



COMPARAISON D'ARCHITECTURES D'HYBRIDATION D'UNE PILE À COMBUSTIBLE AVEC DES SUPERCONDENSATEURS

AZIB Toufik, BETHOUX Olivier, REMY Ghislain, MARCHAND Claude, BERTHELOT Éric
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
toufik.azib@lgep.supelec.fr, olivier.bethoux@lgep.supelec.fr

Résumé

Cet article présente une comparaison et une étude expérimentale de structures d'hybridation énergétique d'une pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC) avec 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 sur un profil de mission donné.

Mots Clés. Pile à combustible, supercondensateurs, hybridation énergétique, gestion d'énergie, comparaison expérimentale.

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 serre¹. 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 terme². Cependant, d'un point de vue 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. Par ailleurs, d'un point de vue système, les générateurs PàC présentent des caractéristiques inhérentes (temps de démarrage long, dynamique lente, défaillances réversibles...) 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, puissance massique, coût) qui leur permet de répondre aux exigences de ce stockage auxiliaire^{4,5}.

Dans cet article, deux architectures de source d'énergie permettant l'hybridation d'une PàC comme source principale et d'un module de SCs comme source secondaire sont étudiées. 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. Les résultats montrent que l'utilisation d'un seul convertisseur statique, même avec un nombre réduit de degrés de liberté, permet de répondre aux exigences d'intégrité des sources et de subvenir aux besoins de la charge. 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.

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DU SYSTEME HYBRIDE

Une source hybride (ou 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 et transitoire (la pile à combustible) assistée d'une source d'énergie impulsionnelle réversible (les supercondensateurs). Plusieurs architectures électriques de ce système hybride existent et peuvent être classifiées en trois catégories^{6,7} : série, cascade, et parallèle. L'étude de la littérature associée a montré que l'architecture parallèle est la structure la plus avantageuse^{6,7,8} : 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 (Figure 1). 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.

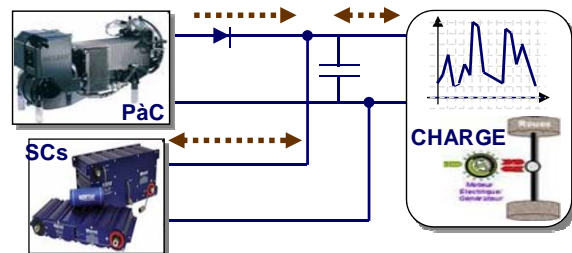
La structure parallèle directe (Figure 1a) consiste à interconnecter chaque source à la charge. Elle permet une prise en compte naturelle des contraintes de chaque source, et établit une corrélation naturelle entre puissance moyenne et état de charge des SC. Toutefois, elle nécessite un organe auxiliaire de démarrage. Par ailleurs, les spécificités de la PàC ne peuvent être totalement assurées car les pertes ohmiques des SC induisent une transmission partielle des transitoires du courant de la charge vers la pile⁹.

La structure parallèle à deux convertisseurs (Figure 1b) consiste à associer à chaque source un convertisseur statique⁴. 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.

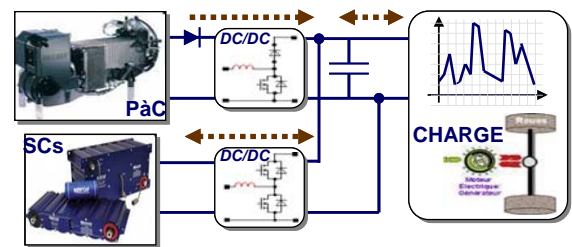
La structure parallèle à un convertisseur (Figure 1c) consiste à connecter directement la PàC à la charge et à n'utiliser qu'un seul convertisseur « d'interface » pour régler les flux de puissance⁵. Ce convertisseur n'est utilisé que de manière intermittente, puisqu'il assure l'adaptation des grandeurs 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 (Figure 1b et 1c) peuvent parfaitement répondre aux exigences mentionnées. Ainsi 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 supérieur 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 inférieur au Hz).

