

Commande passive d'un système d'alimentation hybride photovoltaïque / batterie / pile à combustible / électrolyseur

Suyao Kong, Mickaël Hilaiet, Robin Roche *

* FEMTO-ST, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comte, UTBM,
FCLAB, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comte, rue Thierry Mieg, F-90010 Belfort Cedex, France
suyao.kong@utbm.fr, mickael.hilaiet@univ-fcomte.fr, robin.roche@utbm.fr

RESUME - Une commande passive pour un système hybride comprenant des panneaux photovoltaïques, une pile à combustible, une batterie et un électrolyseur est proposé. Cette commande a été conçu via la méthode de conception IDA-PBC (Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control), afin de résoudre le problème de coordination des convertisseurs. Les résultats de simulation montrent que cette commande réalise une exploitation optimale des composants en préservant la stabilité de l'ensemble du système, en boucle fermée.

ABSTRACT - A passivity-based controller for a hybrid system including photovoltaic panels, a fuel cell, a battery and an electrolyser is proposed in this work. This controller is designed using a design method called Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control (IDA-PBC), in order to solve the converters coordination problem. This controller achieves an optimal exploitation of the components while preserving the stability of the whole closed-loop system, which is proven by the simulation results.

MOTS-CLES - Batterie, électrolyseur, pile à combustible, IDA-PBC, commande, passivité, photovoltaïque.

1. Introduction

Dans le contexte actuel où les sources d'énergie traditionnelles ne permettent pas de répondre à la demande croissante en énergie sans émissions massives aggravant le changement climatique [1], les énergies renouvelables sont en train de devenir la principale source d'énergie, mais elles ont aussi des contraintes. Par exemple, pour un système photovoltaïque (PV), la production dépend des conditions météorologiques, elle est donc intermittente et variable. Le stockage d'énergie est une solution pour atténuer ces problèmes. En général, un système de stockage avec une batterie est utilisé pour faire face à la variabilité à court terme, tandis qu'un stockage sous forme d'hydrogène peut également être utilisé sur une longue période.

Cependant, la durée de vie des systèmes pile à combustible (PàC) est limitée par leurs dégradations. Le vieillissement de la PàC est causé par les changements brusques de courant de charge. En conséquence, les PàCs sont associées à des composants auxiliaires afin de réduire la variabilité du courant. Selon les travaux effectués, la PàC est souvent associée à une batterie [2]–[5] ou à des super-condensateurs [6]–[10].

Plusieurs types de commande à hautes performances ont été proposés dans la littérature. Elles reposent sur différentes méthodologies, telles que la logique floue [8], la commande prédictive (MPC) [5] ou le partage de charge [11]. Ces contrôleurs sont proposés afin de réaliser une stratégie de gestion d'énergie optimale pour fournir la puissance nécessaire à la charge en évitant une demande dynamique à la PàC. Cependant, la stabilité du système en boucle fermée n'est pas toujours prouvée théoriquement dans ces recherches.

Pour résoudre ce problème, la méthode IDA-PBC (Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control) [12]–[14] est appliquée pour la conception du contrôleur. Par rapport aux autres méthodes, l'avantage d'IDA-PBC est de prouver intrinsèquement la stabilité de l'ensemble du système en boucle fermée, associée à une coordination performante de tous les composants.

Cet article comporte quatre sections: la section II décrit la modélisation du système hybride; la conception du contrôleur utilisant IDA-PBC est ensuite détaillée dans la section III; la section IV présente la stratégie de gestion d'énergie dans différents cas de fonctionnement. Enfin, les résultats sont fournis à la section V.

2. Modélisation

2.1 Modélisation des éléments

Un modèle statique de la pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC) décrit par une fonction polynomiale d'ordre 5 [15] est utilisé. Les coefficients ont été déterminés à partir de mesures expérimentales de courant/tension d'une PEMFC [6]. La batterie est modélisée par un circuit équivalent du premier ordre suivant le modèle de Thevenin [16]. Dans ce modèle, la tension du circuit ouvert de la batterie E_0 est décrit par une fonction polynomiale fonction de l'état de charge [17]. Un modèle d'électrolyseur proposé par M. Chandesris *et al.* [18] est appliqué. **Ce modèle est constitué de 10 cellules en série, et la température est fixée à 80°C.** Le modèle du PV utilisé est détaillé dans [19], avec 36 cellules en série.

