Contrôle optimal de la source hybride basé sur la combinaison entre la PBC et HJB

Amel BENMOUNA[1,2], Mohamed BECHERIF[1,2], Loïc BOULON[3], Daniel DEPERNET[1,2]

[1]FCLab, FR CNRS 3539, Femto-ST, UMR CNRS 6174, Bourgogne Franche-Comte University/UTBM, Belfort Cedex, France

[2]FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS Rue Ernest Thierry Mieg, F-90010 Belfort, France

[3]Université du Québec à Trois-Rivières, Hydrogen Research Institute, Trois-Rivières, Canada

Outline

- Introduction
- Modélisation du système global PàC/SC
- Interconnection and Damping Assignment-Passivity Based Control (IDA-PBC)
- Fonction coût en utilisant la méthode HJB
- Test experimental
- Résultats expérimentaux
- Conclusion

Introduction

Gestion d'énergie d'un système hybride

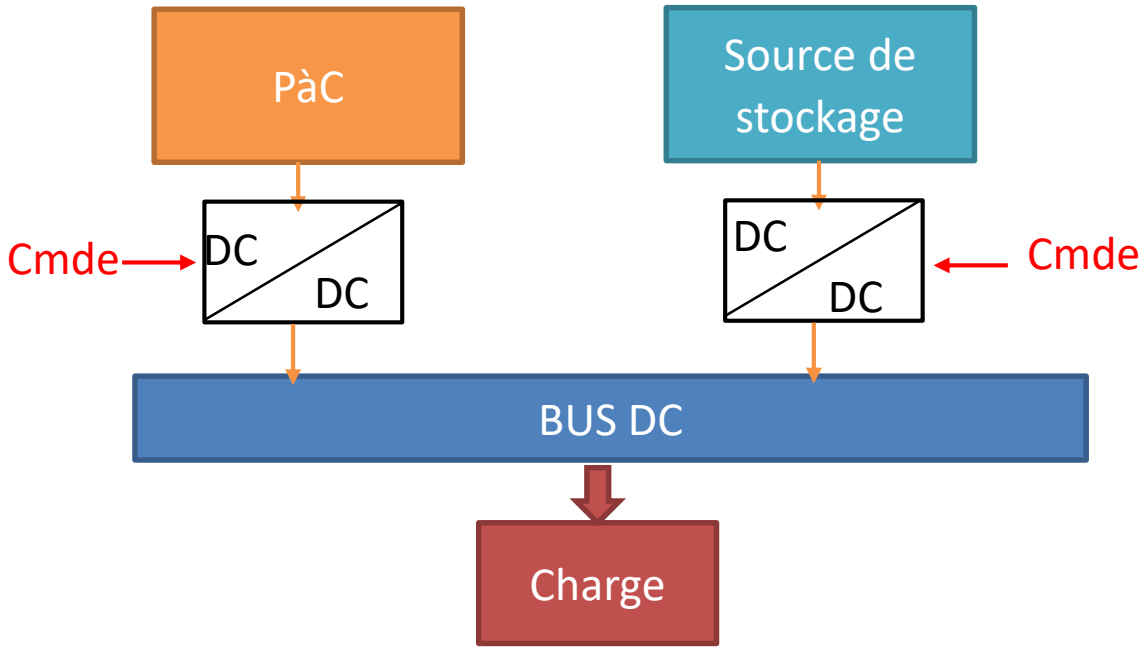
- Réduire la consommation du système
- Augmenter la durée de vie des sources
- Assurer la demande en énergie

