



HAL
open science

Système hybride à pile à combustible et supercondensateur : structures, contrôle commande et gestion d'énergie

Toufik Azib, Olivier Bethoux, Ghislain Remy, Claude Marchand, Éric
Berthelot

► **To cite this version:**

Toufik Azib, Olivier Bethoux, Ghislain Remy, Claude Marchand, Éric Berthelot. Système hybride à pile à combustible et supercondensateur : structures, contrôle commande et gestion d'énergie. European Journal of Electrical Engineering, 2011, 14 (2-3), pp.363 - 382. 10.3166/ejee.14.363-382 . hal-02054693

HAL Id: hal-02054693

<https://hal.science/hal-02054693v1>

Submitted on 8 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Accepted Manuscript

Système hybride à pile à combustible et supercondensateur :
structures, contrôle-commande et gestion d'énergie

Toufik AZIB, Olivier BETHOUX, Ghislain REMY, Claude MARCHAND,
Eric BERTHELOT



DOI: [10.3166/ejee.14.363-382](https://doi.org/10.3166/ejee.14.363-382)

Publisher: Lavoisier

To appear in: *European Journal of Electrical Engineering*

Date of Publication: 2011 (Volume 14, Number 2-3)

Please cite this article as: Toufik Azib, Olivier Bethoux, Ghislain Remy, Claude Marchand, Eric Berthelot, Système hybride à pile à combustible et supercondensateur, The European Journal of Electrical Engineering, Volume 14, Issue 2-3, 2011, Pages 363-382, DOI: 10.3166/EJEE.14.363-382.

Document Version: Early version, also known as pre-print

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Système hybride à pile à combustible et supercondensateur : structures, contrôle-commande et gestion d'énergie

**Toufik AZIB — Olivier BETHOUX — Ghislain REMY,
Claude MARCHAND — Eric BERTHELOT**

*Laboratoire de Génie Electrique de Paris, SUPELEC / CNRS (UMR 8507),
Université Paris Sud 11 / Université Pierre et Marie Curie
11 rue Joliot Curie
F-91192 Gif-sur-Yvette
Toufik.Azib@lgep.supelec.fr, Olivier.Bethoux@lgep.supelec.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente une étude d'un système hybride utilisant une pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC) associé à des supercondensateurs pour des applications à forte dynamique de puissance instantanée telles que les véhicules électriques. Après une présentation du cahier des charges, différentes architectures hybrides sont analysées, et deux configurations de type parallèle sont explorées plus en détail. Pour chacune d'elles, à partir d'une stratégie de contrôle permettant une gestion efficace des flux d'énergie, une validation expérimentale montre les performances obtenues pour la traction d'un véhicule électrique dont la cinématique suit un profil de mission donné.

ABSTRACT. This paper deals with a study of the hybrid system using membrane of exchange of protons fuel cell (PEMFC) with supercapacitors for applications with strong dynamics of instantaneous power, as in the electrical vehicles. After a description of the power requirements, different hybrid structure are analysed, and two parallel structures are more detailed. For each of them, from a control strategy allowing an effective flows energy management, an experimental validation shows the performances obtained on a mission profile given by the vehicle dynamics.

MOTS-CLÉS : Pile à combustible, supercondensateurs, hybridation énergétique, gestion d'énergie, validation expérimentale.

KEYWORDS: Fuel Cell, Supercapacitors, Energy hybridization, Energy management, Experimental validation.

1. Introduction

Les applications automobiles doivent faire face à des normes environnementales de plus en plus sévères tant du point de vue des pollutions locales (NOX, suies, ...) que des gaz à effet de serre (Cabal *et al.*, 2005). Dans ce contexte, le véhicule électrique présente un potentiel de développement important. Une solution consistant à utiliser une pile à combustible (PàC) à membrane d'échange de protons (PEMFC) est envisagée à moyen terme (Européen, 2006), en raison de sa haute efficacité d'énergie, de son fonctionnement à basse température (~ 80 °C), de sa construction robuste (peu de parties mobiles) et de l'absence d'émission de polluant lors de son fonctionnement (Emadi *et al.*, 2008). Par ailleurs, sur l'aspect technologique, ces PàC à hydrogène sont encore à améliorer sur un certain nombre de points : diminution de leur coût, augmentation de leur durée de vie et nécessité d'un démarrage rapide en condition de grands froids. Cependant, d'un point de vue système, les générateurs PàC présentent des caractéristiques intrinsèques insuffisantes (temps de démarrage long, dynamique lente, défaillances réversibles...) et une non-réversibilité en puissance (Wahdame *et al.*, 2007), (Harel *et al.*, 2007), qui ne leur permettent pas de répondre directement aux exigences des applications automobiles. En effet, outre une exigence de continuité de service, celles-ci sont caractérisées par un important ratio puissance crête / puissance moyenne et des transitoires de puissance très rapides par rapport aux dynamiques disponibles de la PàC. Pour répondre à ce cahier des charges, il convient donc d'adjoindre au générateur PàC une source d'énergie auxiliaire capable tout à la fois de fournir ou de récupérer l'énergie « impulsionnelle » (accélération, freinage) et de pallier les défaillances temporaires de la PàC (noyage des diffuseurs de gaz, diminution accidentelle de l'alimentation en réactif). Aujourd'hui, les supercondensateurs (SCs) ont atteint un stade de développement (efficacité énergétique, durée de vie élevée > 1000000 Cycles, puissance massique élevée de 0.1 à 10 kW/kg, coût réduit) qui leur permettent de répondre aux exigences de ce stockage auxiliaire (Garcia Arregui *et al.*, 2007), (Azib *et al.*, 2009), (Thounthong *et al.*, 2005). Ils possèdent ainsi toutes les caractéristiques qui manquent aux systèmes électrochimiques pour améliorer les performances du véhicule à PàC. Le concept de système hybride utilisant PàC et SCs permet de trouver des solutions optimales pour les cahiers des charges des différents types de véhicules en matière de masse, d'autonomie, de rapidité de charge, de durée de vie et de puissance instantanée de stockage ou de déstockage. En effet, la PàC délivre la puissance moyenne nécessaire à la traction électrique (l'autonomie du véhicule), tandis que le démarrage, l'accélération et le freinage par récupération, qui mettent en jeu des échanges de puissance instantanés importants, sont assurés avec une efficacité élevée par les SCs, réduisant ainsi au minimum les contraintes sur la source d'énergie principale (PàC).

Accepted article for publication in European Journal of Electrical Engineering -
Citation information: EJEE, Lavoisier, 2011, 14 (2-3), pp.363-382.

