

Gestion de l'énergie d'un système hybride pile à combustible/batterie basée sur la commande optimale

M. N. SID ^a *, M. BECHERIF ^b , K. MAROUANI ^a , H. ALLOUI ^a

^a Laboratoire Commande des Machines, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Bordj El Bahri, Alger, Algérie

^b UTBM, FCLab FR CNRS 3539, Femto-ST UMR CNRS 6174, 90010 Belfort, France

ARTICLE INFO

Article history :

Received September 2014

Accepted January 2015

Keywords :

Commande optimale ;
Pile à combustible ;
Batterie ;
Gestion de l'énergie ;
Système hybride.

ABSTRACT

Ce papier traite de l'optimisation de gestion de l'énergie électrique dans un véhicule hybride (pile à combustible/batterie), afin de minimiser autant que possible la consommation de l'hydrogène avec le maintien de l'état de charge de la batterie. Premièrement, on présente les sources d'énergies utilisées dans cette étude, la modélisation du système hybride, le choix de type des convertisseurs d'électronique de puissance utilisés et le dimensionnement de ces éléments. Deuxièmement on traite le problème d'optimisation sous contraintes basée sur le principe du minimum de Pontriaguine en introduisant la fonction Hamiltonienne de la commande optimale. Cette stratégie a été évaluée dans un environnement de simulation sous Matlab/Simulink utilisant quatre cycles de conduite standards. Une étude comparative en terme de consommation d'hydrogène a été faite avec deux autres stratégies la première dite thermostat qui est une stratégie très simple basée sur les contraintes imposées par les sources, la seconde approche consiste à utiliser un filtre passe-bas à la sortie de la puissance demandée afin de respecter les contraintes en dynamique sur la source principale. La stratégie traitée présente une bonne amélioration de la consommation d'hydrogène en adoptant une bonne stratégie de gestion de l'énergie électrique dans le système hybride.

©2015 LESI. All right reserved.

1. Introduction

Durant les dernières décennies la recherche fut abondante autour des nouvelles solutions du transport dues aux objectives de réduction d'émissions parmi lesquels les véhicules électriques hybrides (VEHs) à base de Piles à Combustible (PàC) deviennent une technologie attrayante. La gestion de l'énergie au sein de ses véhicules permet d'améliorer l'économie de carburant (l'hydrogène dans ce cas), ce dernier présente une solution très prometteuse

*Email : sidmednacer@hotmail.fr

grâce à sa densité d'énergie massique et volumique élevée comparativement à d'autres sources polluantes comme l'essence et le diesel, l'hydrogène représente un carburant non toxique non polluant à zéro émissions ou la combustion ne rejette que de l'eau.

Le futur du transport soutenable est étroitement attaché au développement de ces véhicules. En effet, ces derniers sont beaucoup silencieux, non polluants et efficaces que des véhicules basés sur le moteur à combustion interne [1], l'utilisation de l'hydrogène dans un véhicule qui roule pose cependant des problèmes : la nécessité d'un système de stockage, les convertisseurs d'électronique de puissance, le choix du moteur de traction et la gestion des flux énergétiques qui fait l'objet de cette étude afin d'améliorer la consommation du combustible tout en respectant les contraintes imposées par les sources.

Les PàCs sont des sources à fort courant et à faible tension. Pour les utiliser dans des chaînes de traction de véhicule électrique il faut passer par des convertisseurs statiques adaptés afin d'élever la tension de fonctionnement. L'optimisation globale de ces chaînes de traction passe par l'hybridation de la pile en utilisant un système de stockage d'énergie (SSE) [2].

Ce travail se focalise sur un système multi-source ayant la PàC comme source principale et un pack de batteries qui représente la source secondaire, dans laquelle la PàC assure la demande de puissance en régime permanent tandis que les batteries assurent l'accélération rapide et capturent l'énergie lors du freinage. Cet article se concentre sur la commande optimale appliquée à la gestion de l'énergie, afin de réduire au minimum la consommation de l'hydrogène avec le maintien de l'état de charge des batteries dans une zone acceptable.

2. Les sources d'énergie

2.1. La pile à combustible

La PàC est un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. Cette technologie a connu un regain d'intérêt en tant qu'alternative prometteuse pour la propulsion de chaînes de traction et pour des applications stationnaires. Les PàC à Membranes Echangeuses de Protons (PEMFC :Proton Exchange Membrane Fuel Cell) opèrent à des températures relativement basses et disposent d'une densité de puissance élevée et d'un mode de fonctionnement simple et sûr. Ces avantages font des PEMFC des candidats sérieux pour la propulsion des véhicules électriques (VEs) [3].