Composition de la chaine énergétique

Contrôle basé sur la passivité

+

Méthode d'Hamilton Jacobi Bellman

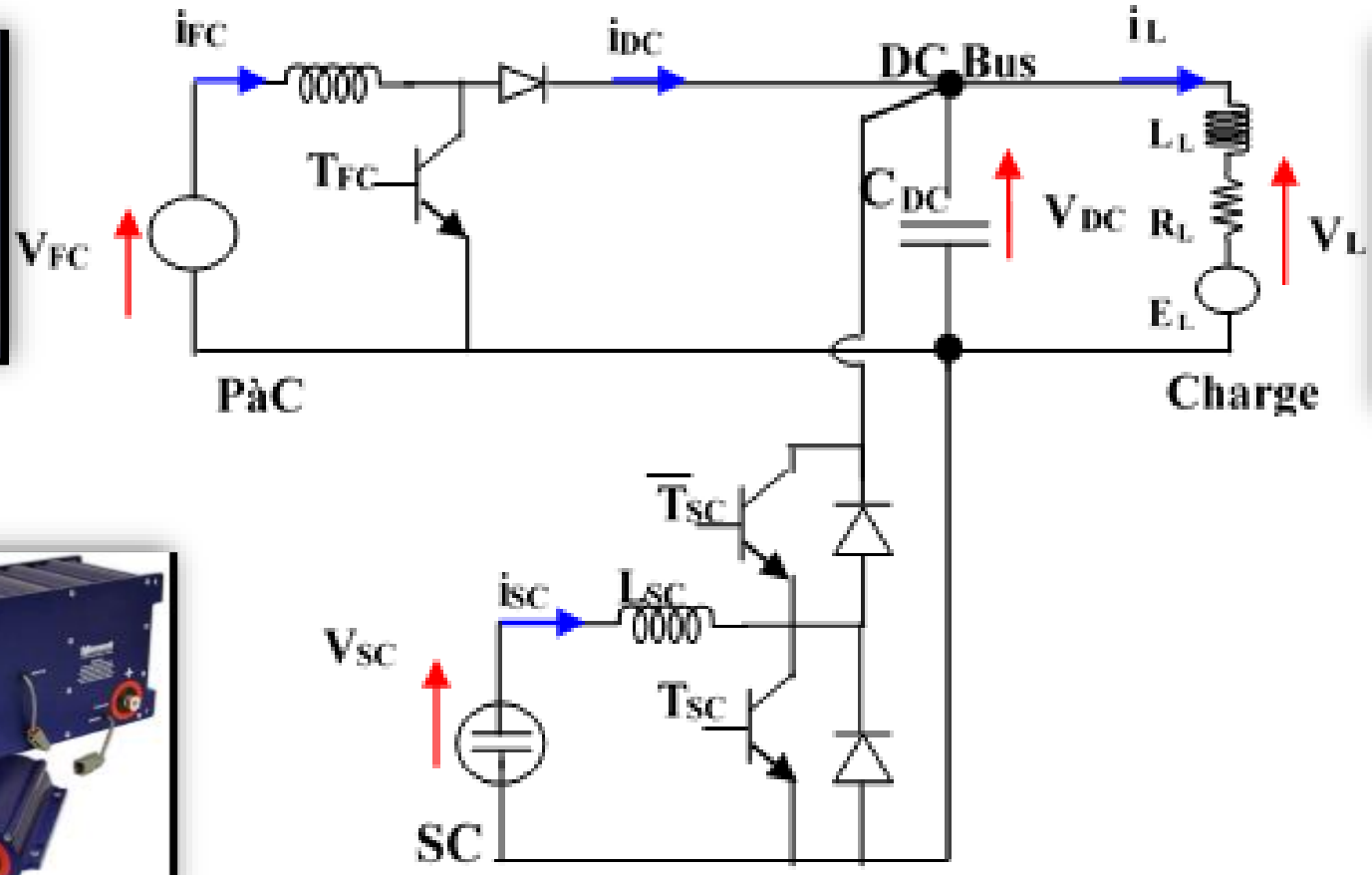


Introduction

Objectives :

- Contrôle de la tension du bus DC
- Augmenter la durée de vie de la PàC
- Demande en énergie dans les phases de transition est fournie par le SC
- Limitations des sources embarquées