Dans cette étude, le système hybride est composé d'un module photovoltaïque (425 W), d'une PEMFC (1,2 kW), d'un électrolyseur (925 W) et de 6 packs de batterie de 1,6 Ah en série.

2.2 Modélisation du système hybride

La figure 1 représente la structure du système hybride simplifié ainsi que l'architecture de la commande. Tous les éléments électriques sont connectés sur le bus DC par les convertisseurs statiques en parallèle. Les courants sont pilotés par les régulateurs de courant IP tandis que la tension du bus DC et l'état de charge (SoC) de la batterie sont pilotés par **la commande passive IDA-PBC.**

Ce système non-linéaire peut s'exprimer avec les équations d'état de 6ème ordre sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} v_b(t) = \frac{1}{C} [(1 - \alpha_1(t)) i_{fc}(t) + (1 - \alpha_2(t)) i_{bat}(t) + (1 - \alpha_3(t)) i_{pv}(t) - \alpha_4(t) i_{elec}(t) - i_l(t)] \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} v_1(t) = -\frac{v_1(t)}{R_1 C_{bat}} + \frac{i_{bat}(t)}{C_{bat}} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_{fc}(t) = \frac{-(1 - \alpha_1(t)) v_b(t) + v_{fc}(t)}{L_{fc}} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} i_{bat}(t) = \frac{-(1 - \alpha_2(t)) v_b(t) + v_{bat}(t)}{L_{bat}} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} i_{pv}(t) = \frac{-(1 - \alpha_3(t)) v_b(t) + v_{pv}(t)}{L_{pv}} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} i_{elec}(t) = \frac{\alpha_4(t) v_b(t) - v_{elec}(t)}{L_{elec}} \quad (6)$$

avec les états $x(t) = [v_b; v_1; i_{fc}; i_{bat}; i_{pv}; i_{elec}]^T$, les entrées de contrôle $u(t) = [u_1; u_2; u_3; u_4]^T = [1 - \alpha_1; 1 - \alpha_2; 1 - \alpha_3; \alpha_4]^T$, et les mesures $y(t) = [x(t), v_{fc}(t), v_{elec}(t)]$.

Ici, les rapports cycliques des convertisseurs sont représentés par $\alpha_{1,2,3,4}(t)$. Les variables $v_b(t)$, $v_{fc}(t)$, $v_{pv}(t)$ et $v_{elec}(t)$ correspondent aux tensions du bus DC, de la PàC, du PV et de l'électrolyseur. R_1 et C_1 correspondent à la résistance de polarisation et la capacité équivalente de la batterie [16]. $v_1(t)$ représente la tension entre C_1 et R_1 dans le modèle de Thévenin de la batterie. $i_{fc}(t)$, $i_{bat}(t)$, $i_{pv}(t)$, $i_{elec}(t)$ correspondent aux courants de la PàC, de la batterie, du PV et de l'électrolyseur, et $i_l(t)$ représente le courant de la charge.

L'objectif du régulateur du courant IP est de forcer les courants i à suivre leurs références i^* . Afin de simplifier la conception des boucles externes de la commande, nous supposons que L_{fc} , L_{bat} , L_{pv} et L_{elec} sont faibles par rapport aux autres paramètres. Par conséquent, avec la différence d'échelle de temps entre les tensions et les courants (système perturbé singulier [12]), nous pouvons supposer que tous les courants sont égaux aux références. Ainsi, le système peut être simplifié et représenté par un modèle non-linéaire de 2ème ordre décrit ci-dessous :