Doi: [10.3166/ejee.14.363-382](https://doi.org/10.3166/ejee.14.363-382)

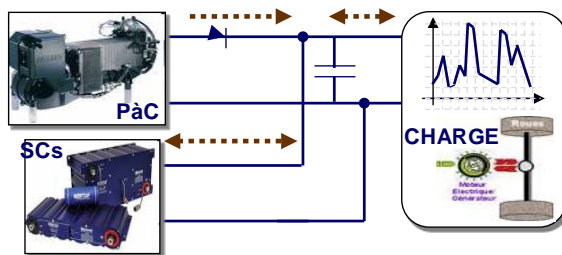
Plusieurs architectures de ce système hybride existent et peuvent être classifiées en trois catégories en fonction de l'association des différents constituants (Giulii Capponi *et al.*, 2004), (Cacciato *et al.*, 2004), (Jiang *et al.*, 2004): série, parallèle et cascade. L'étude de la littérature associée a montré que l'architecture parallèle est la structure la plus avantageuse (Cacciato *et al.*, 2004), (Jiang *et al.*, 2004): elle présente notamment des contraintes plus faibles sur les composants, une facilité de gestion d'énergie et une fiabilité accrue.

De même, différentes stratégies de contrôle ont été proposées pour la commande et la gestion de flux d'énergie dans un tel système hybride. Dans plusieurs travaux (Jiang *et al.*, 2006), (Jin *et al.*, 2009), les auteurs proposent des stratégies de contrôle basées sur l'état du système, et associant à chaque mode fonctionnement un algorithme dédié. Dans ces approches, la transition entre les différents modes de fonctionnement est problématique et peut engendrer des appels de courant instantané risquant d'endommager le système. D'autres études utilisent des techniques d'intelligences artificielles (Hajizadeh *et al.*, 2007), (Moreno *et al.*, 2006), (Ortuzar *et al.*, 2007), telles que les contrôleurs flous ou bien les contrôleurs neuronaux. Ces techniques se basent essentiellement sur des réglages empiriques pour lesquels les performances dépendent fortement de l'expertise. Dans un autre registre, les algorithmes basés sur la passivité et les systèmes plats (Becherif *et al.*, 2006), (Payman *et al.*, 2007), sont caractérisés par une haute complexité due à la nécessité de maîtriser un grand nombre de variables et de connaître les paramètres du système avec une bonne précision. Ces stratégies engendrent des coûts supplémentaires, souffrent potentiellement de problèmes d'identification de paramètres, et de fiabilité du système. En dernier lieu, la gestion de puissance peut reposer sur la régulation du bus DC et utiliser des contrôleurs simples tels que les régulateurs à action proportionnelle, intégrale et dérivée ou les contrôleurs à modes glissants (Marie-Francoise *et al.*, 2005), (Thounthong *et al.*, 2008), (Tao *et al.*, 2008), (Ramos-Paja *et al.*, 2009), (Azib *et al.*, 2010). Ces méthodes sont particulièrement intéressantes et efficaces car, d'une part, le même algorithme s'applique à toutes les configurations du système énergétique et, d'autre part, les contrôleurs se basent sur un nombre réduit de paramètres et de variables du système.

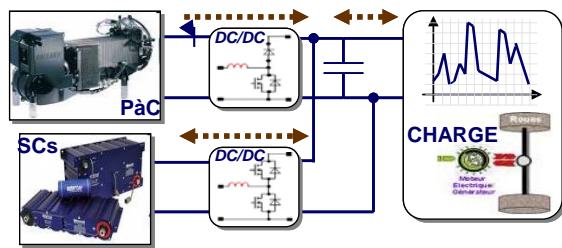
Cet article étudie deux architectures parallèles permettant l'hybridation d'une PàC comme source principale et d'un module de SCs comme source secondaire. La différence principale entre ces structures réside dans le nombre de convertisseurs statiques utilisés et les stratégies de gestion de l'énergie mise en œuvre. Ces dernières sont basées sur le découplage, dans le domaine fréquentiel, des caractéristiques de chaque source et utilisent la régulation du bus DC. Enfin, une plateforme d'essais est présentée et des résultats expérimentaux obtenus sont plus précisément analysés. Un cycle identique de fonctionnement de la charge est utilisé pour effectuer diverses comparaisons.

2. Description de la structure du système hybride

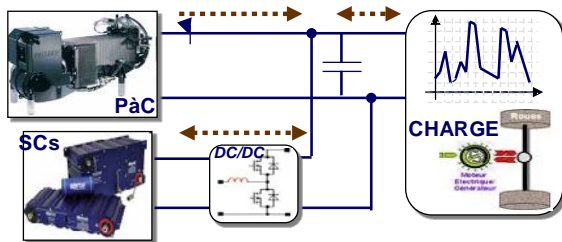
Un système hybride (ou multi-sources) se compose d'un ensemble de sources permettant d'assurer, en régime permanent, transitoire et impulsionnel, les énergies, tantôt absorbées, tantôt fournies, par la charge. Cet article se limite aux structures parallèles, avec comme source d'énergie principale, une pile à combustible (PàC) assistée d'une source d'énergie impulsionnelle réversible, à base de supercondensateurs (SCs). Trois topologies de structures parallèles PàC /SCs peuvent être distinguées (Figure 1) : structure parallèle directe, structure parallèle à deux convertisseurs et structure parallèle à un convertisseur.



- a - Structure parallèle directe.



- b - Structure parallèle à deux convertisseurs.



- c - Structure parallèle à un convertisseur.

Figure 1 : Structures parallèles du système de puissance hybride PàC/SCs

L'objectif majeur de cette hybridation est de respecter la dynamique de la pile à combustible limitée principalement par le temps de réponse du compresseur d'air, de contrôler l'état de charge du dispositif de stockage (SC) et d'apporter ou d'absorber la puissance exigée par la charge.

– Structure parallèle directe (Figure 1a): elle consiste à interconnecter chaque source à la charge. Elle permet une prise en compte naturelle des contraintes de chaque source et établit une corrélation naturelle entre puissance moyenne et état de charge des SC. Toutefois, elle nécessite un organe auxiliaire de démarrage. Par ailleurs, les pertes ohmiques des SCs induisent une transmission partielle des transitoires du courant de la charge vers la pile et donc les spécificités de la PàC ne peuvent être totalement assurées.

– Structure parallèle à deux convertisseurs (Figure 1b): elle consiste à associer à chaque source un convertisseur statique. Le convertisseur dédié à la PàC est unidirectionnel en puissance et fonctionne en mode élévateur de tension. Le convertisseur connecté aux SCs fonctionne en survolteur lorsque ceux-ci fournissent transitoirement une partie de la puissance motrice, et opère en dévolteur lorsque les SCs récupèrent l'énergie de freinage ou lorsqu'ils sont chargés par la PàC. Cette structure permet de maîtriser parfaitement la puissance de chaque source. Toutefois, les inconvénients de cette structure sont les inévitables pertes associées à chaque convertisseur statique ainsi qu'un coût plus élevé. En particulier, la puissance délivrée par la source primaire (PàC) est continuellement diminuée par les pertes de son convertisseur.