Le principe de fonctionnement de la PàC est assez simple, il est basé sur le procédé inverse de l'électrolyse. Ce générateur génère de l'électricité en mettant en jeu un combustible et un comburant à travers un électrolyte. La réaction globale du procédé est représentée à la figure.1 et elle est décrite comme suit :



Les réactions chimiques d'une cellule sont illustrées par les Réactions (2) et (3) :



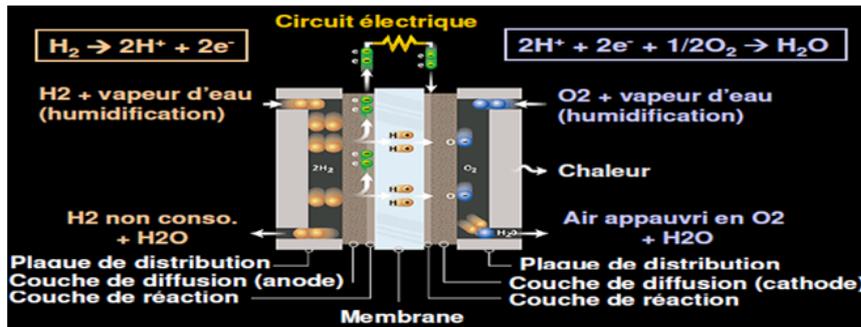


Fig. 1. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEM [4].

Néanmoins la PàC représente aussi quelques inconvénients : un coût élevé, une durée de vie encore faible et une dynamique lente car elle ne peut pas répondre aux pics de puissance. Ainsi, une source d'appoint est ajoutée, concernant son coût on s'attend qu'il baisse avec le progrès technologique, d'autre part plusieurs recherche récentes ont essayé d'améliorer sa durée de vie en utilisant des méthodes d'optimisation multicritères comprenant la consommation de combustible et le dimensionnement optimal des sources.

2.2. Les batteries

Une batterie est un accumulateur réversible d'énergie qui possède deux modes de fonctionnement :

- La décharge : elle fonctionne comme un générateur d'énergie électrique à partir de l'énergie chimique.
- La charge : la batterie est rechargée en convertissant l'énergie électrique en énergie chimique.

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un même module est uniquement destiné à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif [5].

3. Modélisation du système hybride

La structure étudiée (Fig. 2) est constituée d'une PEMFC comme source principale d'énergie connectée à un convertisseur DC/DC élévateur et de batterie Li-ion comme source auxiliaire de puissance connectée à un convertisseur DC/DC élévateur abaisseur bidirectionnel en courant, un bus continu connecté via un convertisseur DC/AC qui alimente la machine de traction.

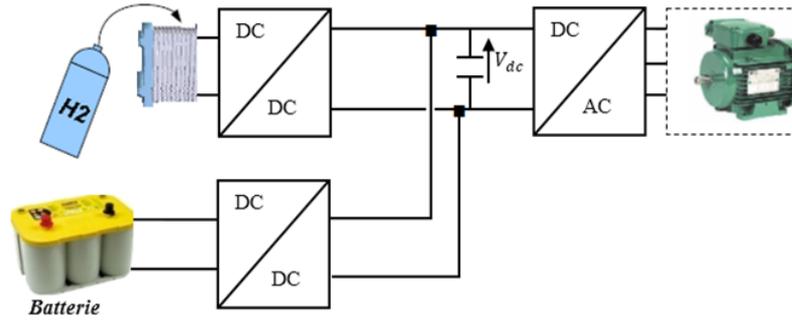


Fig. 2. Architecture de la structure étudiée.

3.1. Le modèle statique de PEMFC

De nombreux travaux comme par exemple [6-8], proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (Fig. 3) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} (ou chute d'activation : région 1), la surtension ohmique V_{ohm} (ou chute ohmique : région 2) et la surtension de concentration V_{conc} (ou chute de concentration : région 3) [9].

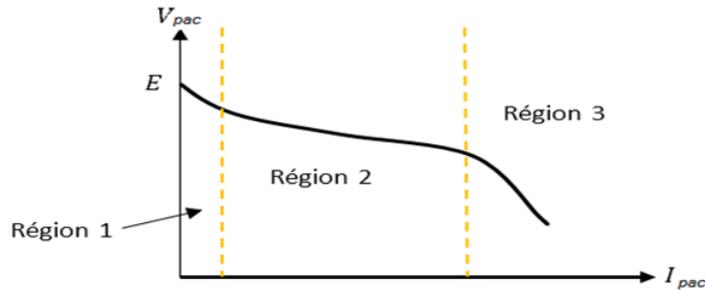


Fig. 3. Caractéristique statique d'une PàC.

$$V_{pac} = E - A \log \left(\frac{i_{pac} + i_n}{i_0} \right) - R_m(i_{pac} + i_n) + B \log \left(1 - \frac{i_{pac} + i_n}{i_{Lim}} \right) \quad (4)$$

3.2. Le modèle de la batterie

Plusieurs modèles de batteries trouvés en littérature utilisent un modèle simple (Fig. 4). Il comprend, une force électromotrice modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie et une résistance interne.