Modélisation du système global PàC/SC



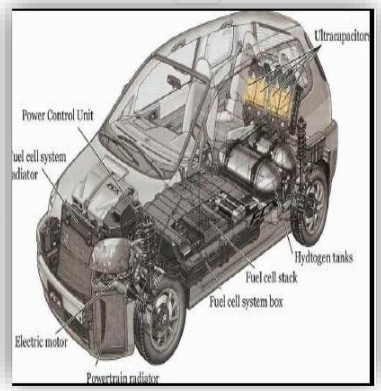


Fig.: Structure de la source PàC/SC

Modélisation du système global PàC/SC

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_{SC}, V_{SC}, i_L]^T$$

$$u_i = [1 - \mu_{FC}, 1 - \mu_{SC}]^T$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dfrac{1}{L_{FC}}\left[V_{FC} - (1 - \mu_{FC})x_2\right] \\ \dot{x}_2 = \dfrac{1}{C_{DC}}\left[(1 - \mu_{FC})x_1 - x_5 + (1 - \mu_{SC})x_3\right] \\ \dot{x}_3 = \dfrac{1}{L_{SC}}\left[x_4 - (1 - \mu_{SC})x_2\right] \\ \dot{x}_4 = -\dfrac{1}{C_{SC}}x_3 \\ \dot{x}_5 = \dfrac{1}{L_L}\left[x_2 - R_L x_5 - E_L\right] \end{cases}$$

Interconnection and Damping Assignment-Passivity Based Control (IDA-PBC)

Passive: l'énergie stockée dans un intervalle de temps n'est jamais supérieure à l'énergie fournie pendant cette période.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \qquad x \in R^n \quad ; u \in R^m$$

$$y = h(x) \qquad y \in R^m$$

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

→ Stabilité au sens de Lyapunov

Conception PBC

→ Fonction d'énergie = Equilibre désiré

→ Ajout d'amortissement et d'interconnexion

Interconnection and Damping Assignment-Passivity Based Control (IDA-PBC)

$$\dot{x} = f(x) + g(x)\,u \quad \xrightarrow{\text{PCH}} \quad \dot{x} = [J(x) - R(x)]\nabla H(x) + g(x)u$$

$$J^T(x) = -J(x) \quad , \qquad R(x) = R^T(x) \geq 0$$

Trajectoires d'équilibre:

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3\,, \bar{x}_4, \bar{x}_5\,]^T = \left[\bar{x}_1, V_d, \bar{x}_3, V_{SC}^d, \frac{V_d - E_L}{R_L}\right]^T$$

$$\bar{\mu}_1 = \frac{V_{fc}}{\bar{x}_2} \quad ; \qquad \bar{\mu}_2 = \frac{V_{SC}^d}{\bar{x}_2}$$

Fonction d'énergie désirée du système est : $H_d = \frac{1}{2}\tilde{x}^T Q \tilde{x}$ $\qquad \tilde{x} = x - \bar{x}$

Interconnection and Damping Assignment-Passivity Based Control (IDA-PBC)

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1\tilde{x}_2 + V_{FC} - \mu_1\bar{x}_2]$$

$$\dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{C_{DC}}[\mu_1\tilde{x}_1 + \mu_2\tilde{x}_3 - \tilde{x}_5 + \mu_1\bar{x}_1 - \bar{x}_5 + \mu_2\bar{x}_3]$$

$$\dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2\tilde{x}_2 + \tilde{x}_4 - \bar{x}_4 - \mu_2\bar{x}_2]$$

$$\dot{\tilde{x}}_4 = -\frac{1}{C_{SC}}[\tilde{x}_3 - \bar{x}_3]$$

$$\dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{L_L}[\tilde{x}_2 - R_L\tilde{x}_5 + \bar{x}_2 - R_L\bar{x}_5 - E_L]$$

Interconnection and Damping Assignment-Passivity Based Control (IDA-PBC)