– Structure parallèle à un convertisseur (Figure 1c): elle consiste à connecter directement la PàC à la charge et à n'utiliser qu'un seul convertisseur bidirectionnel « d'interface » pour régler les puissances. 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 ainsi que la réduction des pertes et des coûts liés aux interfaces de gestion de puissance (convertisseurs statiques).

Le Tableau 1 récapitule les avantages et les inconvénients de chaque structure :

		Avantages	Inconvénients
Structures du système Hybride	directe	<ul style="list-style-type: none"> - structure simple - prise en compte naturelle des contraintes des constituants - contrôle et gestion d'énergie simple. - réversibilité 	<ul style="list-style-type: none"> - gestion spécifique lors du démarrage. - transmission partiel des transitoires de charge vers la PàC - surdimensionnement de SC - volume, poids et coût
	à deux convertisseurs	<ul style="list-style-type: none"> - maîtrise parfaite des flux d'énergie - faibles contraintes électriques sur les sources car découplées par les convertisseurs de puissance - réversibilité 	<ul style="list-style-type: none"> - structure complexe - pertes associées à chaque convertisseur - contrôle et gestion d'énergie complexe - volume, poids et coût
	à un convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> - structure simple et fiable. - dynamique élevée - réversibilité 	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle indirect de la PàC - charge supportant des variations de tension - contrôle et gestion d'énergie complexe

Tableau 1 : Avantages, inconvénients des structures du système hybride PàC-SCs

Ces deux dernières architectures (Figure 1b et 1c) peuvent parfaitement répondre aux exigences mentionnées. Pour obtenir ce résultat, une stratégie de contrôle des degrés de liberté offerts par les convertisseurs a été développée. Elle s'appuie sur le découplage fréquentiel des réponses de chaque source (Figure 2), vis-à-vis des sollicitations de la charge, le condensateur du bus continu prend en charge les hautes fréquences (HF supérieures au kHz), le SC associé à son convertisseur fournit les moyennes fréquences (MF du kHz au Hz) et la PàC assure les basses fréquences (BF inférieures au Hz).

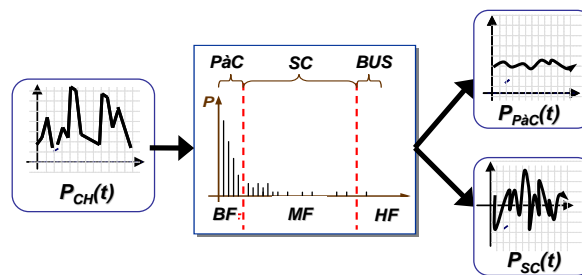


Figure 2 : Principe de base de la décomposition fréquentielle

3. Contrôle-commande et gestion d'énergie

La stratégie de contrôle et de gestion d'énergie proposée est fondée sur la régulation du bus continu. En effet, toute variation de puissance de la charge a un impact immédiat sur la tension du bus DC. L'annulation par les sources de cette variation permet donc de répondre aux exigences de la charge. Pour respecter le principe de l'hybridation, le superviseur doit garantir le respect du temps de réponse spécifié pour chaque source. Cette stratégie est basée, directement ou indirectement, sur la décomposition fréquentielle des besoins énergétiques liés à un profil de mission. Dès lors, la gestion de l'énergie va consister à affecter en temps réel les différentes composantes fréquentielles de la puissance de la charge aux différentes sources interconnectées, en fonction des propriétés de chacune. En effet, les SCs peuvent supporter des charges et des décharges fréquentes et de forte intensité. Ils peuvent ainsi fournir ou absorber les composantes de plus hautes fréquences ou de fortes puissances, tandis que la PaC associée à son réservoir d'hydrogène contribue plutôt aux réserves d'énergie pour l'autonomie de longue durée.

Ce découplage fréquentiel lié aux spécificités des sources est réalisé par une stratégie de gestion basée sur des boucles en cascade dont le principe est présenté sur la Figure 3 et sur la Figure 4. Le réglage des bandes passantes de chaque asservissement va permettre de répondre au cahier des charges de la source hybride. Deux étapes clés permettent cette mise au point :