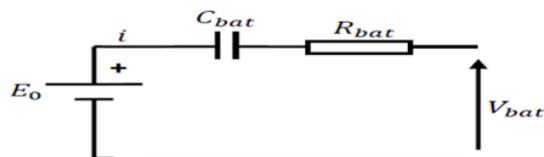


Fig. 4. Modèle électrique de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_{bat}.i - V_c \quad (5)$$

On définit également l'état de charge (SoC) de la batterie par :

$$SoC(t) = SoC(0) - \frac{1}{C_{bat}} \int i(t).dt \quad (6)$$

4. Stratégie de gestion de l'énergie du système hybride

Le problème de la gestion de l'énergie consiste à trouver la meilleure répartition des puissances entre les sources d'énergie du système. La présence d'un SSE introduit des degrés de liberté supplémentaires dans la fourniture de la puissance demandée. Mais cette répartition doit satisfaire la demande de puissance du moteur électrique et respecter les contraintes de fonctionnement (puissance de la PàC, bornes de l'état de charge de la batterie). Plusieurs critères de performance peuvent intervenir dans le choix de cette répartition ; le critère le plus utilisé est la consommation du combustible (carburant pour les moteurs thermiques, hydrogène pour les PàCs,...). Ce critère est appelé aussi la fonction coût et il est exprimé comme suit [2] :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \gamma(x(t), u(t), t) \quad (7)$$

Dans notre étude on va considérer que la variable d'état est le SoC de la batterie et en choisissant la puissance fournie par la PàC comme variable de commande, l'équation qui régit la dynamique du système est dans ce cas [10-12] :

$$S\dot{o}C = -\frac{i}{Q_{bat}}, i = \frac{V_{bat} - \sqrt{V_{bat}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}} \quad (8)$$

D'autre part, le système hybride doit assurer la demande instantanée en puissance, ce qui se traduit par la contrainte d'égalité suivante [13] :

$$P_{ch}(t) = P_{pac}(t) + P_{bat}(t) \forall t \quad (9)$$

Le dimensionnement des éléments constitutifs du système hybride impose des limites maximales et minimales sur les puissances échangées et les niveaux d'énergies pouvant être atteints. Ces limites forment les contraintes d'inégalité exprimées comme suit [14] :

$$P_{pac,min} \leq P_{pac}(k) \leq P_{pac,max} \quad (10)$$

$$\Delta P_{pac,tauxdechute} \leq \frac{dP_{pac}(k)}{dt} \leq \Delta P_{pac,tauxd'élévation} \quad (11)$$

$$SoC_{\min} \leq SoC(k) \leq SoC_{\max} \quad (12)$$

$P_{pac,\max}$ et $P_{pac,\min}$ sont respectivement les puissances minimale et maximale fournies par la PàC et SoC_{\max} et SoC_{\min} les états de charge maximal et minimal pouvant être atteints par la batterie.

Sachant que le temps de réponse de la PàC est grand par rapport à d'autres sources d'énergies, par conséquent, elle ne supportera pas certaines pentes de puissance de charge (accélération). Pour remédier à ce problème, la pile fournira une puissance dont la pente maximale ne dépassera pas une valeur à déterminer. (À l'élévation $\Delta P_{pac,tauxd'élévation}$ et à la chute $\Delta P_{pac,tauxdechute}$ de la pente de puissance).

Enfin une condition supplémentaire est imposée au système afin de garantir le maintien de l'état de charge de la batterie. A ce propos, nous allons considérer que l'état de charge de cet élément à la fin de l'horizon de temps étudié est égal à son état initial [14] :

$$SoC(t_0) = SoC(t_f) \quad (13)$$

Comme il été mentionné l'objectif de la commande optimale appliquée à la gestion de l'énergie est la minimisation de la consommation de combustible dans un intervalle de temps $[t_0, t_f]$ sur un profil de mission donné. Ce qui revient à trouver à chaque instant la puissance à demander à la PàC, afin de minimiser l'énergie consommée à partir du réservoir de combustible dans cet intervalle tout en vérifiant les contraintes ainsi évoquées. L'énergie consommée à partir du réservoir de combustible peut être exprimée en fonction de la puissance nette livrée par la pile, et son rendement total donc la fonction cout à minimiser est exprimée par l'équation suivante [15] :

$$\gamma(x(t), u(t), t) = \frac{P_{pac}}{\eta_{pac}(P_{pac})} + (SoC(t_0) - SoC(t_f))^2 \quad (14)$$

Donc :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \frac{P_{pac}}{\eta_{pac}(P_{pac})} + (SoC(t_0) - SoC(t_f))^2 \quad (15)$$