$$\frac{d}{dt} v_b(t) = \frac{1}{C} \left[\frac{v_{fc}(t)}{v_b(t)} i_{fc}^*(t) + \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} i_{bat}^*(t) + \frac{v_{pv}(t)}{v_b(t)} i_{pv}(t) - \frac{v_{elec}(t)}{v_b(t)} i_{elec}^*(t) - i_l(t) \right] \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} v_1(t) = -\frac{v_1(t)}{R_1 C_1} + \frac{i_{bat}^*(t)}{C_1} \quad (8)$$

avec $x_r(t) = [x_1; x_2]^T = [v_b; v_1]^T$, les entrées de contrôle $u_r = [i_{fc}^*; i_{bat}^*; i_{elec}^*]^T$, les mesures $y_r = [v_b; v_1]^T$ et $z_r = [i_{fc}; i_{bat}; i_{pv}; i_{elec}; v_{fc}; v_{bat}; v_{elec}; v_{pv}]^T$.

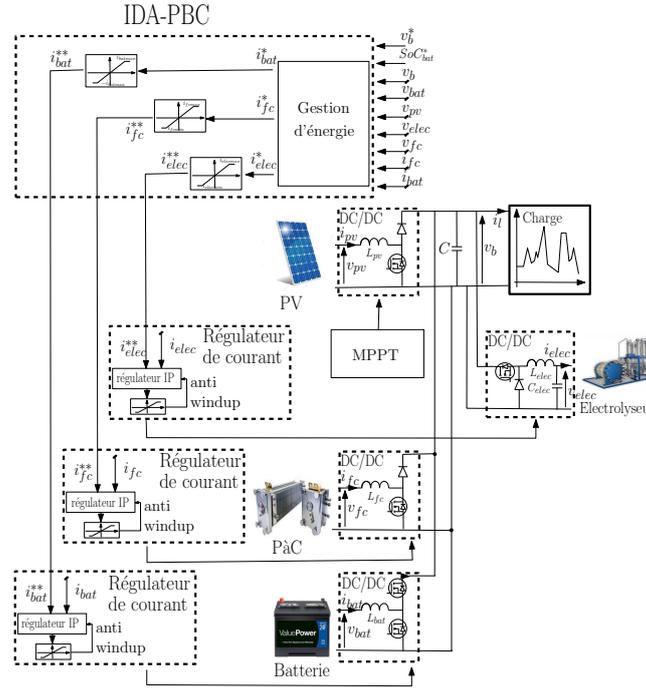


Figure 1: Structure du système et architecture de la commande

3. Méthodologie

Pour le système étudié, le but de la commande est d'affecter l'état x_r au point d'équilibre souhaité x_r^* , afin d'obtenir les tensions souhaitées du bus v_b^* et de la batterie v_1^* .

$$x_r = [x_1; x_2]^T = [v_b; v_1]^T \quad (9)$$

$$x_r^* = [v_b^*; v_1^*] \quad (10)$$

avec $v_1^*(t) = E_0(SoC(t)) - v_{bat}^* - R_0 i_{bat}(t)$ selon le modèle de la batterie [16].

Pour ce faire, nous utilisons la méthode de conception IDA-PBC afin de construire le contrôleur. L'objectif d'IDA-PBC est de trouver une commande $u(x) = \theta(x)$ pour un système port-Hamiltonien (PCH) en boucle fermée avec interconnexion et dissipation, de la forme :

$$\dot{x} = [J_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla \mathcal{H}_d \quad (11)$$

où $\mathcal{H}_d(x)$ est la fonction d'énergie naturelle du système, $J_d(x)$ est une matrice asymétrique de dimension $n \times n$ qui représente les interconnexions entre les états, $\mathcal{R}_d(x)$ est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

Selon [6], le système est asymptotiquement stable si :

- x^* est un minimum isolé de $\mathcal{H}_d(x)$;
- le plus grand ensemble invariant sous la dynamique en boucle fermée (équ. 11) contenu dans $\{x \in \mathbb{R}^n \mid [\nabla \mathcal{H}_d]^T \mathcal{R}_d(x) \nabla \mathcal{H}_d = 0\}$ équivaut à x^* .

