad (2)$$

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

L'équation (2) 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 semi-définie positive de la matrice d'amortissement  $\mathcal{R}(x)$  indique que les termes appartenant cette matrice sont des termes associés la dissipation.

### C. Méthodologie d'Assignment d'Interconnexion et d'Amortissement IDA-PBC

Soit le système non linéaire décrit par (1), que l'on veut stabiliser autour d'un point d'équilibre  $\bar{x} \in \mathbb{R}^n$ . Supposons l'existence des matrices suivantes :  $g^\perp(x)$  est telle que  $g^\perp(x)g(x) = 0$ ,  $J_d(x) = -J_d^T(x)$ ,  $\mathcal{R}_d(x) = \mathcal{R}_d^T(x) \geq 0$  comme étant les matrices d'interconnexion et d'amortissement désirées ainsi que la fonction d'énergie choisie  $H_d : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^+$  qui a son minimum au point d'équilibre désiré, ainsi  $\bar{x} = \operatorname{argmin}(H_d)$ . Le système (1) en boucle fermée avec la commande  $u$ , telle que

$$u = [g^T(x)g(x)]^{-1} g^T(x) \{ [J_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d - f(x) \}$$

a la forme PCH suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d \\ y &= g^T(x) \nabla H_d \end{aligned} \quad (3)$$

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 (3) contenu dans  $\{x \in \mathbb{R}^n | \dot{H}_d = 0\}$  est égal à  $\bar{x}$ .

### D. Conception de la loi de commande

#### D.1 Structure de la loi de commande

Une première solution pour concevoir la loi de gestion d'énergie consiste à synthétiser une commande sur la base d'un modèle non-linéaire (voir [17]). Toutefois, ce type de commande ne permet pas un contrôle sécuritaire des courants, défaut inhérent aux commandes par retour d'état. En effet, ce type de commande ne garantit pas que les courants  $i_{fc}$  et  $i_{sc}$  restent dans une bande maximale, afin de protéger la source, les convertisseurs et la charge.

Une solution classique consiste donc à élaborer un loi de commande en cascade, comme précédemment détaillée dans la section II. La Fig. 4 représente la loi de commande adoptée dans ce travail. Elle est composée de trois sous-systèmes : une boucle interne de contrôle du courant de la pile via un régulateur PI, une boucle interne de contrôle du courant des supercondensateurs via un régulateur PI et une boucle externe de gestion de la tension de bus et de l'état de charge des supercondensateurs.

#### D.2 Modélisation du système pile à combustible

Dans le cadre de cette étude, la modélisation des différents éléments est celle prise en compte dans de nombreux travaux [17], [18].

D.2.a Modèle de la pile à combustible. Le modèle utilisé est un modèle statique, dont la tension  $v_{fc}$  est calculée en fonction du courant de la pile  $i_{fc}$ . La tension  $v_{fc}$  est représentée par une fonction polynomiale d'ordre 5 fonction du courant de la pile  $i_{fc}$ , comme représentée à la Fig. 5.

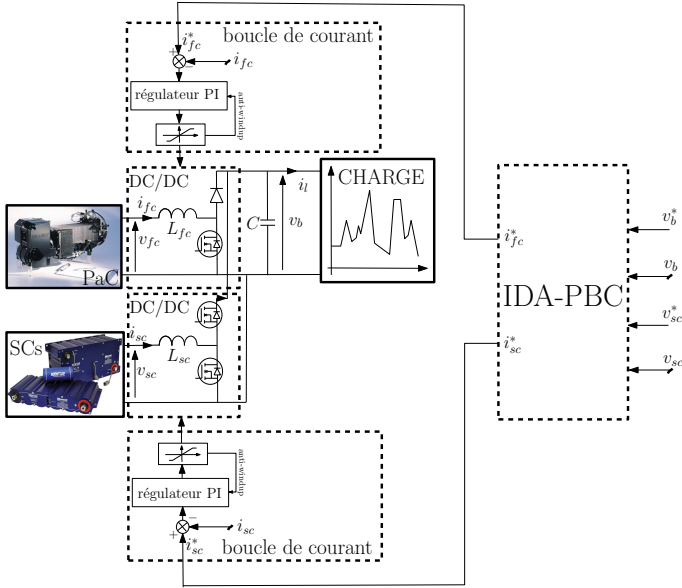


Fig. 4. Représentation de la loi de commande IDA-PBC.