Le rendement peut se déterminer par [14] :

$$\eta_{PàC} = \frac{-2V_{pac}F}{N_{cell}\Delta h} \quad (16)$$

Introduisons le Hamiltonien appliqué sur le système défini par l'équation suivante :

$$H(x(t), u(t), \lambda(t)) = \gamma(x(t), u(t), t) + \lambda(t).f(x(t), u(t)) \quad (17)$$

Avec :

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H(x^*(t), u^*(t), \lambda(t))}{\partial x} = -2(x(t) - x(t_0)) \quad (18)$$

$$\lambda(t) = \lambda_0 - 2 \int_{t_0}^{t_f} (x(t) - x(t_0)).dt \quad (19)$$

Donc le problème d'optimisation consiste à trouver les valeurs de la puissance demandée à la PàC qui permettent de respecter la condition de maintien de l'état de charge avec la minimisation de la fonction Hamiltonienne comme indiqué par l'équation suivante :

$$P_{pac}^* = \arg \min H(x^*(t), u^*(t), \lambda(t)) \quad (20)$$

Pour l'implémentation de l'algorithme le cycle de conduite est connu à priori ce que nous donne les valeurs du temps final ainsi que les valeurs des états de charges initial et final, ce qui reste à trouver donc est la valeur initiale de l'état adjoint (le multiplicateur de Lagrange), vu qu'on a une valeur unique qui convient à une trajectoire optimale avec le maintien de l'état de charge. On a effectué une recherche par l'implémentation d'un algorithme de dichotomie utilisant une approche graphique. Néanmoins cette valeur n'est pas totalement exacte et elle change avec le cycle de conduite et l'état de charge initial de l'élément de stockage.

5. Résultats de simulation et discussion

Pour évaluer la stratégie développée, une simulation utilisant ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator : logiciel de simulation de véhicules conventionnels ou hybrides sur des cycles normalisés fut conduite [16,17] avec un modèle d'un système hybride incluant le véhicule décrit dans le Tableau 1, muni d'une PàC et d'un SSE avec les principaux paramètres énumérés dans le Tableau 2. Le pack de la batterie est dimensionné afin d'accomplir la condition suivante d'accélération : le véhicule (avec des une masse totale de 1400 Kg) doit être capable d'accélérer de 0 à 96,5 km/h en 15 s avec une PàC de 30-kW.

Tableau 1. Paramètres du véhicule.

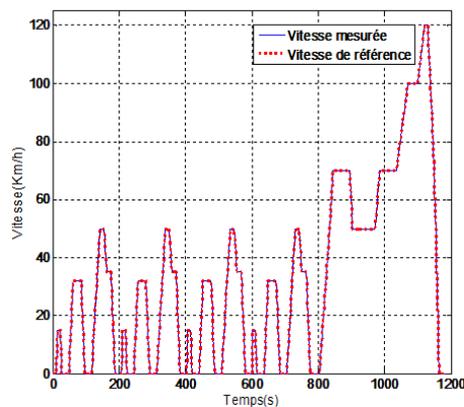
Paramètre	Valeur
Poids de véhicule	1400 kg
Surface frontale	2 m ²
Coefficient aérodynamique	0.335
Coefficient de frottement de la roue	0.009
Masse volumique de l'aire	1.2 kg.m ⁻³
Constante de gravité	9.8 m.s ⁻²

Tableau 2. Composants du système hybride.

Paramètre	Valeur
Nombre d'éléments de batterie	30
Masse d'un élément de batterie	3.76 kg
Capacité nominale de batterie	12 Ah
Etat de charge maximal	90%
Etat de charge minimal	40%
Puissance max du PàC	30 kW
Puissance min du PàC	600 W
Puiss de taux d'élévation	+600 W s ⁻¹
Puiss de taux de chute	-900 W s ⁻¹

La stratégie de gestion de l'énergie basée sur la commande optimale a été comparée avec deux autres stratégies pour évaluer les résultats en termes de consommation du combustible et le maintien de l'état de charge. Ces stratégies ont été examinées sur quatre cycles de conduite standard : The New European Driving Cycle (NEDC) constitué de quatre parcours urbain (ECE15) suivi d'un parcours extra urbain (EUDC), the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), the Federal Test Procedure (FTP), et le cycle de conduite Japonais (1015).

Pour illustrer le comportement des stratégies de gestion de l'énergie, les résultats de simulation correspondant au cycle NEDC sont montrés : La vitesse du véhicule avec sa référence à la Figure 5 les puissances échangées, avec l'évolution du SoC sont aux Figs. 6 à 9 pour la stratégie basée sur la commande optimale, ainsi que le courant du pack de batterie pour la même stratégie à la Fig. 10, et le courant et la tension de la PàC aux Figures 11 et 12, les Figures 13 et 14 montrent les puissances échangées, avec l'évolution du SoC pour la stratégie thermostat, et aux Figures 15 et 16 pour la stratégie basée sur la séparation fréquentielle.