Avec équ. 11, on a :

$$\dot{\mathcal{H}}_d = -[\nabla \mathcal{H}_d]^T \mathcal{R}_d(x) \nabla \mathcal{H}_d \leq 0$$

Par conséquent, $\mathcal{H}_d(x)$ est une fonction de Lyapunov et le système, en boucle fermée, est asymptotiquement stable.

Dans cette recherche, la fonction d'énergie \mathcal{H}_d choisie est :

$$\mathcal{H}_d = \frac{1}{2} \tilde{x}_r^T Q \tilde{x}_r \quad (12)$$

avec $\tilde{x}_r = x_r - x_r^*$ et $Q = \text{diag}(C, C_1)$.

Ensuite, le système PCH peut s'exprimer sous la forme suivante, en fonction de l'erreur et du gradient de la fonction d'énergie en boucle fermée souhaitée :

$$\dot{\tilde{x}}_r = [\mathcal{J} - \mathcal{R}]\nabla\mathcal{H}_d + A(u_r, x_r, x_r^*, z_r) \quad (13)$$

où :

$$\mathcal{J} - \mathcal{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \nabla\mathcal{H}_d = \begin{bmatrix} C \tilde{v}_b \\ C_1 \tilde{v}_1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \left[\frac{v_{fc}(t)}{v_b(t)} i_{fc}^*(t) + \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} i_{bat}^*(t) + \frac{v_{pv}(t)}{v_b(t)} i_{pv}(t) - \frac{v_{elec}(t)}{v_b(t)} i_{elec}^*(t) - i_l(t) \right] \\ -\frac{v_1(t)}{R_1 C_1} + \frac{i_{bat}^*(t)}{C_1} \end{bmatrix}$$

Afin de résoudre l'équation algébrique de $\mathcal{J}_d(x)$ et $\mathcal{R}_d(x)$ avec :

$$\mathcal{J}_d = \begin{bmatrix} 0 & J_{12} \\ -J_{12} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{R}_d = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$$

les équ. 11 et 13 doivent être égales, et la loi de commande non-linéaire est donc déterminée comme suit :

$$\delta \dot{y}(t) = -y(t) + i_l(t)/v_b(t); \quad \delta > 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_{fc}(t)}{v_b(t)} i_{fc}^*(t) - \frac{v_{elec}(t)}{v_b(t)} i_{elec}^*(t) &= y(t)v_b^* - \frac{v_{pv}(t)}{v_b(t)} i_{pv}(t) - \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} \frac{v_1(t)}{R_1} + C_1 \left(C J_{12} + \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} C_1 r_2 \right) \tilde{v}_1(t) \\ &+ C \left(\frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} C_1 J_{12} - r_1 C \right) \tilde{v}_b(t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$i_{bat}^*(t) = \frac{v_1(t)}{R_1} - C_1 (C J_{12} \tilde{v}_b(t) + r_2 C_1 \tilde{v}_1(t)) \quad (16)$$

En appliquant un estimateur d'admittance multiplié par la tension souhaitée du bus DC [6], le courant de charge i_l est remplacé par yv_b^* .

Dans ce travail, le contrôleur est déterminé avec les contraintes suivantes :

- Dans le cas d'un fonctionnement normal, le SoC de la batterie se situe dans la plage [30 % - 90 %], il n'y a pas de limitation des courants de la pile et de la batterie. **L'idée de la commande est d'utiliser la batterie pour stabiliser la tension du bus DC, sans prise en compte de l'état de charge (SOC) de la batterie pour définir la référence de courant i_{bat}^* .** Le coefficient de réglage r_2 est donc fixé à zéro. De plus, la PàC et l'électrolyseur doivent gérer le SoC de la batterie, mais ne pilotent pas directement la tension du bus. Donc nous imposons:

$$\frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} C_1 J_{12} - r_1 C = 0 \quad (17)$$

Un paramètre $\alpha = C_1 C J_{12}$ est intégré pour simplifier le réglage, donc $r_1 = \frac{v_{sc}\alpha}{v_b C^2}$, avec $\alpha > 0$.