D.2.b Convertisseur survolteur de la PàC. Le convertisseur survolteur représenté à la Fig. 6 a comme grandeur de commande l'entrée binaire  $w_1(t)$ .

En posant  $\alpha_1$  le rapport cyclique de la variable de commande  $w_1(t)$ , ce sous-système peut être représenté par son modèle aux valeurs moyennes :

$$\frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}} (- (1 - \alpha_1) v_b + v_{fc})$$

D.2.c Convertisseur survolteur des SCs. La connexion des éléments de stockage sur le bus continu doit se faire par l'intermédiaire d'un convertisseur statique réversible en courant, puisque les SCs peuvent être chargés ou déchargés.

Le supercondensateur utilisé ici a une capacité constante  $C_{sc}$  et des pertes négligeables. Il est associé à une inductance  $L_{sc}$  et une cellule de commutation élémentaire comme le montre la Fig. 7. Cette cellule est bidirectionnelle en courant. Deux types de fonctionnement sont donc possibles : un fonctionnement dévolteur quand les SCs reçoivent de l'énergie du bus continu, et un fonctionnement survolteur quand les SCs fournissent de l'énergie au bus continu.

Posons  $\alpha_2$  le rapport cyclique de la variable de commande  $w_2(t)$ . Ce second sous-système se représente, en modèle aux valeurs moyennes, par les deux équations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{di_{sc}}{dt} &= \frac{1}{L_{sc}} (- (1 - \alpha_2) v_b + v_{sc}) \\ \frac{dv_{sc}}{dt} &= -\frac{i_{sc}}{C_{sc}} \end{aligned}$$

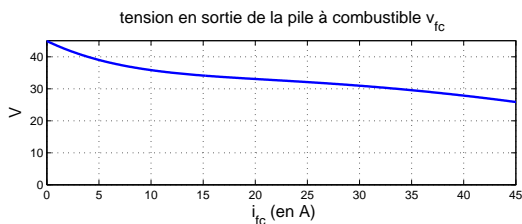


Fig. 5. Tension de la pile en fonction du courant débité.

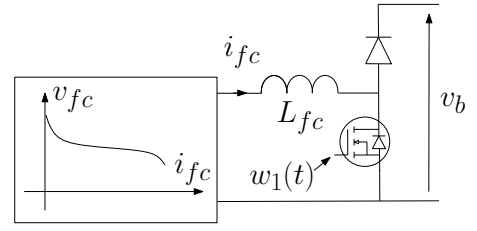


Fig. 6. Représentation du convertisseur survolteur de la PàC.

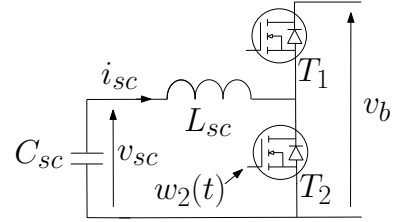


Fig. 7. Représentation du convertisseur survolteur des SCs.

D.2.d Modélisation du bus continu et de la charge. La figure ci-dessous représente le modèle du bus continu et de la charge. Dans notre travail, la charge est modélisée par un circuit  $(R_l - L_l)$ , dont la valeur de la résistance  $R_l$  est variable en fonction de la puissance demandée par la charge. Le modèle aux valeurs moyennes est donc :

$$\begin{aligned} \frac{dv_b}{dt} &= \frac{1}{C} ((1 - \alpha_1) i_{fc} + (1 - \alpha_2) i_{sc} - i_l) \\ \frac{di_l}{dt} &= \frac{1}{L_l} (- R_l i_l + v_b) \end{aligned} \quad (4)$$