**Fig. 5.** La vitesse de véhicule avec la référence (Cycle NEDC).

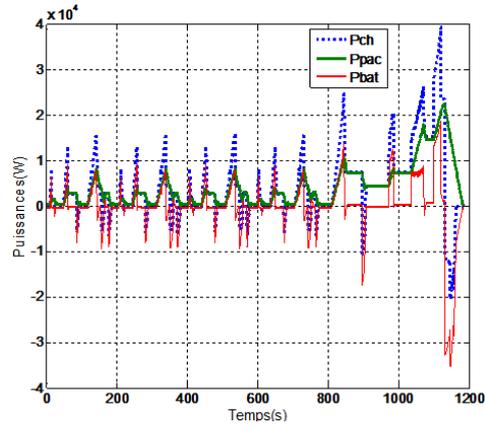


Fig. 6. Les puissances échangées pour la stratégie basée sur la commande optimale (Cycle NEDC).

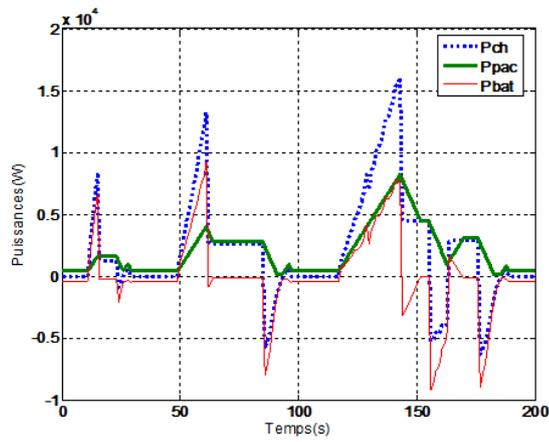


Fig. 7. Les puissances échangées (Cycle ECE15).

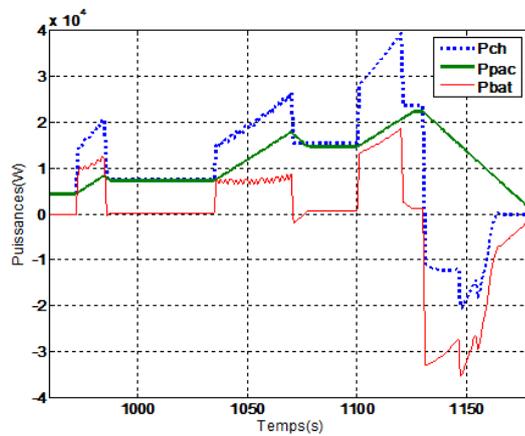


Fig. 8. Les puissances échangées (Cycle EUDC).

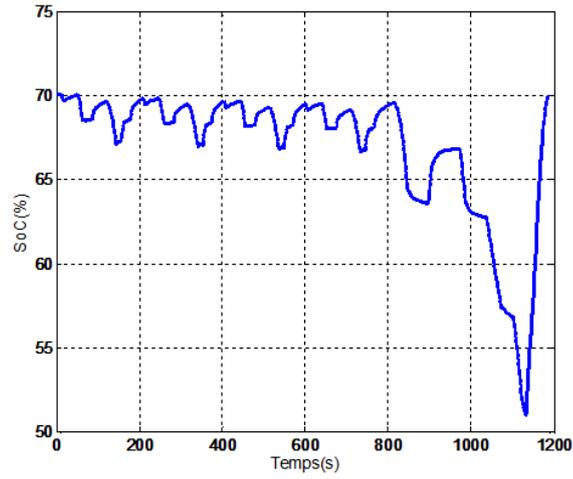


Fig. 9. L'évolution de l'état de charge de batterie.

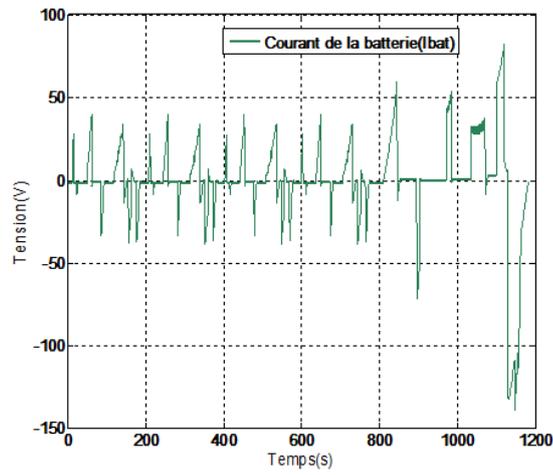


Fig. 10. Le courant du pack de la batterie.