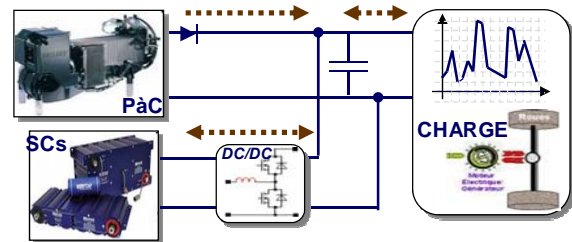
Ce découplage fréquentiel des spécificités des sources induit naturellement une stratégie de gestion basée sur des boucles en cascade dont le principe est présenté sur la Figure 3 et sur la Figure 4. La stratégie de commande et de gestion d'énergie proposée est fondée sur la régulation du bus continu, qui offre l'avantage d'une réponse adaptée aux sollicitations de la charge.



- 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

DESCRIPTION DES STRATEGIES DE COMMANDE

La stratégie de régulation et de gestion d'énergie du bus continu nécessite deux étapes :

- Dans un premier temps, il faut calculer les lois de commandes rapprochées de chacun des convertisseurs, de la PàC et SCs pour la structure à deux convertisseurs, et du convertisseur des SCs pour la structure à un convertisseur. Cela consiste à mettre en place des boucles internes de courant par la gestion de la MLI de chaque convertisseur et donc à adapter 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 FC) contre d'éventuelles surintensités de courant. Le régulateur est à action Proportionnelle-Intégrale (PI), 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.

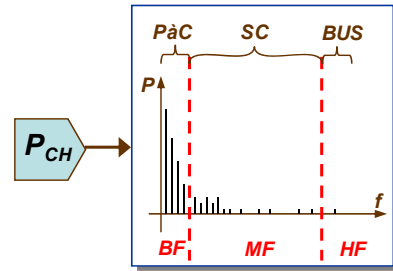


Figure 2 : Principe de base de la décomposition fréquentielle

- Dans un deuxième temps, il faut définir une stratégie de gestion d'énergie du système hybride. 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} , $i_{PàCref}$). Ce principe de commande est appliqué pour chacune des deux structures retenues :

Stratégies de commande de la structure à deux convertisseurs (Figure 3):

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 (HF) en calculant la référence du courant (i_{SCref}), 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_{BUSref} fixée à 48V. D'autre part, plus cette poursuite de tension sera rapide, plus la valeur de capacité C_{BUS} sera petite. Le courant de référence i_{SCref} calculé doit avoir une valeur plus basse que le courant nominal ($-i_{NOM} < \alpha < +i_{NOM}$), 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 $[V_{SCmin}, V_{SCmax}]$. De même que pour les boucles de courant, le correcteur est à action proportionnelle-intégrale (PI). 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 reprendre en permanence de la puissance de charge 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_{SCref}). Par ailleurs, il convient de signaler que le niveau de tension de référence ainsi que la profondeur de décharge (V_{SCmin}/V_{SCmax}) des SCs sont choisis suivant un compromis entre le rendement et l'énergie délivrée ; c'est-à-dire l'utilisation d'un maximum d'énergie stockée sans compromettre le rendement (échauffement...) :

$$V_{SCmin} = \frac{V_{SCmax}}{2} \leq V_{SCref} \leq V_{SCmax} \Rightarrow \frac{V_{SCmin}}{V_{SCmax}} = 0.5 \text{ (une profondeur de 50\%)}$$

Cela permet d'avoir une énergie maximale E_{SCmax} donnée par :

$$E_{SCmax} = \frac{3}{4} C_{SC} \cdot V_{SCmax}^2$$

Ainsi, la tension de référence est choisie comme suit :

$$V_{SCref} = \sqrt{\frac{5}{8}} \cdot V_{SCmax}$$

En effet, pour cette valeur de référence, la quantité d'énergie que les SCs peuvent délivrer est égale à celle restituée.

$$|\Delta E_{SC}| = \frac{3}{16} \cdot C_{SC} \cdot V_{SC_{max}}^2$$

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 PàC, de l'ordre du Hz. Cette fréquence est très inférieure à celle des boucles de courant et de tension et donc la boucle de compensation génère une consigne de courant de la PàC ($i_{PàC_{ref}}$) 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.