PCH representation of new system is: $\dot{\tilde{x}} = [J - R]\nabla H_d + \xi$

$$[J-R] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\mu_1}{C_{DC}L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{C_{DC}L_{FC}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & \frac{-1}{C_{DC}L_L} \\ 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{DC}L_{SC}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{DC}L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad \nabla H_d \begin{bmatrix} L_{FC}\tilde{x}_1 \\ C_{SC}\tilde{x}_2 \\ L_{SC}\tilde{x}_3 \\ C_{CS}\tilde{x}_4 \\ L_L\tilde{x}_5 \end{bmatrix} \quad \zeta(\bar{x},\mu,\bar{\mu}) \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{FC}}(V_{FC} - \mu_1\bar{x}_2) \\ \frac{1}{C_{DC}}(\mu_1\bar{x}_1 - \bar{x}_5 + \mu_2\bar{x}_3) \\ \frac{1}{L_{SC}}(\bar{x}_4 + \mu_2\bar{x}_2) \\ \frac{-1}{C_{SC}}\bar{x}_3 \\ \frac{1}{L_L}(\bar{x}_2 - R_L\bar{x}_5 - E_L) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\tilde{x}} = [J(\mu) - R']\nabla H_d$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \mu_1 = \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = \bar{\mu}_2 - r\tilde{x}_3 \end{cases} \Rightarrow R' = diag\left\{0; 0; \frac{r}{L_{sc}^2}; 0; \frac{R_L}{L_L^2}\right\} = R'^T \geq 0$$

Fonction coût en utilisant la méthode HJB

Contrainte d'optimisation → **Méthode HJB** → **Critère d'optimisation**

$$min\, H_2 \Leftrightarrow \min P_{FC} \Leftrightarrow \min P_{FC}^2$$

Fonction coût $C = \alpha_2 P_{FC}^2 + \beta_2 P_{SC}^2$ Contrainte $f = P_{FC} + P_{SC} - P_L = 0$

Critére d'optimisation $J = \int_0^t C\, dt = \int_0^t (\alpha_2 P_{FC}^2 + \beta_2 P_{SC}^2)\, dt$

Equation d'Hamiltonien $H = C + \lambda^T f = \alpha_2 P_{FC}^2 + \beta_2 P_{SC}^2 + \lambda(P_{FC} + P_{SC} - P_L)$