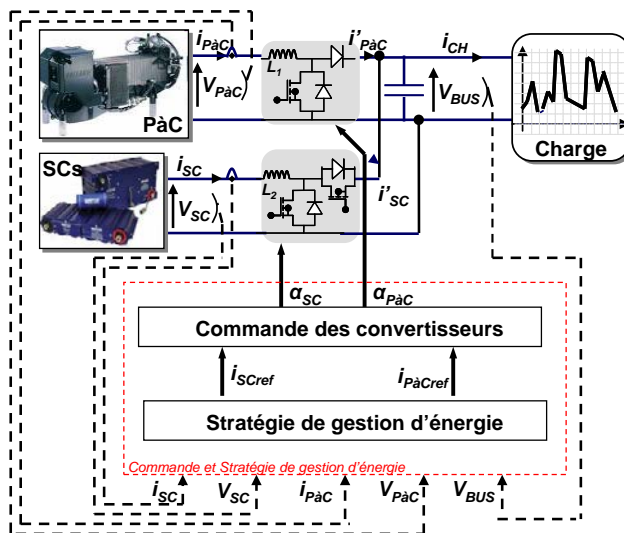


Figure 3 : Architecture de supervision de la structure à deux convertisseurs

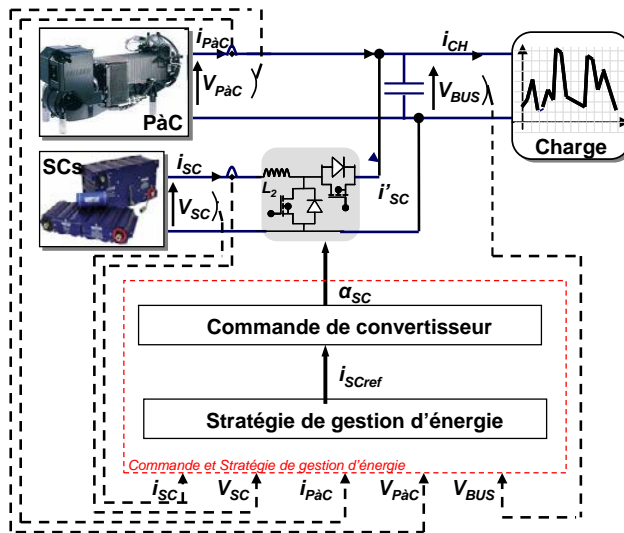


Figure 4 : Architecture de supervision de la structure à un convertisseur

3.1. Commande des convertisseurs

Dans un premier temps, il faut calculer les lois de commandes rapprochées pilotant chacun des convertisseurs, de la PàC et de SCs pour la structure à deux convertisseurs (Figure 5), et du convertisseur des SCs pour la structure à un convertisseur (Figure 6). Cela consiste à mettre en place des boucles internes de courant en adaptant la MLI de chaque convertisseur et donc en pilotant le courant de chaque source. En effet, le contrôle de ces courants est primordial, car il permet de protéger les convertisseurs ainsi que les sources (SCs et PàC) contre d'éventuelles surintensités de courant. Le régulateur est à action Proportionnelle-Intégrale (PI) et une anti-saturation est ajoutée pour maintenir le rapport cyclique dans l'intervalle ($0 < \alpha < 0,95$). La bande passante de la boucle de courant est alors choisie au cinquième de la fréquence de découpage (f_d) fixée à 25kHz, c'est-à-dire 5kHz.

3.2. Stratégies de gestion d'énergie

Dans un deuxième temps, il faut définir une stratégie de gestion d'énergie du système hybride (Figure 5, Figure 6). Cette stratégie d'énergie consiste à affecter judicieusement les différentes composantes fréquentielles des sollicitations de la charge aux différentes sources interconnectées. Cela permet donc de synthétiser les consignes de référence des boucles de courant (i_{SCref} , i_{PaCref}). Ce principe de commande est appliqué pour chacune des deux structures retenues.

Toute modification de la puissance de charge induit une variation de la tension du bus. Ainsi, si l'on règle la tension de bus $V_{BUS}(t)$ à sa référence, les SCs réagissent aux transitoires rapides (MF), et le bus ne répond alors qu'aux hautes variations (HF) de la charge. Par ailleurs, la seule sollicitation de l'assistance entraînerait une décharge permanente des SCs, ce qui impose d'ajouter un système de compensation de son état de charge (EDC). Or, sur un tel système et en fonctionnement normal, seul la PàC peut répondre à ce besoin. Pour cela, le niveau de tension des SCs est mesuré et le convertisseur associé à la PàC est contrôlé afin de faire tendre cette mesure vers sa valeur de référence établie dans le but d'obtenir un potentiel de charge équivalent à son potentiel de décharge. La bande passante de ce dernier asservissement est réglée dans le souci de ne soumettre la pile qu'à des régimes lentement variables (BF).

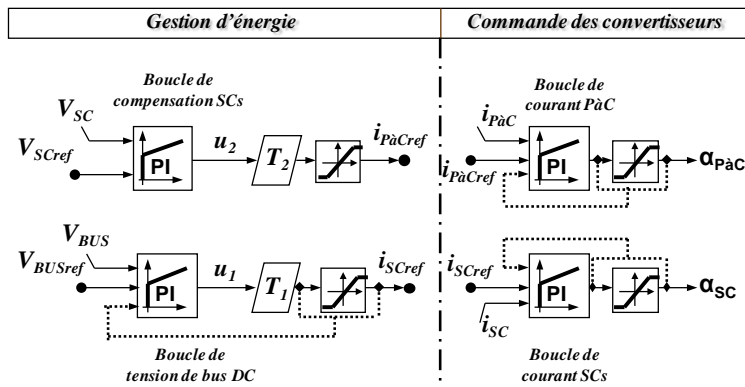


Figure 5 : Stratégie de commande et gestion d'énergie de la structure à deux convertisseurs

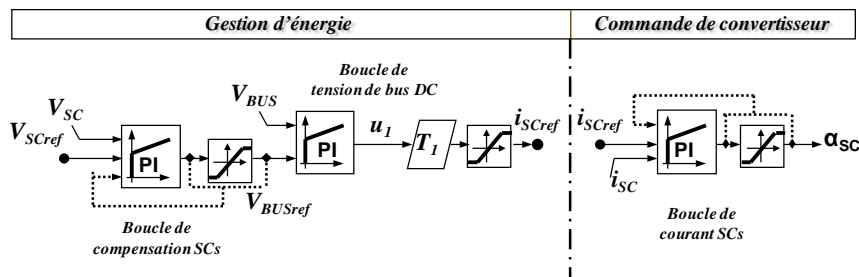


Figure 6 : Stratégie de commande et gestion d'énergie de la structure à un convertisseur

3.3. Gestion d'énergie pour la structure à deux convertisseurs

Pour garantir la réjection des transitoires de la charge par les SCs, on mesure la perturbation générée sur le bus DC (Figure 5). Par conséquent, la deuxième boucle en cascade contrôle et régule la tension de bus $V_{BUS}(t)$ à sa référence et génère la référence du courant SCs (i_{SCref}) : plus cette poursuite de tension sera rapide, plus la valeur de capacité C_{BUS} sera petite. Pour cette boucle, le lien entre la variable de contrôle (i_{SC_ref}) et la variable de sortie (V_{BUS}) est établi comme suit :

$$C_{BUS} \frac{dV_{BUS}}{dt} = i'_{SC} + i'_{PaC} - I_{CH} \quad [1]$$

Pour faire apparaître la grandeur de commande i_{SCref} , on réalise un bilan de puissance, en négligeant les pertes dans le hacheur et son inductance L_2 :

$$(V_{SC} \cdot i_{SC}) = (V_{BUS} \cdot i'_{SC}) + p_{L2} \quad [2]$$

Où p_{L2} est la puissance reçue par l'inductance L_2 . Dans le cadre d'un asservissement, cette valeur peut s'approximer comme suit :

$$p_{L2}(t = kT_e) = (V_{L} i_{SC}) = \left(L_2 \frac{di_{SC}}{dt} i_{SC} \right) \cong \left(L_2 \frac{i_{SC}(k) - i_{SC}(k-1)}{T_e} i_{SC}(k) \right) \quad [3]$$

Aussi, adopte t-on la commande virtuelle u_2 :

$$u_2 = \left(\frac{V_{SC}}{V_{BUS}} i_{SC} \right) - \frac{p_{L2}}{V_{BUS}} \cong \left(\frac{V_{SC}}{V_{BUS}} i_{SC}(k) \right) - \frac{L_2 \Delta i_{SC}(k)}{T_e V_{BUS}} i_{SC}(k) \quad [4]$$

Afin d'obtenir une linéarisation du système à contrôler :

$$C_{BUS} \frac{dV_{BUS}}{dt} = u_2 + i'_{PaC} - I_{CH} \quad [5]$$

Avec la variable i'_{PaC} lentement variable et la variable V_{BUS} faiblement variable autour de sa valeur de référence. La grandeur de contrôle u_2 doit être construite pour rejeter les perturbations constituées par la charge et la pile.