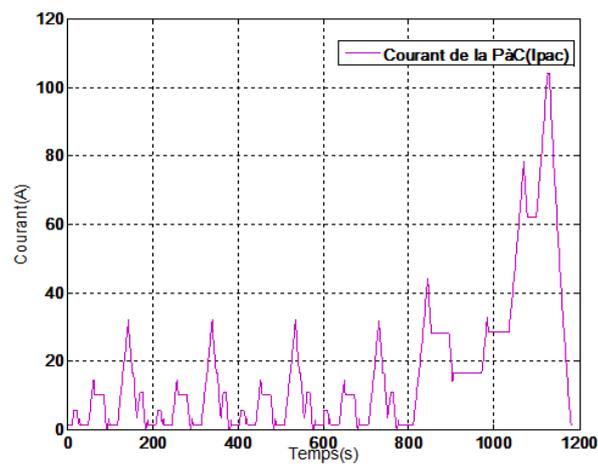


Fig. 11. Le courant de la PàC.

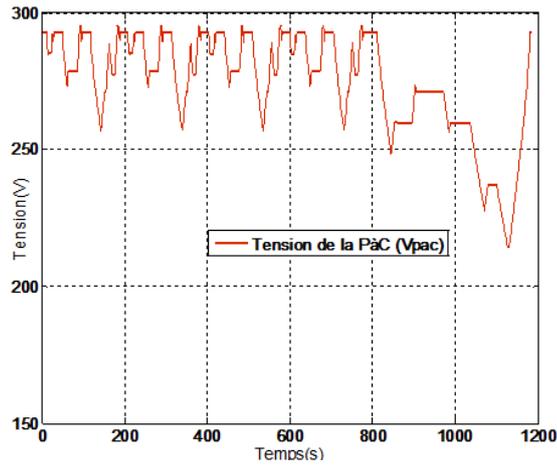


Fig. 12. La tension de la P&C.

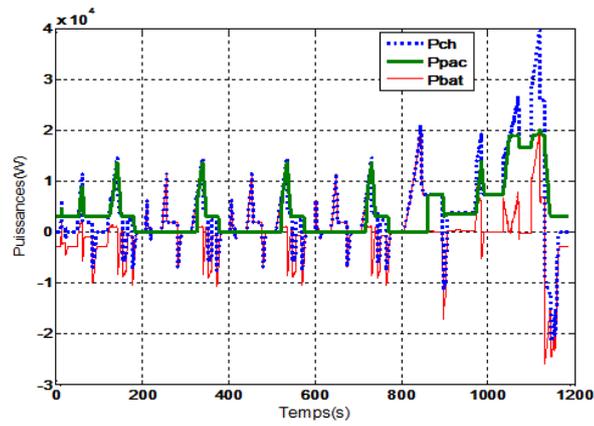


Fig. 13. Les puissances échangées pour la stratégie thermostat ;

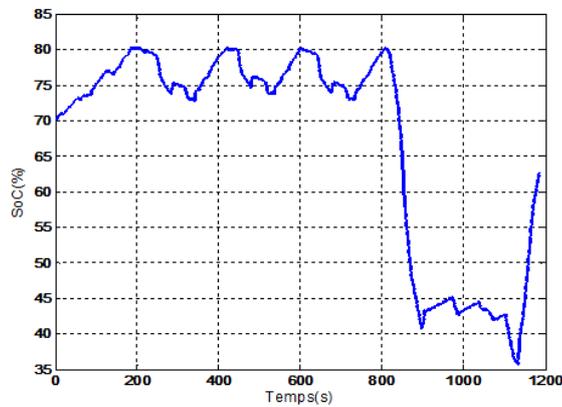


Fig. 14. L'évolution de SoC de la batterie pour la stratégie thermostat.

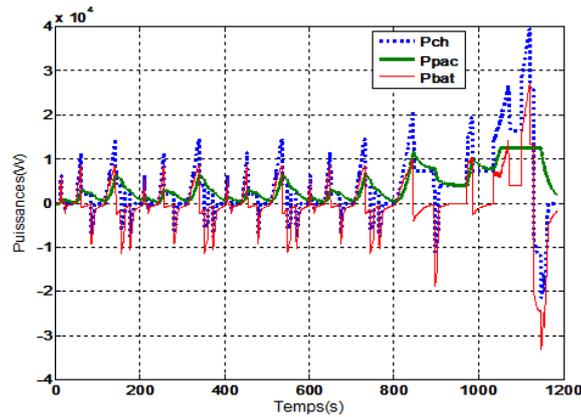


Fig. 15. Les puissances échangées pour la stratégie basée sur la séparation fréquentielle.