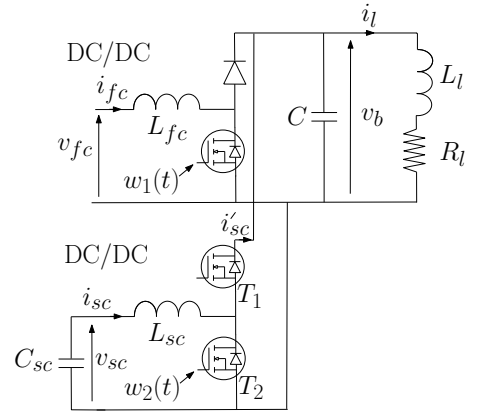


Fig. 8. Représentation du modèle de la charge.

D.2.e Modèle complet. Il en découle que le système complet "pile à combustible - supercondensateurs" peut être représenté par le modèle d'état d'ordre 5 :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{(1 - \alpha_1) x_4 + (1 - \alpha_2) x_5 - x_3}{C} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{x_5}{C_{sc}} \\ \dot{x}_3 &= \frac{-R_l x_3 + x_1}{L_l} \\ \dot{x}_4 &= \frac{-(1 - \alpha_1) x_1 + z}{L_{fc}} \\ \dot{x}_5 &= \frac{-(1 - \alpha_2) x_1 + x_2}{L_{sc}} \end{aligned}$$

avec le vecteur d'état  $x(t)$

$$x = [x_1; x_2; x_3; x_4; x_5]^t = [v_b; v_{sc}; i_l; i_{fc}; i_{sc}]^t$$

les entrées de commande  $u(t) = [u_1; u_2]^t = [1 - \alpha_1; 1 - \alpha_2]^t$  et les mesures  $y(t) = x$  et  $z(t) = v_{fc}$ .

### D.3 Boucle externe

Le contrôle des courants étant assuré par deux boucles internes rapides, nous pouvons supposer que les courants sont égaux à leurs références. Dans ces conditions, le système d'ordre 5 peut être ramené à un système réduit d'ordre 3, dont l'équation d'état est donné ci-dessous :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{1}{C} \left( \frac{z_3}{x_1} u_1 + \frac{x_2}{x_1} u_2 - x_3 \right) \\ \dot{x}_2 &= -\frac{u_2}{C} \\ \dot{x}_3 &= \frac{-R_{sc} x_3 + x_1}{L_l}\end{aligned}$$

avec

$$x = [x_1; x_2; x_3]^t = [v_b; v_{sc}; i_l]^t;$$

les entrées de commande  $u = [u_1; u_2]^t = [i_{fc}; i_{sc}]^t$  et les mesures  $y = [v_b; v_{sc}; i_l]^t$  et  $z = [i_{fc}; i_{sc}; v_{fc}]^t$ , dont le point d'équilibre désiré  $\bar{x}$  est  $[\bar{x}_1; \bar{x}_2; \bar{x}_3] = [v_b^*; v_{sc}^*; \frac{v_b^*}{R_l}]$ , avec  $v_b^*$  et  $v_{sc}^*$  les tensions de référence du bus continu et des SCs respectivement, et dont la fonction de stockage  $H(x) = \frac{1}{2} x^t Q x$  avec  $Q = \text{diag}(C; C_{sc}; L_l)$ .

### D.4 Modèle PCH du système d'ordre réduit

On souhaite synthétiser la fonction d'énergie  $H(x)$  afin que son minimum soit atteint au point d'équilibre désiré  $\bar{x}$ . Aussi, le choix de la fonction d'énergie  $H$  se porte-t-il sur :

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^t Q \tilde{x} \quad \text{avec} \quad \tilde{x} = x - \bar{x}$$