- Considérant que la tension interne de la batterie v_1 est non mesurable, nous avons $\tilde{v}_1 = -\tilde{v}_{bat}$ selon le modèle de la batterie et v_1 est estimée en ligne via équ. 19.

Enfin, avec les contraintes ci-dessus, la loi de commande est :

$$\delta \dot{y}(t) = -y(t) + i_l(t)/v_b(t); \quad \delta > 0 \quad (18)$$

$$\dot{v}_1(t) = -\frac{v_1(t)}{R_1 C_1} + \frac{i_{bat}^*(t)}{C_1} \quad (19)$$

$$\frac{v_{fc}(t)}{v_b(t)} i_{fc}^*(t) - \frac{v_{elec}(t)}{v_b(t)} i_{elec}^*(t) = y(t)v_b^* - \frac{v_{pv}(t)}{v_b(t)} i_{pv}(t) - \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} \frac{v_1(t)}{R_1} - \alpha \tilde{v}_{bat} \quad (20)$$

$$i_{bat}^*(t) = \frac{v_1(t)}{R_1} - \alpha \tilde{v}_b(t) \quad (21)$$

Il est évident que la PàC et l'électrolyseur ne fonctionnent pas en même temps. Ainsi, ils doivent fonctionner différemment selon la production du PV et la consommation de la charge :

- Lorsque la puissance de charge est supérieure à la puissance produite par le PV ($P_l > P_{pv}$), l'électrolyseur n'est pas engagé et le contrôleur (équ. 20) est donc :

$$i_{elec}^*(t) = 0 \quad (22)$$

$$i_{fc}^*(t) = \frac{v_b(t)}{v_{fc}(t)} \left(y(t)v_b^* - \frac{v_{pv}(t)}{v_b(t)} i_{pv}(t) - \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} \frac{v_1(t)}{R_1} - \alpha \tilde{v}_{bat}(t) \right) \quad (23)$$

- Au contraire, si ($P_l < P_{pv}$), l'électrolyseur est engagé, la PàC est arrêtée. Le contrôleur (équ. 20) est donc:

$$i_{fc}^*(t) = 0 \quad (24)$$

$$i_{elec}^*(t) = -\frac{v_b(t)}{v_{elec}(t)} \left(y(t)v_b^* - \frac{v_{pv}(t)}{v_b(t)} i_{pv}(t) - \frac{v_{bat}(t)}{v_b(t)} \frac{v_1(t)}{R_1} - \alpha \tilde{v}_{bat}(t) \right) \quad (25)$$

4. Résultats de simulation

Le système a été modélisé et la simulation a été effectuée en utilisant Matlab / Simulink. La figure 2 montre la tension et le courant de chaque élément ainsi que les courbes de puissance et le SOC de la batterie. Nous supposons que le PV est toujours à son point de fonctionnement maximal, avec la variation de l'irradiance solaire $G(t)$ en entrée.

Au début de la simulation, le SoC de la batterie est au niveau de référence (soit à 80%, figure 2.g) et il n'y a aucune demande de la charge. Comme le PV produit de l'énergie, la PàC n'est pas activée et l'électrolyseur est démarré pendant les 5 premières secondes, jusqu'à ce que le courant de charge augmente.

Nous pouvons également noter que la charge fonctionne en mode générateur de 35 s à 40 s. En effet, cela peut se produire lorsque la charge est un moteur électrique. Par conséquent, la PàC est arrêtée, la batterie commence à se charger et l'électrolyseur produit de l'hydrogène.