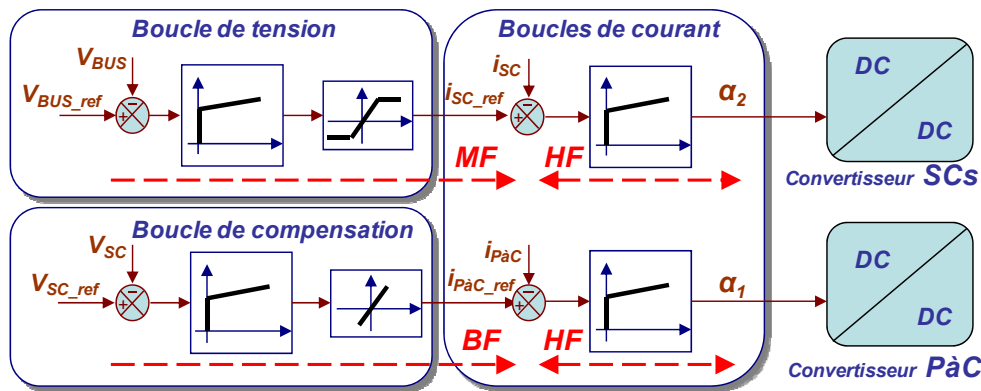


Figure 3 : Schéma de principe de la stratégie de contrôle et de la gestion d'énergie pour la structure à deux convertisseurs

Stratégies de commande de la structure à un convertisseur (Figure 4):

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. 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 de SCs. 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 ($i_{SC_{ref}}$), 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. Sa mise en œuvre est identique à celle décrite dans le contrôle de la structure à deux convertisseurs. D'autre part, la variation de la tension subit une limitation en pente, afin de ne soumettre la pile qu'à des régimes lentement variables (BF).

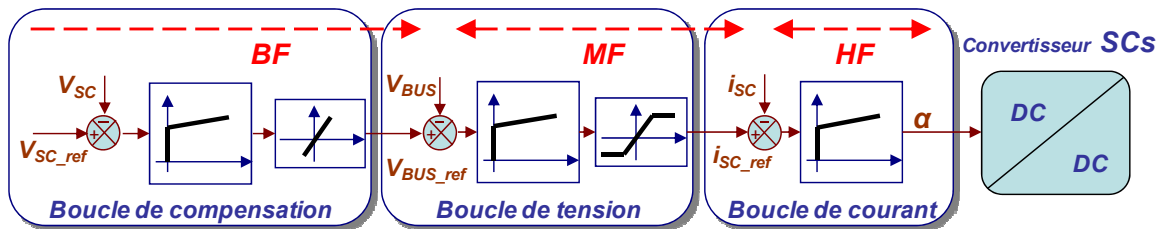


Figure 4 : Schéma de principe de la stratégie de contrôle et de la gestion d'énergie de la structure à un convertisseur

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. Pour ces raisons, nos approches seront testées avec un profil sévère utilisant une succession d'échelons de puissance.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

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, deux hacheurs de type « boost » pour la PàC et « buck-boost » pour les SCs réalisés avec des modules IGBT standard (SEMTRANS: 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, programmable en courant ou en puissance. La Figure 5 montre le banc d'essai et ses différents constituants.

Les paramètres du système hybride sont donnés dans le tableau 1, ci-dessous :