Dans ces conditions, l'écriture du système PCH (2) en terme de la dynamique de l'erreur et du gradient de la fonction d'énergie désirée en boucle fermée  $\nabla H_d$  est :

$$\dot{\tilde{x}} = [J - \mathcal{R}] \nabla H_d + A(u, \bar{x})$$

avec

$$J - \mathcal{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_l C} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_l C} & 0 & -\frac{R_l}{L_l^2} \end{bmatrix}, \quad \nabla H_d = \begin{bmatrix} C \tilde{x}_1 \\ C_{sc} \tilde{x}_2 \\ L_l \tilde{x}_3 \end{bmatrix}$$

$$A(u, x, \bar{x}, z) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \left( \frac{z_3}{x_1} u_1 + \frac{x_2}{x_1} u_2 - \bar{x}_3 \right) \\ -\frac{1}{C_{sc}} u_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### D.5 Loi de commande IDA-PBC

Afin que la dynamique de l'erreur du système en boucle fermée s'écrive de la manière suivante :

$$\dot{\tilde{x}} = [J_d - \mathcal{R}_d] \nabla H_d$$

une solution possible consiste à prendre comme loi de commande :

$$\begin{aligned}u_1 &= \frac{x_1}{z_3} \left( \frac{\bar{x}_1}{R_l} - r_1 \tilde{x}_2 \right); & r_1 &> 0 \\ u_2 &= -r_1 \tilde{x}_1\end{aligned}$$

avec

$$J_d = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{r_1}{C C_{sc}} & -\frac{1}{L_l C} \\ \frac{r_1}{C C_{sc}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_l C} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{R}_d = \begin{bmatrix} \frac{x_2 r_1}{x_1 C^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_l}{L_l^2} \end{bmatrix}$$

La preuve de stabilité asymptotique se déduit de l'analyse de la dérivée de  $H_d$  :

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^t \dot{\tilde{x}} = -\nabla H_d^t \mathcal{R}_d \nabla H_d \leq 0$$

et du principe d'invariance de LaSalle avec  $H_d(\bar{x}) = \dot{H}_d(\bar{x}) = 0$ . De plus,  $H_d$  étant radialement non bornée, le système bouclé est globalement asymptotiquement stable.

L'analyse de l'équation de la commande montre que les SCs assurent l'apport d'énergie suite à une erreur sur la régulation de la tension du bus, cette erreur étant elle-même due à des variations brusques de puissance ou de la tension de référence du bus. La consigne  $i_{fc}^*$  montre que la pile assure deux objectifs :

- le transfert d'énergie permanent de la pile vers la charge,
- l'apport d'énergie pour réguler la tension des SCs.

Comparativement à la première commande, le nombre de degrés de liberté de la commande IDA-PBC est de un paramètre, afin que la machine  $J(x)$  soit une matrice antisymétrique. Ceci peut être vu comme un point faible de cette commande.

## IV. RÉSULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSION

Les figures 9 et 10 présentent la réponse du système hybride vis-à-vis d'un scénario décomposé en deux étapes :

- une variation de la référence de la tension du bus à charge constante ( $R_l = 10\Omega$ ) entre les instants 0 et 16s,
- puis une variation de la charge de 100% à tension du bus constante à l'instant 16s.

La figure 9 montre que la commande assure un contrôle parfait de la tension du bus, les SCs réagissent rapidement aux transitoires rapides de courant pour assurer la majeure partie du front raide de la puissance exigée par la charge et de maintenir la tension du bus à sa valeur de référence. Cela permet à la pile de réagir aux sollicitations de la charge sans variation brusque de son courant (9.e), ce qui améliore sa durée de vie. Puis, au fur et à mesure de l'augmentation du courant de la PàC, la décharge des SCs caractérisée par la diminution de sa tension, s'atténue jusqu'à s'annuler (9.b, 9.e).

Toutefois, nous pouvons constater que la tension des SCs n'est pas régulée à la valeur de référence de 12V entre l'instant 16 et 20s étant donné que la référence du courant de la pile suppose la valeur de la résistance de charge comme connue. Dans ces conditions, les SCs assurent un apport d'énergie trop important lors du transitoire de puissance et la recharge des SCs n'est pas assurée.