Equations canonicales

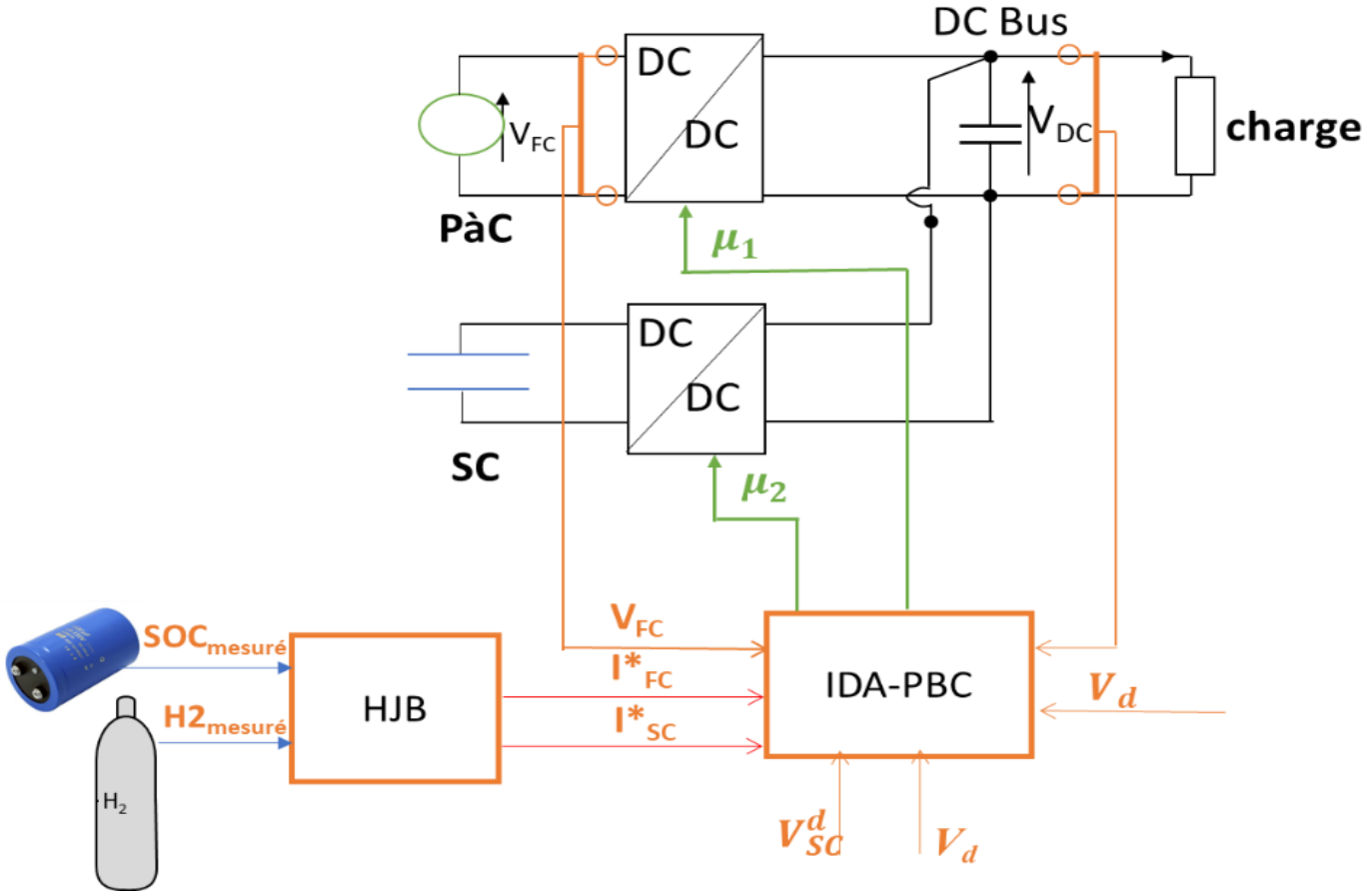
$$\begin{cases} H_{pFC} = 2\alpha_2 P_{FC}^* + \lambda = 0 \\ H_{pSC} = 2\beta_2 P_{SC}^* + \lambda = 0 \\ H_\lambda = P_{FC}^* + P_{SC}^* - P_L = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} P_{FC}^* = \dfrac{-\lambda}{2\alpha_2} \\ P_{SC}^* = \dfrac{-\lambda}{2\beta_2} \\ P_{FC}^* + P_{SC}^* = P_L \end{cases} \Leftrightarrow \lambda = -P_L \frac{2\alpha_2\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2}$$