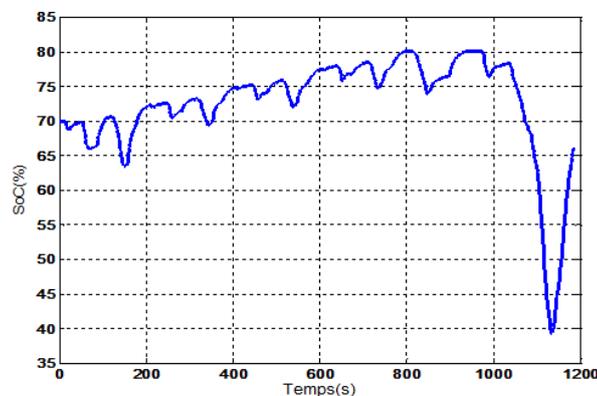


Fig. 16. L'évolution de SoC de la batterie pour la stratégie basée sur la séparation fréquentielle.

D'après la Figure 5, on voit bien que la vitesse de véhicule suit bien sa référence ce qui se traduit par les puissances échangées montrées par les figures ci-dessus où la somme des puissances fournies par la PàC et fournies ou absorbées par le pack des batteries assure la puissance demandée par la traction du véhicule tout en respectant les contraintes imposées par les sources d'énergie.

L'état de charge du pack de batteries dans le cas de la gestion de l'énergie basée sur la commande optimale est bien contrôlé, et on remarque qu'il revient à l'état de charge initial à la fin de cycle de conduite dans tous les cas. Ce qui traduit par la loi de commande ajoutée à la fonction de coût à minimiser où l'on a ajouté cette contrainte d'égalité car on minimise dans tout le parcours la surface (l'erreur) entre l'état de charge actuel et l'état de charge désiré. Cette fonction est liée au choix du paramètre de réglage (l'état adjoint initial), un mauvais choix sera traduit par un mauvais contrôle de l'état de charge, ce paramètre change avec le profil de conduite à suivre qui est connu a priori et aussi avec l'état de charge initial du pack de batteries.

Dans les deux cas de la gestion de l'énergie, l'état de charge de la batterie est laissé libre lors de la mission du véhicule tout en restant dans les limites préconisées précédemment. Ce mode de fonctionnement nécessite la recharge de la batterie à un moment ou à un autre grâce au réseau électrique ou bien par le changement du pack de batteries par

un autre chargé. D'un autre coté, dans la gestion de l'énergie basée sur la commande optimale, l'état de charge de la batterie est contrôlé de manière à ce qu'il revienne à sa valeur initiale en fin de mission. Ainsi, il n'est pas nécessaire de faire appel au réseau électrique pour recharger la batterie. Cependant, ce mode de gestion n'est possible que si la mission du véhicule est connue à l'avance et que la loi de gestion hors-ligne a fait l'objet d'une optimisation globale.

Une étude comparative entre la gestion de l'énergie basée sur la commande optimale et les deux autres gestions (thermostat et la séparation fréquentielle) a été faite pour bien évaluer les résultats. On prend comme critères de performance la consommation du combustible et le maintien de l'état de charge du pack de batteries, aussi on a pris par considération le cas où aucune hybridation est prise en compte où la PàC est la seule source d'énergie, les résultats de cette comparaison sont montrés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Comparaison entre les gestions de l'énergie.

Le cycle de conduite	Stratégie de gestion l'énergie	La consommation de l'hydrogène (g)	L'écart sur le SoC (%)
NEDC	Sans hybridation	103.6	/
	Thermostat	94.84	-7.43
	Séparation fréquentielle	87.35	-4.03
	Commande optimale	80.56	-0.12
UDDS	Sans hybridation	108.66	/
	Thermostat	96.48	-4.16
	Séparation fréquentielle	86.96	-2.24
	Commande optimale	83.09	-0.14
FTP	Sans hybridation	165.01	/
	Thermostat	134.47	-6.62
	Séparation fréquentielle	128.91	-3.47
	Commande optimale	126.85	-0.1
1015	Sans hybridation	41.37	/
	Thermostat	38.37	-2.48
	Séparation fréquentielle	35.72	-1.28
	Commande optimale	33.79	-0.79

D'après les résultats mentionnés on peut dire que la gestion de l'énergie basée sur la commande optimale conduit à une bonne réduction de la consommation de l'hydrogène tout en respectant les limites imposées par les sources, un bon contrôle de l'état de charge et une stabilité lors du fonctionnement de la PàC.

La gestion de l'énergie par thermostat permet un bon fonctionnement qui est lié au bon choix des limites préconisées des sources d'énergie. Elle se caractérise par une simplicité d'implémentation mais elle souffre de trois inconvénients majeurs : le premier est lié à la consommation intensive du combustible à cause de l'absence d'un critère de performance qui contrôle ce dernier, le deuxième est le temps de réponse de la PàC qui n'est pas respecté

tout le temps et le troisième est que l'état de charge à la fin de cycle est laissé libre mais dans une fourchette acceptable. Ce dernier inconvénient est présent également dans la gestion basée sur la séparation fréquentielle qui fonctionne en respectant la dynamique lente de la PàC ce qui permet de prolonger sa durée de vie, et qui permet aussi de minimiser la consommation mais pas d'une manière satisfaisante et continue.