Néanmoins, la commande du système physique est la variable i_{SCref} et s'obtient à partir de la valeur désirée u_2 en résolvant une équation du second degré admettant deux solutions (Figure 7).

$$(i_{SC}(k))^2 - \left(\frac{T_e \cdot V_{SC} + L_2 \cdot i_{SC}(k-1)}{L_2} \right) i_{SC}(k) + \left(\frac{T_e \cdot V_{BUS}}{L_2} \right) u_2(k) = 0 \quad [6]$$

DOI: 10.3166/ejee.14.363-382

Il est préférable d'adopter la valeur i_{SC} la plus faible possible afin de réduire les contraintes thermiques et de maintenir la stabilité de la boucle d'asservissement. Pour ce dernier point, il faut en effet garantir qu'un $\Delta u_2 > 0$ fournisse systématiquement un $\Delta i_{SC} > 0$. Cet algorithme permettant d'obtenir la variable réelle de commande i_{SCref} à partir de la variable fictive u_2 est réalisé dans le bloc fonctionnel T_2 indiqué sur Figure 5. Pour de faibles demandes de puissance, l'algorithme choisit la valeur absolue la plus petite parmi les deux solutions proposées par la résolution de [6]. Dans le cas où la demande de puissance est très importante, cette équation ne donne pas de réponse réelle (discriminant négatif) ; l'algorithme adopte le courant $i_{SC}(k)$ qui donne la puissance transmise la plus élevée (en valeur absolue selon si l'on accélère ou l'on freine). Cette valeur s'obtient en cherchant le point i_{SC} annulant la dérivée de i_{SC} :

$$i_{SC}(k) = \frac{T_e \cdot V_{SC} + L_2 \cdot i_{SC}(k-1)}{2L_2} \quad [7]$$

Comme il était légitime de le penser, cette valeur ne dépend bien évidemment pas de la commande désirée u_2 .

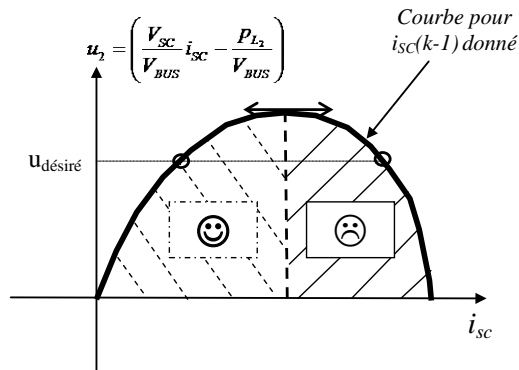


Figure 7 : Impact du choix de i_{SC} sur la stabilité du système

A l'instar des boucles de courant, le correcteur synthétisé est également à action proportionnelle-intégrale (PI) ; la bande passante de cette boucle est choisie au dixième de celle du courant pour respecter un bon découplage fréquentiel entre boucles interne et externe. Par ailleurs, afin de respecter les contraintes thermiques des SCs, la valeur absolue du courant de référence i_{SCref} calculé doit être plus faible que le courant nominal ($-i_{NOM} < i_{SCref} < +i_{NOM}$). Cette contrainte est assurée par la fonction de saturation qui permet de plus de maintenir la tension V_{SC} dans l'intervalle $[V_{SCmin}, V_{SCmax}]$ en agissant dynamiquement sur les bornes de saturation.

La sollicitation de l'assistance entraînerait une dérive permanente des SCs. L'annulation de cette dernière nécessite une compensation de l'état de charge du banc de SCs. Pour cela, une boucle de compensation est ajoutée afin de maintenir le niveau de charge autour de sa valeur de référence.

La tension du supercondensateur V_{SC} est directement commandée par son courant i_{SC} :

$$C_{SC} \frac{dV_{SC}}{dt} = -i_{SC} \quad [8]$$

La relation entre la variable de commande i_{PaCref} , et la variable de sortie est donnée par le bilan de puissance suivant :

$$(V_{SC} i_{SC}) = V_{BUS} (i_{PaC} - I_{CH}) + P_{L2} = V_{BUS} \left(\frac{V_{PaC}}{V_{BUS}} i_{PaC} - \frac{1}{V_{BUS}} P_{L1} - I_{CH} \right) + P_{L2} \quad [9]$$

Etant donné que les dynamiques visées pour le temps de réponse de la PaC sont inférieures à la seconde et que les deux inductances de filtrage L_1 et L_2 sont conçues pour la fréquence de découpage ($Fd = 25$ kHz), il est légitime de négliger, pour cet asservissement, les puissances reçues par les deux inductances. Il s'ensuit que le lien entre variable à contrôler V_{SC} et grandeur de réglage i_{PaC} est donné par :

$$\frac{dV_{SC}}{dt} = -\frac{1}{C_{SC}} \left(\frac{V_{BUS}}{V_{SC}} \right) \left(\frac{V_{PaC}}{V_{BUS}} i_{PaC} - I_{CH} \right) \quad [10]$$

La variable fictive de contrôle permettant de linéariser ce système est :

$$u_1 = \frac{V_{PaC}}{V_{SC}} i_{PaC} \quad [11]$$

Et ne pose pas de problème d'inversion. Le bloc fonctionnel T_1 indiqué sur Figure 5 réalise l'inversion de ce lien rigide et calcule la variable réelle de commande i_{PaCref} à partir de la variable fictive u_1 .

Le correcteur mis en place dans la boucle de compensation est à action proportionnelle-intégrale (PI). Ainsi, sa bande passante est choisie pour respecter les contraintes de la PaC, avec ici une limite inférieure au 1 Hz. Par ailleurs, un système d'anti-saturation est nécessaire pour compenser la limitation en pente du courant de référence.

3.4. Gestion d'énergie pour la structure à un convertisseur

L'idée directrice de la stratégie de gestion pour la structure à un convertisseur est identique à celle adoptée avec la structure précédente, en se limitant au seul degré de liberté du convertisseur associé aux SCs (Figure 6). Elle est basée sur la gestion précise de la tension du bus DC, qui permet le contrôle indirect de la puissance générée par la PàC. Ainsi, avec une boucle de tension rapide, les perturbations transitoires induites par les composantes HF de la charge peuvent être rejetées. Cela implique physiquement que la régulation du BUS continu est fortement dépendante de la rapidité des boucles de contrôle des SCs. En pratique, cette régulation s'effectue à l'aide d'une boucle de courant, qui assure aussi le rôle de protection des SCs. La boucle de tension met en œuvre un correcteur à action proportionnelle-intégrale (PI), et génère une référence de courant (i_{SCref}), qui est bornée. Quant à la boucle de compensation, elle a pour rôle de gérer le niveau de tension des SCs, et faire réagir la PàC pour maintenir son niveau de référence. En effet, dans cette configuration la variable de contrôle n'est plus le courant de la pile (i_{PaCref}), mais c'est la tension du bus (V_{BUSref}) qui est l'image directe de la tension de la PàC (V_{PaCref}). Par conséquent, dans le but d'éviter à la PàC des changements trop rapides, la tension de bus doit évoluer de manière lente. Toutefois, la mise en œuvre du correcteur associé est identique à celle décrite dans le contrôle de la structure à deux convertisseurs. Le correcteur synthétisé pour cette boucle est également à action proportionnelle-intégrale (PI) et sa bande passante est aussi choisie pour respecter les contraintes de la PàC, c'est-à-dire inférieure à 1 Hz. Un système d'anti-saturation a été ajouté pour prendre en compte la limitation en pente de la tension du bus DC.