Fonction coût en utilisant la méthode HJB

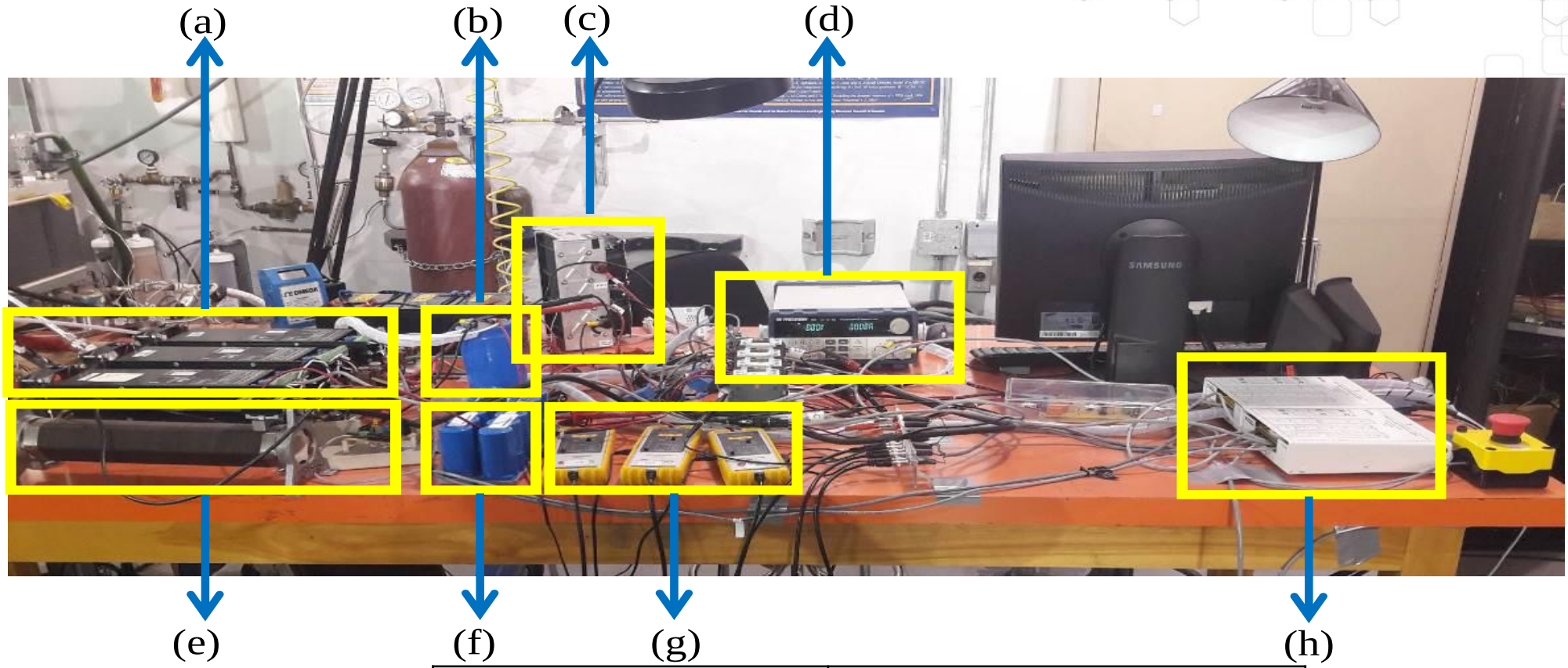
$$P_{SC}^* = V_{SC}^* \cdot I_{SC}^* \Leftrightarrow I_{SC}^* = \frac{\alpha_2}{(\alpha_2 + \beta_2)} \frac{P_L}{V_{SC}} \qquad P_{FC}^* = V_{FC}^* \cdot I_{FC}^* \Leftrightarrow I_{FC}^* = \frac{\beta_2}{(\alpha_2 + \beta_2)} \frac{P_L}{V_{FC}}$$