Dans tous les cas traités : la gestion basée sur la commande optimale présente les meilleures performances désirées de plus, elle ne souffre pas d'un temps de calcul important comme la gestion de l'énergie basée sur la programmation dynamique où le critère d'optimalité de Bellman est pris en considération. Le fait qu'elle soit une gestion hors ligne, la rendre moins réalisable sauf dans les applications où le trajet de conduite est connu a priori comme les Tramways et les TGVs, plusieurs recherches récentes ont tenté de l'appliquer en ligne en jouant sur l'état adjoint qui doit être instantanée en fonction de l'état de charge de l'élément de stockage.

6. Conclusion

Dans le présent travail, une stratégie de gestion de l'énergie basée sur la commande optimale a été développée, cette stratégie dépend au parcours de conduite, prend en compte plusieurs critères de performance comme la dynamique lente de la PàC, la réduction de la consommation du combustible et le bon contrôle de l'élément de stockage, a permis d'obtenir une solution exacte au problème de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride.

Une comparaison a été faite avec d'autres stratégies en ligne (thermostat et séparation fréquentielle), ces stratégies ont été évaluées dans un environnement de simulation en utilisant quatre cycles de conduite standards. Les résultats montrent que la gestion de l'énergie basée sur la commande optimale présente toujours les meilleures performances souhaitées. Néanmoins l'hypothèse de connaissance a priori du cycle de puissance demandée empêche cette technique d'être directement mise en ligne. Même si on maîtrise le contrôle du paramètre qui régit l'état de charge de manière à respecter les contraintes sur les niveaux d'énergie, les résultats restent sous optimales ce qui nécessite la transformation des résultats à une solution plus générale, liée aux données disponibles à l'instant de calcul.

REFERENCES

- [1] C. C. Chan, A. Bouscayrol, C. K. Chen, *Electric, hybrid and fuel cell vehicles : architectures and modelling*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59 no 2, pp. 589-598, 2010.
- [2] A. Neffati, *Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier, pp. 1-2, 2013.
- [3] M. Becherif, *Modélisation, commandes non linéaires et gestion de l'énergie des systèmes multi-sources -multi-stockages*, HDR, Université de Franche-Comté, pp. 30-19, 2011.
- [4] D. Candusso, *Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport*, HDR, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, pp. 47, 2013.

- [5] G. Souffran, *Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, pp. 98-99, 2013.
- [6] J. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha, M. G. Simoes, *Simulation of fuel-cell stacks using a computer-controlled power rectifier with the purposes of actual high-power injection applications*, IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 39, n° 4, pp. 1136-1142, 2003.
- [7] I. Sadli, P. Thounthong, J. P. Martin, S. Raël, B. Davat, *Behaviour of a protons exchange membrane fuel cell (PEMFC) supplying a low voltage static converter*, 2nd France Deutschland Fuel Cell Conference (FDFC2004), Belfort (France), 2004.
- [8] M. Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, T. Thomas, *A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications*, Journal of Power Sources, vol. 138, n° 1-2, pp. 199-204, 2004.
- [9] M. Becherif, *Passivity-Based Control of Hybrid Sources : Fuel Cell and Battery*, 11th IFAC Symposium on control in Trans-portion (CTS'06), Netherland, 2006.
- [10] C. H. Zheng, C. E. Oh, Y. I. Park, W. S. Lim, G. Xu, *PMP-Based Power Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Vehicles Considering Multi-Objective Optimization*, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 14, No. 5, pp. 845-853, 2013.
- [11] C. Y. Li, G. P. Liu, *Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles*, Journal of Power Sources, Vol. 192, pp. 525-533, 2009.
- [12] C. H. Zheng, N. W. Kim, Y. I. Park, W. S. Lim, G. Xu, *The effect of battery temperature on total fuel consumption of fuel cell hybrid vehicles*, International Journal Of Hydrogen Energy Vol. 38, pp. 5192-5200, 2013.
- [13] D. Feroldi, M. Serra, J. Riera, *Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles*, Journal of Power Sources, Vol. 190, pp. 387-401, 2009.
- [14] W. Hankache, *Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, pp. 36-41, 2008.
- [15] N. Ouddah, M. Boukhnifer, A. Raisemche, *Two Control Energy Management Schemes for Electrical Hybrid Vehicle*, Presented at the SSD Systems, Signals & Devices, Hammamet, Tunisia, March 18-21, 2013
- [16] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O'Keefe, S. Sprik, K. Wipke, *ADVISOR : a systems analysis tool for advanced vehicle modeling*, Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 255-266, 2002.
- [17] K. Wipke, M. Cuddy, S. Burch, *ADVISOR 2.1 : a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach*, IEEE Transactions on Vehicular Technology 48, pp 1751-1761, 1999.