Le tableau 2 récapitule les objectifs, les contraintes, les moyens d'action et les contrôleurs utilisés pour la commande et gestion d'énergie proposée.

Par cette technique de commande, nous assurons une gestion d'énergie efficace des différents éléments du système. En effet, les contraintes électriques associées à chaque constituant imposent de satisfaire les objectifs suivants : répondre aux exigences de la charge, limiter la dynamique de la pile, faire supporter les transitoires rapides de la charge (accélération, décélération) par les SCs, et maintenir à long terme le niveau nominal de charge des SCs.

Les charges fluctuantes représentent une part importante de la puissance consommée dans de nombreuses applications. Pour les applications automobiles, elles engendrent des pics atteignant approximativement plus de dix fois la puissance moyenne P_{Moy} de la charge, ce qui engendre une dynamique très contraignante. Pour ces raisons, nos approches seront testées avec un profil sévère utilisant une succession d'échelons de puissance.

Boucles	Objectifs	Contraintes	Actions	Contrôleurs	
Commande des convertisseurs					
<i>Boucle de courant SCs</i>	- protéger les SCs et leur convertisseur.	- les limites électriques du stockage.	α_{SC}	PI	
<i>Boucle de courant PàC</i>	- protéger la PàC et son convertisseur.	- les limites électriques de la source principale (PàC). - la source est unidirectionnelle	$\alpha_{PàC}$	PI	
Stratégies de gestion d'énergie					
Boucle de tension bus DC	Deux convertisseurs	- maintenir la tension bus constante, - faire réagir les SCs aux transitoires rapides.	- les limites électriques du stockage, - le bus DC,	i_{SCref}	PI
	Un convertisseur	- suivre la trajectoire de la tension bus, - faire réagir les SCs aux transitoires rapides.	- les limites électriques du stockage, - la variation de la trajectoire de la tension bus. - le bus DC,	i_{SCref}	PI
Boucle de compensation SCs	Deux convertisseurs	- maintenir le niveau de charge des SCs - faire réagir la PàC pour la compensation des SCs. - respecter la dynamique lente de la PàC.	- les limites électriques de chaque source,	$i_{PàCref}$	PI
	Un convertisseur	- maintenir le niveau de charge des SCs - faire réagir la PàC pour la compensation des SCs. - assurer une variation lente de la trajectoire du bus DC, dans le but de respecter la dynamique lente de la PàC.	- la variation de la tension bus, lors des transitoires rapides - le bus DC,	V_{BUSref}	PI

Tableau 2 : Récapitulatif de la stratégie de commande et gestion d'énergie

4. Implémentation et résultats expérimental

4.1. Configuration de la plateforme expérimentale

Dans le but de valider ces approches, un banc d'essai a été mis en place : il comprend une PàC « Nexa » (1200W) développée par la société Ballard, deux modules (Maxwell BMOD0250) associant chacun six SCs de la société Maxwell,

Accepted article for publication in European Journal of Electrical Engineering -
 Citation information: EJEE, Lavoisier, 2011, 14 (2-3), pp.363-382.

Doi: 10.3166/ejee.14.363-382

deux hacheurs de type « boost » pour la PàC et « buck-boost » pour les SCs réalisés avec des modules IGBT standard (SEMITRANS: SKM50GB123D), une carte de contrôle dSPACE en temps réel DS1104 utilisée pour le contrôle et la gestion d'énergie et une charge électronique ZS1806 de 1800W (0...150 A, 0...60 V), programmable en courant ou en puissance. La Figure 8 montre le banc d'essai et ses différents constituants.

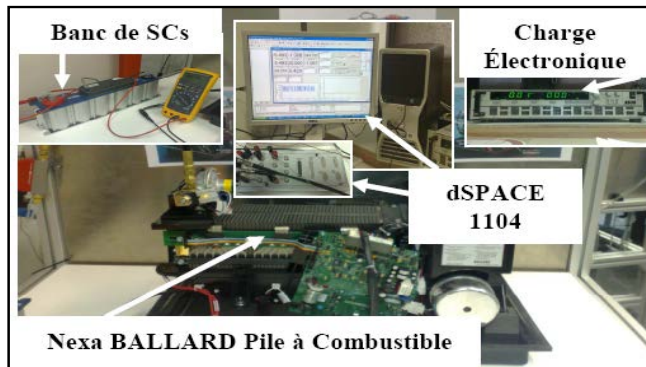


Figure 8 : Description des composants de la plateforme expérimentale

Les paramètres du système hybride sont donnés dans le tableau 3, ci-dessous :

Pile à Combustible		Charge Electronique	
Nom de paramètre	Valeur	Nom de paramètre	Valeur
Tension à vide	45 V	Puissance nominale	1800 W
Tension nominale	26 V	Tension nominale	60 V
Courant nominal	46 A	Courant nominal	150 A
Supercondensateurs		Inductances & Capacités	
Nom de paramètre	Valeur	Nom de paramètre	Valeur
Capacité	125 F	Inductance L ₁	200 µH
Tension nominale	32 V	Inductance L ₂	100 µH
Courant nominal	125 A	Courant nominal de L ₁	100 A
Tension de référence	24 V	Courant nominal de L ₂	150 A
		Capacité C _{BUS}	14 mF
		Tension de référence V _{BUS_ref}	48 V