$$\alpha_2 * SOC_{SC} = \alpha_{SOC}$$

$$\beta_2 * Q_{H_2} = \beta_H$$

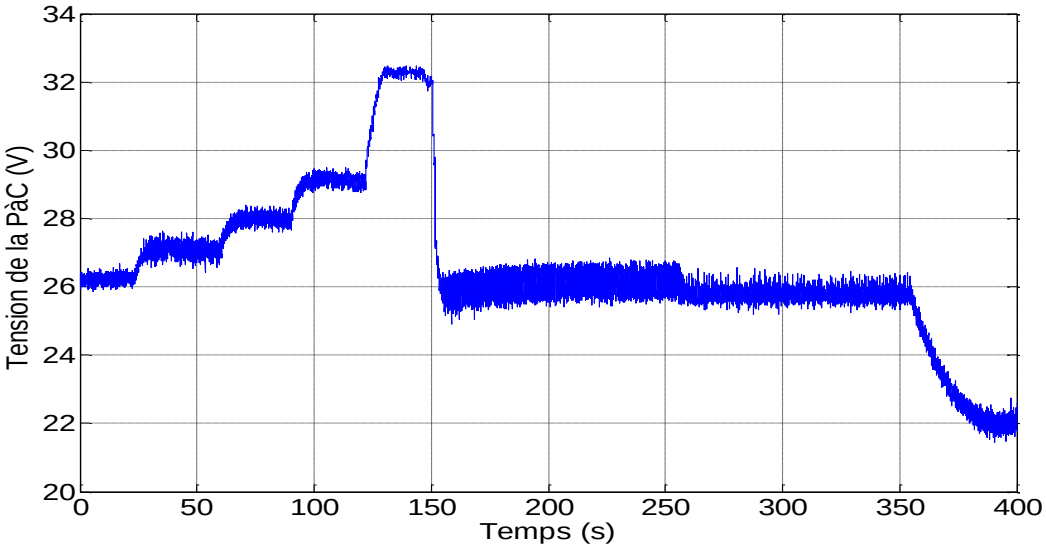


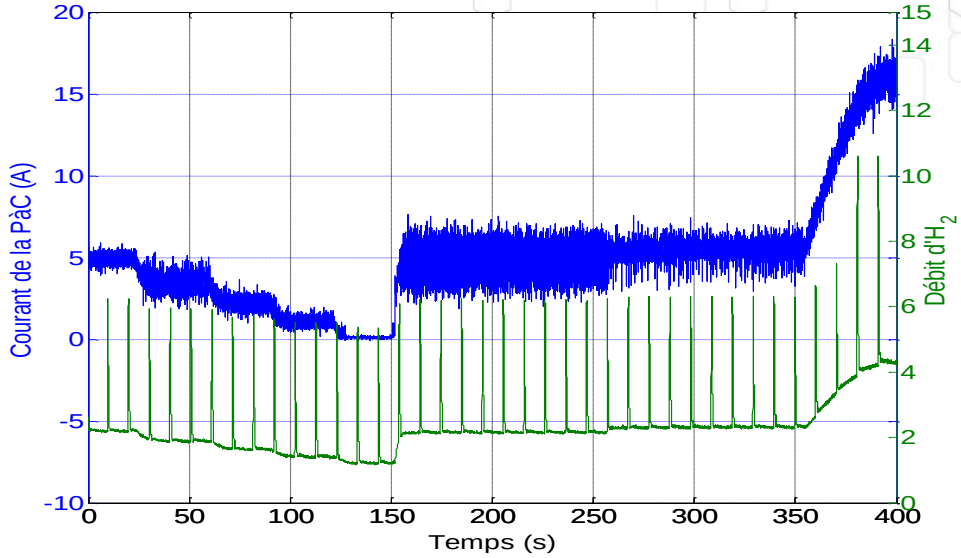
Test experimental

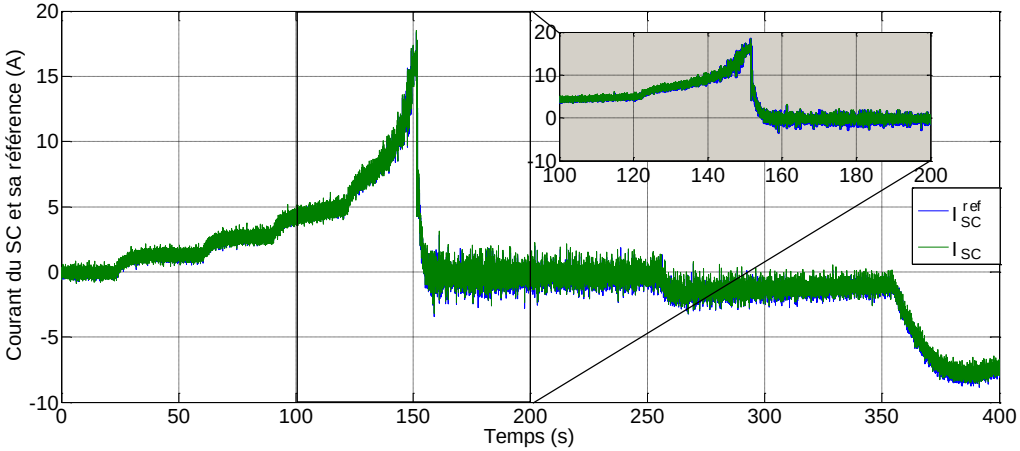


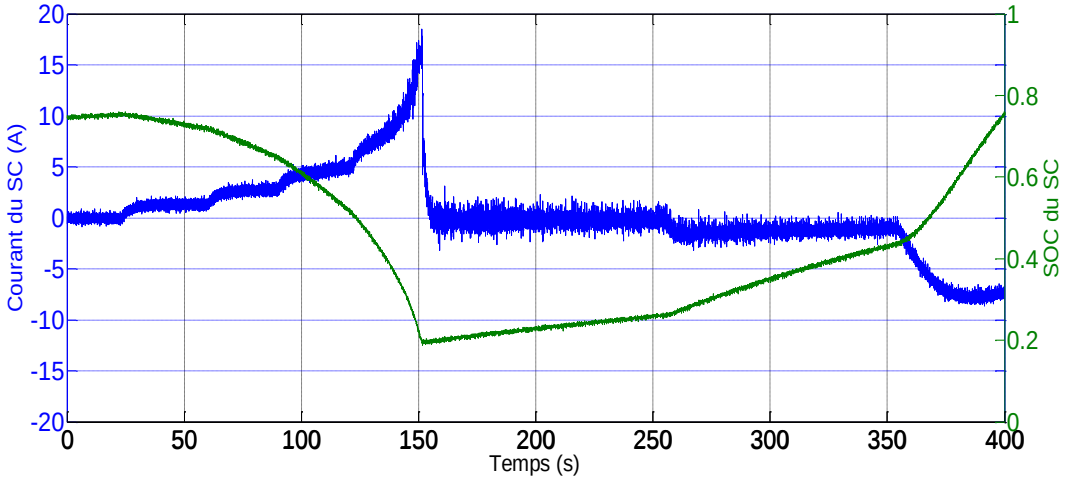