Comme les interconnexions entre chaque élément sont prises en compte dans la loi de commande, nous pouvons noter que la PàC fournit l'énergie que le PV ne peut pas produire à l'état stable alors que la batterie répond rapidement pendant les transitoires de charge pour stabiliser la tension du bus DC (Fig. 2.a), grâce au terme $\alpha \tilde{v}_b(t)$ dans la loi de commande du courant de référence de la batterie (équ. 21). C'est la raison pour laquelle la PàC a une réponse lisse, ce qui permet de prolonger sa durée de vie. L'électrolyseur produit de l'hydrogène en utilisant l'énergie supplémentaire lorsque la PàC est arrêtée ou lorsque la batterie ne peut pas absorber de l'énergie en raison de son niveau de SoC élevé, selon l'équ. 25.

En conclusion, la tension du bus DC varie autour de sa valeur de référence et une réponse optimale assurant la stabilité du système est réalisée par le contrôleur.

5. Conclusion

Cet article a présenté un contrôleur qui permet de gérer l'énergie entre le PV, la PàC, la batterie et l'électrolyseur. Par rapport aux autres méthodes, l'avantage principal de la méthode IDA-PBC est de démontrer théoriquement la stabilité du système en boucle fermée, en permettant une réponse lisse de la PàC avec des changements rapides de la demande de charge. De plus, ce contrôleur n'a que deux paramètres à définir (α et δ), ce qui facilite la configuration. Enfin, les résultats de la simulation montrent que le contrôleur proposé dans ce travail réalise automatiquement l'intégrité et une exploitation optimale des composants en préservant la stabilité localement asymptotique de l'ensemble du système en boucle fermée.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du projet ANR DATAZERO (contrat ANR-15-CE25-0012). <https://www.irit.fr/datazero>.

Références

- [1] R. Logesh *et al.*, "Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of pv/wind hybrid system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 129–143, 2017.
- [2] A. Tofighi and M. Kalantar, "Passivity-based control of pem fuel cell/battery hybrid power source," in *Energy conversion congress and exposition (ECCE), 2011 IEEE*. IEEE, 2011, pp. 902–908.
- [3] M. Becherif, "Passivity-based control of hybrid sources: fuel cell and battery," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 12, pp. 585–590, 2006.