Tableau 3 : Caractéristiques du système hybride

4.2. Résultats expérimentaux

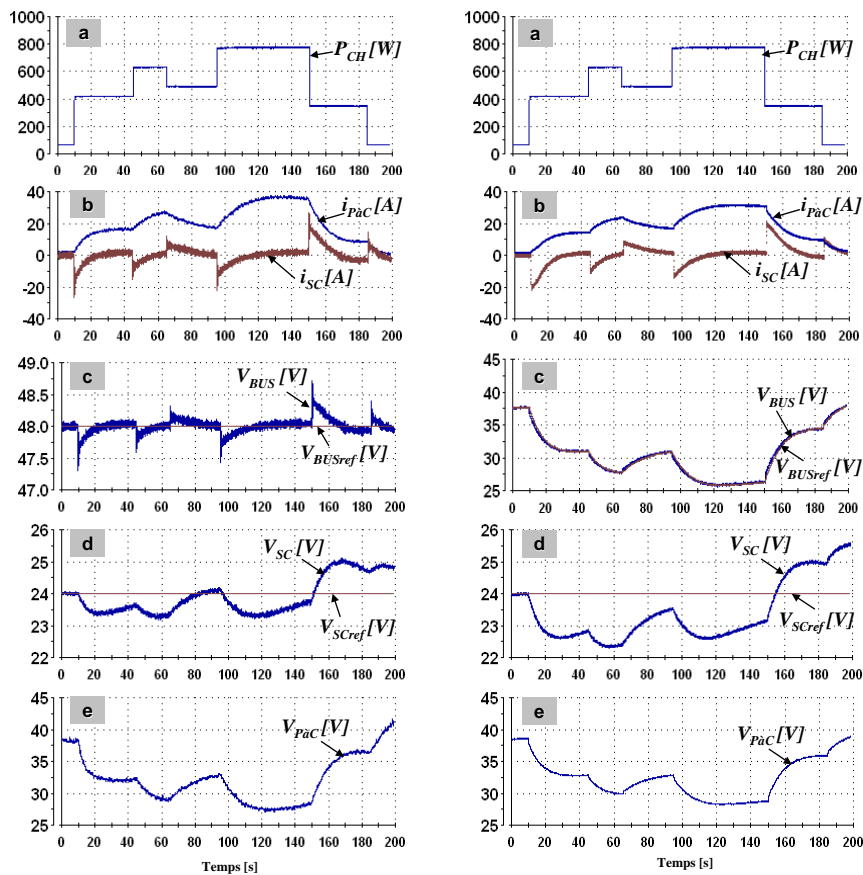
Des expériences ont été effectuées avec le banc de test pour vérifier les résultats théoriques obtenus. Ainsi, l'analyse sera essentiellement centrée sur la réponse transitoire du système PàC/SCs. La Figure 9 (a,b) présente la réponse du système hybride pour les deux architectures vis-à-vis d'une charge incluant des échelons de courant positifs et négatifs (Figure 9-a2,6-b2). A chaque transitoire positif de charge ($t=0,9$ s / 43 s / 96 s), la tension de bus pour la structure à deux convertisseurs (Figure 9-a3) est transitoirement légèrement affectée (moins de 4%), mais est globalement bien régulée à sa valeur de référence constante. Tandis que celle de la structure à un convertisseur (Figure 9-b3) diminue sans à-coup. On observe une diminution lente de la tension de la PàC, mais celle-ci reste néanmoins asservie à sa référence. En effet ceci est rendu possible par les supercondensateurs qui réagissent rapidement aux transitoires brusques du courant de la charge (Figure 9-a2, 6-b2). Ces transitoires sont induits par la régulation de tension de bus et permettent d'assurer la majeure partie de la composante transitoire de la puissance exigée. Le transfert d'énergie des SCs au bus DC s'opère donc correctement et permet de compenser l'énergie qui n'est pas fournie par la PàC. Cela autorise la pile à réagir sans variation brusque de son courant aux sollicitations de la charge (Figure 9-a3, 6-b3). L'augmentation de $1,5 \text{ A s}^{-1}$ est très favorable pour sa durée de vie (Corbo et al., 2009). 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 (Figure 9-a4, 6-b4). Il s'établit alors un régime de rééquilibrage (appelé compensation), caractérisé ici par une recharge du banc de SCs à sa valeurs de référence (V_{SCref}) fixée à 24V.

Durant les transitoires négatifs du courant de la charge (aux instants $t = 63$ s /147 s /184 s), on peut également observer une diminution lente du courant de la PàC (BF); celle-ci est contrôlée par la limitation de pente de la boucle de compensation. Durant ces transitoires, la charge est alimentée par la PàC mais une partie de la puissance excédentaire de celle-ci est absorbée par le banc de SCs (HF). Par la suite, un rééquilibrage (compensation) s'effectue car la PàC fournit progressivement la puissance nécessaire à la charge, ainsi que celle nécessaire pour ramener les tensions des SCs à leurs niveaux de référence. En l'occurrence, il peut s'agir d'une puissance plus faible que celle nécessitée par la charge afin que la tension du banc de SCs diminue vers son niveau de référence. Ce cas se présente, par exemple, entre $t = 170$ s et $t = 180$ s. Cette stratégie de gestion de l'énergie est identique et reste valable pour les deux structures de convertisseur présentées.

Pour l'heure, le fonctionnement récupératif n'est pas encore envisageable sur notre banc qui n'a encore qu'une charge active à 1 quadrant. Toutefois, la baisse brutale de puissance de la charge crée un fonctionnement récupératif non pas de la charge vers les SCs mais de la PàC vers les SCs qui valide la capacité de la supervision à gérer ce type de situation. La constitution d'une charge programmable

4 quadrants est en cours et permettra de valider en plus de l'architecture de contrôle la solidité du choix des constituants.

La structure à un convertisseur permet donc d'obtenir une gestion équivalente à la structure à deux convertisseurs au niveau de la PàC (Figure 9-a5, 6-b5). Par ailleurs, nous pouvons constater que les architectures étudiées ainsi que l'ensemble des commandes rapprochées et de la gestion d'énergie associé permettent bien de satisfaire le cahier des charges de la source hybride : la demande de puissance de la charge d'une part et les contraintes des sources d'autre part. Les résultats présentés montrent que le contrôle de la structure à un convertisseur reste simple, efficace et sûr, malgré une réduction des degrés de liberté.



- a - Structure à deux convertisseurs

- b - Structure à un convertisseur

Figure 9 : Résultats expérimentaux pour un profil de puissance de charge

5. Conclusion

Dans cet article, les structures et les stratégies de commande de deux sources d'énergie hybrides parallèles ont été présentées. Ces deux structures utilisent une pile à combustible pour l'énergie permanente et des modules de supercondensateurs pour les transitoires d'énergie. Des stratégies de contrôle de gestion ont été validées par des tests expérimentaux sur un système PàC/SCs. Les résultats montrent que, même avec des degrés de liberté réduits, la structure parallèle à un convertisseur gère convenablement l'énergie, avec des performances comparables à la structure à deux convertisseurs. Finalement, la structure et la stratégie de commande restent simples, efficaces et sûrs. Or, pour les applications automobiles, le poids et le coût sont des contraintes majeures. Aussi, avec un fonctionnement comparable des deux structures, il est moins coûteux de choisir la structure à un convertisseur.