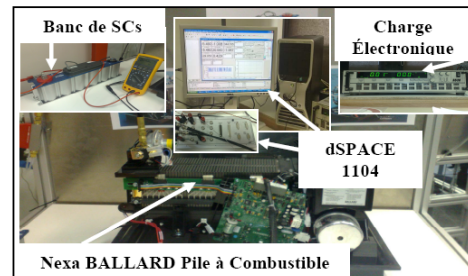


Figure 5 : Description des composants de la plateforme expérimentale

TABLEAU 1
CARACTERISTIQUES DU SYSTEME HYBRIDE

Pile à Combustible :		Charge Electronique :	
Nom de paramètre	Valeur	Nom de paramètre	Valeur
Tension à vide	45V	Puissance nominale	1800W
Tension nominale	26V	Tension nominale	60V
Courant nominal	46A	Courant nominal	150A
Supercondensateurs :		Inductances & Capacités :	
Nom de paramètre	Valeur	Nom de paramètre	Valeur
Capacité	125F	Inductance L_1	200 μ H
Tension nominale	32V	Inductance L_2	100 μ H
Courant nominal	200A	Courant nominal de L_1	100A
Tension de référence	24V	Courant nominal de L_2	150A
		Capacité C_{BUS}	14mF
		Tension de référence V_{BUS_ref}	48V

La Figure 6 (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 6-a2,6-b2). A chaque transitoire positif de charge ($t=0,9s/43s/96s$), la tension de bus pour la structure à deux convertisseurs (Figure 6-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 6-b3) diminue sans à-coups, ce qui implique une augmentation lente de la tension de la PàC, mais celle-ci reste régulée à sa référence. En effet, les supercondensateurs réagissent rapidement aux transitoires rapides de courant (Figure 6-a2, 6-b2). Ces transitoires sont induits par la régulation de tension de bus, pour assurer la majeure partie du front raide de la puissance exigée. Cela permet à la pile de réagir aux sollicitations de la charge sans variation brusque de son courant (Figure 6-a3, 6-b3), ce qui peut être plus favorable pour sa durée de vie¹⁰. 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 6-a4, 6-b4). Il s'établit alors un régime de rééquilibrage, caractérisé ici par une recharge des SCs à leurs valeurs de référence (V_{SCref}) fixées à 24V.