Afin de remédier à ce problème, on ajoute à la commande  $u_1 = i_{fc}^*$  un léger effet intégrateur. La commande est alors :

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= \gamma \tilde{x}_2 \\ u_1 &= \frac{x_1}{z_3} \left( \frac{\bar{x}_1}{R_l} - r_1 \tilde{x}_2 \right) - x_c; & r_1 &> 0 \\ u_2 &= -r_1 \tilde{x}_1\end{aligned}$$

La Figure 10 présente la réponse du système. On observe que la tension du bus et des SCs est alors bien asservie. Il s'établit alors un régime de rééquilibrage, caractérisé ici par une recharge des SCs à leurs valeurs de référence fixées à 12V.

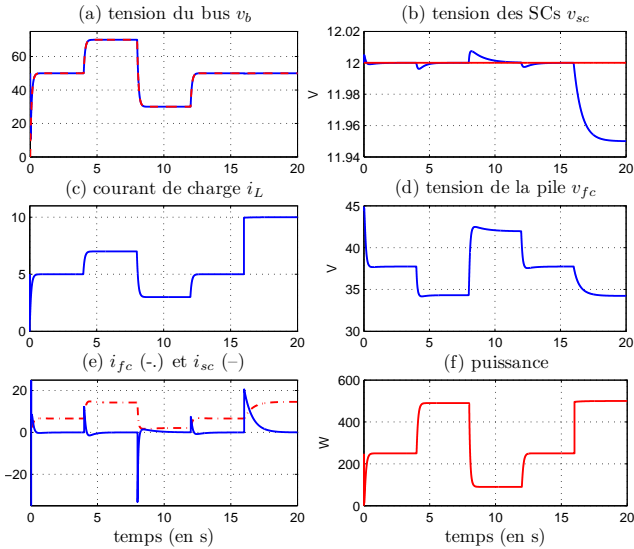


Fig. 9. Résultat de simulation pour un profil de puissance de charge ( $r_1=100$ ).

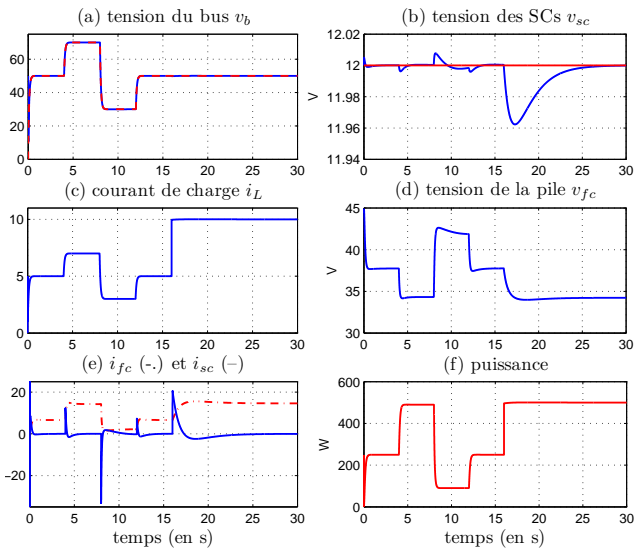


Fig. 10. Résultat de simulation avec un commande incluant un effet intégrateur ( $r_1=100$ ,  $\gamma=50$ ).

## V. CONCLUSION

Dans cet article, une nouvelle stratégie de commande assurant une gestion de l'énergie entre deux sources d'énergie, à savoir une pile à combustible et des supercondensateurs est abordée. Cette nouvelle loi de commande basée sur la passivité assure une stabilité asymptotique du système bouclé, tout en réduisant les sollicitations de la charge sur les transitoires de puissance de la pile. Les résultats de simulation montrent un bon comportement de la commande aux sollicitations de la charge. De plus, cette commande comporte un unique paramètre de réglage, ce qui lui confère une facilité d'implémentation sur le dispositif réel.

Toutefois, la commande pré-suppose la connaissance de la valeur de la résistance de charge. Dans ce travail, l'ajout d'un effet intégrateur a permis de compenser cette imperfection. Lors de travaux dans un futur proche, deux autres solutions vont être étudiées : la première consiste à développer un estimateur de la résistance de charge basé sur la seconde équation de (4) et en supposant une

évolution lentement variable de la résistance de la charge ( $\hat{R}_l \cong 0$ ), tandis que la seconde voie consistera à élaborer une commande IDA-PBC adaptative.