Le système présenté dans cet article peut être transposé aux capacités de puissance plus importantes ou plus faibles ce qui permet de l'étendre à d'autres types d'application.

12. Bibliographie

- European commission, Directorate-General for Research Information and Communication Unit, European Fuel Cell and Hydrogen Projects 2002-2006, European Communities, EUR 22398, 2006.
- Wahdame B., Candusso D., François X., Harel F., Péra M.C., Hissel D. and Kauffmann J.M., « Comparison between two PEM fuel cell durability tests performed at constant current and under solicitations linked to transport mission profile », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, n°17, 2007, p. 4523-4536.
- Emadi A., Lee Y.J., Rajashekara K., « Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 6, June 2008, p. 2237-2245.
- Harel F., François X., Candusso D., Péra M-C., Hissel D., and Kauffmann J-M., « PEMFC durability test under specific dynamical current solicitation linked to vehicle road cycle », *Fuel Cells from Fundamentals to Systems, Wiley-VCH*, vol. 7, n°2, April 2007, p. 142-152.
- Garcia Arregui M., Turpin C., Astier S., « Groupe électrogène pour aéronef à pile à combustible hybridée par supercondensateurs », *Conférence électronique du futur EF'07*, Toulouse, Septembre 2007.
- Thounthong P., Raël S. and Davat B., « Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system », *International Journal of Electrical Engineering in Transportation*, vol. 1, n°1, 2005.
- Azib T., Bethoux O., Remy G., and Marchand C., « Structure and Control Strategy for a Parallel Hybrid Fuel Cell/Supercapacitors Power Source », *Vehicle Power and*

Accepted article for publication in European Journal of Electrical Engineering -
Citation information: EJEE, Lavoisier, 2011, 14 (2-3), pp.363-382.

Doi: [10.3166/ejee.14.363-382](https://doi.org/10.3166/ejee.14.363-382)
Propulsion Conference, IEEE VPPC'09, 7-10 September 2009, Dearborn, Michigan ,
p. 1858 – 1863..

Giulii Capponi 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.

Cacciato M., Caricchi F., Giuhlii F., and Santini E., « A critical evaluation and design of bi-
directional DC/DC converters for supercapacitors interfacing in fuel cell applications »,
Industry Applications Conference, IEEE IAS'04, October 2004, vol. 2, p. 1127-1133.

Guillet N., *et al.*, « Scientific and technological progress toward the development of an
80kWe PEM Fuel Cell System for Transport Applications », *Symposium EVS-23*,
Anaheim USA, December 2007.

Corbo P., Migliardini F., and Veneri O., « Dynamic behaviour of hydrogen fuel cells for
automotive application », *Elsevier, Renewable Energy*, vol. 34, n°8, p. 1955-1961,
August 2009.

Hoogers G., *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, Ch10, October 2002.

Haimin Tao, J.L. Duarte, M.A.M. Hendrix, « Line-Interactive UPS Using a Fuel Cell as the
Primary Source », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n°8, p. 3012-
3021, August 2008.

Destraz B., Barrade P., and Rufer A., « Power Assistance for Diesel – Electric Locomotives
with Supercapacitive Energy Storage », *Power Electronics Specialists Conference, IEEE-
PESC'04*, 2004.

Schneuwly A., Bärtschi M., Hermann V., Sartorelli G., Gallay R., and Kötz R.,
« BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications »,
Proc. of the 2nd Int. Advanced Automotive Battery Conference, AABC, February 2002.

Kötz R., Müller S., Bärtschi M., Schnyder B., Dietrich P., Büchi F. N., and Tsukada A.,
« Supercapacitors for Peak-Power Demand in Fuel-Cell-Driven Cars », *52nd Meeting of
The Electro-Chemical Society, ECS'01*, vol. 4, 2001, pp. 564-575.

Jiang Z., Gao L., Blackwelder M.J., and Dougal R.A., « Design and experimental tests of
control strategies for active hybrid fuel cell/battery power sources », *Journal of Power
Sources*, vol. 130, 2004, p. 163-171.

Jin K., Ruan X., Yang M., Xu M., « A Hybrid Fuel Cell Power System », *IEEE Transactions
on Industrial Electronics*, vol. 56, n°4, p. 1212-1222, April 2009.

Jiang Z., and Dougal R.A., « A Compact Digitally Controlled Fuel Cell/Battery Hybrid Power
Source », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.53, p. 1094-1104, 2006.

Hajizadeh A., and Golkar M. A., « Intelligent power management strategy of hybrid
distributed generation system », *Elsevier, Electrical Power and Energy System*, 2007,
p. 783–795.

Moreno J., Ortúzar M. E., and Dixon J. W., « Energy-Management System for a Hybrid
Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks », *IEEE Transactions on
Industrial Electronics*, vol. 53, n°2, p. 614-623, April 2006.

Accepted article for publication in European Journal of Electrical Engineering -
Citation information: EJEE, Lavoisier, 2011, 14 (2-3), pp.363-382.

- doi: 10.3166/ejee.14.363-382
- Ortuza M., Moreno J., Dixon J., « Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, n°4, p. 2147-2156, August 2007.
- Becherif M., Ayad M.Y., and Miraoui A., « Modelling and Passivity based Control of Hybrid Sources: Fuel Cells and Super-Capacitors », *Industry Applications Conference, IEEE-IAS'06*, 2006, vol. 3, n°8, p. 1134-1139.
- Payman A., Pierfederici S., and Meibody-Tabar F., « Implementation of a Flatness Based Control for a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid System », *Power Electronics Specialists Conference, IEEE-PESC'07*, June 2007.
- Marie-Francoise J.N., Gualous H., Outbib R., and Berthon A., « 42V Power Net with supercapacitor and battery for automotive applications », *Elsevier, Journal of Power Sources*, vol. 143, p. 275-283, 2005.
- Thounthong P., Raël S., and Davat B., « Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for distributed generation system », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, n°6, p. 3225-3233, December 2008.
- Tao H., Duarte J. L., and Hendrix M. A. M., « Line-Interactive UPS Using a Fuel Cell as the Primary Source », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n°8, August 2008.
- Ramos-Paja C. A., Bordons C., Romero A., Giral R., and Martínez-Salamero L., « Minimum Fuel Consumption Strategy for PEM Fuel Cells », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, Mars 2009.
- Azib T., Tadj R., Bethoux O., Remy G., Marchand C and Berthelot E., « Sliding Mode Control and Simulation of a Hybrid Fuel-Cell Ultracapacitor Power System », *IEEE International Symposium Industrial Electronics, ISIE'10*, in press.