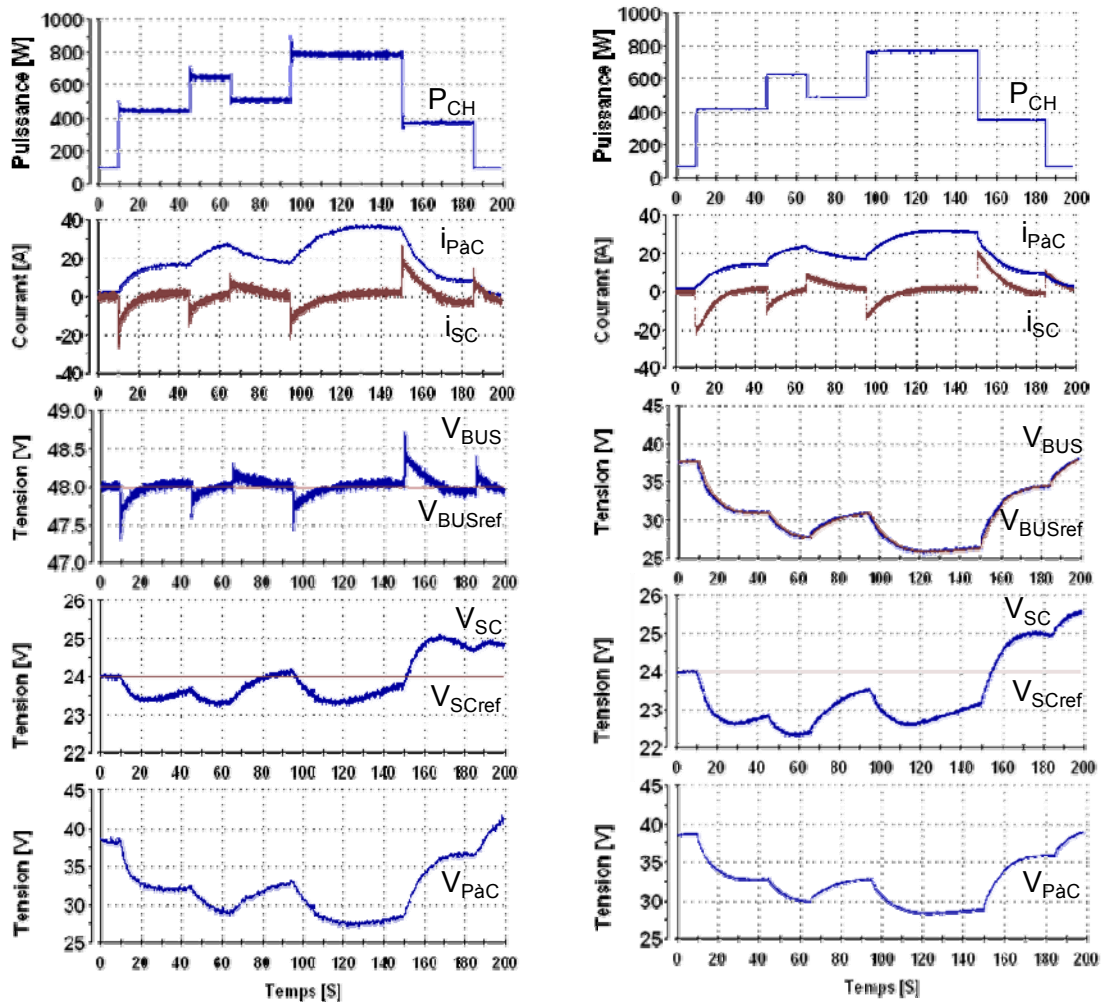


Figure 6 : Résultats expérimentaux pour un profil de puissance de charge
 - a - Structure à deux convertisseurs - b - Structure à un convertisseur

Durant les transitoires négatifs du courant de la charge (aux instants $t = 63\text{s}/147\text{s}/184\text{s}$), on peut également observer une diminution lente du courant de la PaC (BF); celle-ci est contrôlée par la limitation de pente de la boucle de compensation. Durant ces transitoires, la charge reste néanmoins alimentée grâce aux SCs (HF). Par la suite, un rééquilibrage s'effectue car la PaC fournit progressivement la puissance nécessaire à la charge, ainsi que celle nécessaire pour ramener les tensions des SCs à leurs niveaux de référence. Cette stratégie de gestion de l'énergie est identique et reste valable pour les deux structures de convertisseur présentées.

La structure à un convertisseur permet donc d'obtenir une gestion équivalente à la structure à deux convertisseurs au niveau de la PaC (Figure 6-a5, 6-b5). D'autre part, nous pouvons constater que les architectures du système ainsi que l'ensemble des commandes rapprochées et la gestion d'énergie choisie permettent bien de satisfaire la demande de puissance. 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.

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 compenser 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. Cependant, pour les applications automobiles, le poids et le coût sont des contraintes majeures. Ainsi, 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 petites ce qui permet de l'étendre à d'autres types d'application.

REFERENCES

- ¹ CABAL C., GATIGNOL C., La définition et les implications du concept de voiture propre, Rapport de l'Assemblée nationale, No. 2757, 12ème législature, (Déc. 2005).
- ² EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research Information and Communication Unit, European Fuel Cell and Hydrogen Projects 2002-2006, European Communities, EUR 22398, KI-NA-22398-EN-C, ISBN: 9279026925, (2006).
- ³ 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, pp. 4523-4536, (2007).
- ⁴ 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, No.1, (2005).
- ⁵ AZIB T., BETHOUX O., REMY G., and 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), in press.
- ⁶ 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).
- ⁷ CACCIATO M., F. CARICCHI, GIUHLII F., and SANTINI E., A critical evaluation and design of bi-directional DC/DC converters for supercapacitors interfacing in fuel cell applications, in Proc. Industry Applications Conf., IEEE IAS'04, Vol.2, pp. 1127-1133, (Oct. 2004).
- ⁸ 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, J. Power Sources, Vol.130, pp. 163-171, (2004).
- ⁹ GARCIA ARREGUI M., TURPIN C., ASTIER S., Groupe électrogène pour aéronef à pile à combustible hybridée par supercondensateurs, Conférence EF 2007, Toulouse, (Sept. 2007).
- ¹⁰ CORBO P., MIGLIARDINI F., and VENERI O., Dynamic behaviour of hydrogen fuel cells for automotive application, Elsevier, Renewable Energy, Vol.34, No.8, pp.1955-1961 (Aug. 2009).