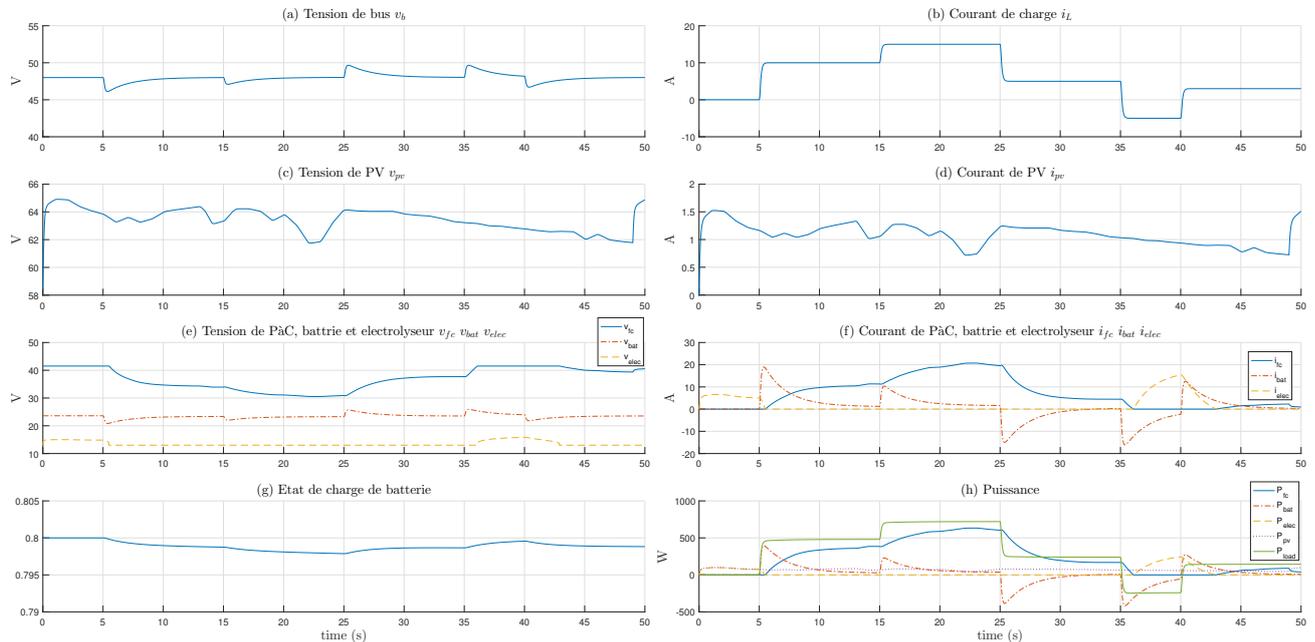


Figure 2: Résultats de simulation

- [4] J. P. Torreglosa, P. Garcia, L. M. Fernandez, and F. Jurado, "Predictive control for the energy management of a fuel-cell–battery–supercapacitor tramway," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 276–285, 2014.
- [5] R. T. Bambang, A. S. Rohman, C. J. Dronkers, R. Ortega, A. Sasongko *et al.*, "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources using model predictive control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1992–2002, 2014.
- [6] M. Hilairret, M. Ghanes, O. Béthoux, V. Tanasa, J.-P. Barbot, and D. Normand-Cyrot, "A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system," *Control engineering practice*, vol. 21, no. 8, pp. 1097–1109, Aug. 2013, Control Engineering Practice best application paper prize for years 2011 to 2013.
- [7] S. Kong, M. Hilairret, and R. Roche, "Advanced passivity-based control for a fuel cell/super-capacitor hybrid power system," in *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [8] M. Mohammadi, O. Kraa, M. Becherif, A. Aboubou, M. Ayad, and M. Bahri, "Fuzzy logic and passivity-based controller applied to electric vehicle using fuel cell and supercapacitors hybrid source," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 619–626, 2014.
- [9] P. Thounthong, P. Tricoli, and B. Davat, "Performance investigation of linear and nonlinear controls for a fuel cell/supercapacitor hybrid power plant," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 454–464, 2014.
- [10] H. El Fadil, F. Giri, J. M. Guerrero, and A. Tahri, "Modeling and nonlinear control of a fuel cell/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 7, pp. 3011–3018, 2014.
- [11] G. T. Samson, T. M. Undeland, O. Ulleberg, and P. J. Vie, "Optimal load sharing strategy in a hybrid power system based on pv/fuel cell/battery/supercapacitor," in *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 141–146.
- [12] B. Amrouche, T. O. Cherif, M. Ghanes, and K. Iffouzar, "A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system used in hybrid electric vehicle propelled by two seven phase induction motor," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
- [13] S. Mane, F. Kazi, and N. Singh, "Fuel cell and ultra-capacitor based hybrid energy control using ida-pbc methodology," in *Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 879–884.
- [14] F. Yang, B. Sheng, and Y. Fu, "Energy management for fuel cell-supercapacitor hybrid system using passivity-based controller with multi-equilibrium states," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2015, pp. 000 511–000 516.
- [15] H. Peng and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems," *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 126, pp. 14–25, 2004.
- [16] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach," *Energies*, vol. 4, no. 4, pp. 582–598, 2011.
- [17] P. Saenger, M.-C. Pera, F. Gustin, R. Couturier, and K. Deschinkel, "Emulation of the Operation of a Lithium-Ion Batteries Pack in Healthy and Faulty Condition," *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2017.
- [18] M. Chandesaris, V. Médeau, N. Guillet, S. Chelghoum, D. Thoby, and F. Fouda-Onana, "Membrane degradation in pem water electrolyzer: Numerical modeling and experimental evidence of the influence of temperature and current density," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 1353–1366, 2015.



Oléron – 11-14 juin 2019

- [19] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, Y.-J. Su *et al.*, “Development of generalized photovoltaic model using matlab/simulink,” in *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science*, vol. 2008. San Francisco, USA, 2008, pp. 1–6.