## RÉFÉRENCES

- [1] Thounthong P., Raël S., Davat B., "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 193, Issue 1, pp. 376-385, Aou. 2009.
- [2] Corbo P., Migliardina F., Veneri O., "PEFC stacks as power sources for hybrid propulsion systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 10, pp. 4635-4644, Mai 2009
- [3] Giulii F., Cacciato M., "Using Super Capacitors in combination with Bi-Directional DC/DC Converters for Active Load. Management in Residential Fuel Cell Applications," *1st European Symposium on Supercapacitors, IEEE-ESSCAP'04*, 2004.
- [4] Cacciato M., F. Caricchi, Giuhlii F., Santini E., "A critical evaluation and design of bi-directional DC/DC converters for supercapacitors interfacing in fuel cell applications," *IEEE Industry Applications Conf., IEEE IAS'04*, Vol.2, pp. 1127-1133, Oct. 2004.
- [5] Jiang Z., Gao L., Blackwelder M.J., Dougal R.A., "Design and experimental tests of control strategies for active hybrid fuel cell/battery power sources," *J. Power Sources*, Vol.130, pp. 163-171, 2004.
- [6] Garcia Arregui M., Turpin C., Astier S., "Groupe électrogène pour aéronef à pile à combustible hybridée par supercondensateurs," *Conférence EF 2007*, Toulouse, Sept. 2007.
- [7] Tounthong P., Raël S., Davat B., "Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system," *International Journal of Electrical Engineering in Transportation*, Vol.1, No.1, 2005.
- [8] Azib T., Bethoux O., Remy G., Marchand C., "Structure and Control Strategy for a Parallel Hybrid Fuel Cell/Supercapacitors Power Source," *IEEE VPPC'09* in Dearborn, Michigan, Sept 7-11. 2009.
- [9] P. Chapoulie, S.Astier, "Modeling of an electric vehicle including ultracapacitors with SABER", *EPE*, 1999.
- [10] Azib T., Bethoux O., Marchand C., Berthelot E., "Supercapacitors for Power Assistance in Hybrid Power Source with Fuel Cell," *IEEE Industrial Electronics Society Conference IECON'09*, Porto, Portugal, 2009.
- [11] Corbo P., Migliardini F., Veneri O., "Dynamic behaviour of hydrogen fuel cells for automotive application," *Elsevier, Renewable Energy*, Vol.34, No.8, pp.1955-1961 Aug. 2009.
- [12] R. Ortega, M. Spong, "Adaptive motion control of rigid robots : A tutorial," *Automatica*, 25(6), pp. 877-888, 1989.
- [13] C. Byrnes, A. Isidori, J.C. Willems, "Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems," *IEEE Trans. on Automat. Contr*, volume 36(11), pp. 1228-1240, 1991.
- [14] A.J. van der Schaft, "L2-Gain and Passivity Techniques in Non-linear Control," *Springer-Verlag*, Berlin, 1996.
- [15] R. Ortega, A. Loria, P.J. Nicklasson, H. Sira-Ramirez, "Passivity-based control of Euler-Lagrange systems," *Springer-Verlag*, Berlin, 1998.
- [16] R. Ortega, A. van der Schaft, B. Maschke, G. Escobar, "Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems," *Automatica*, 38(4), pp. 585-596, 2002.
- [17] M. Becherif, "Passivity-based control of hybrid sources : fuel cell and battery," *11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*, The Netherlands, 2006.
- [18] S. Caux, J. Lachaize, M. Fadel, P. Shott, L. Nicod, "Modelling and control of a Fuel Cell System and Storage Elements in transport applications," *Elsevier, Journal of Process Control*, Vol. 15, pp.481-491, 2005.

TABLE I  
PARAMÈTRES DU SYSTÈME.

Capacité $C_{sc}$	125 F
inductance $L_{fc}$	200 $\mu$ H
inductance $L_{sc}$	100 $\mu$ H
Capacité $C$	14 mF