Composants du VE PàC/SC	Valeur
PàC	15-32 V / 500 W
SCs	32 V, 29 F
Capacité du Bus DC	80 V / 100 mF
Convertisseur	2 kW, contrôle en courant ou en tension
Puissance de la charge	500 W

Résultats expérimentaux



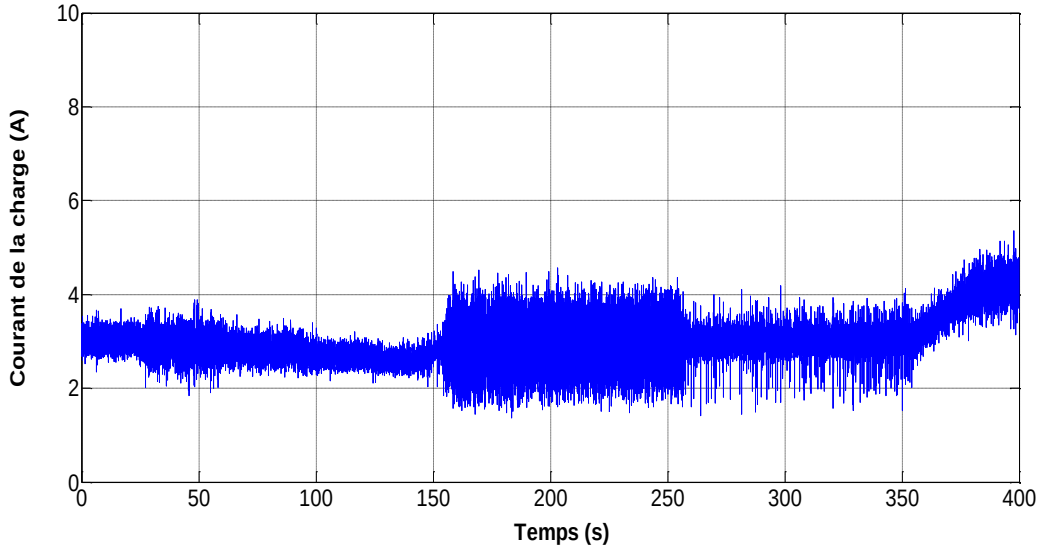


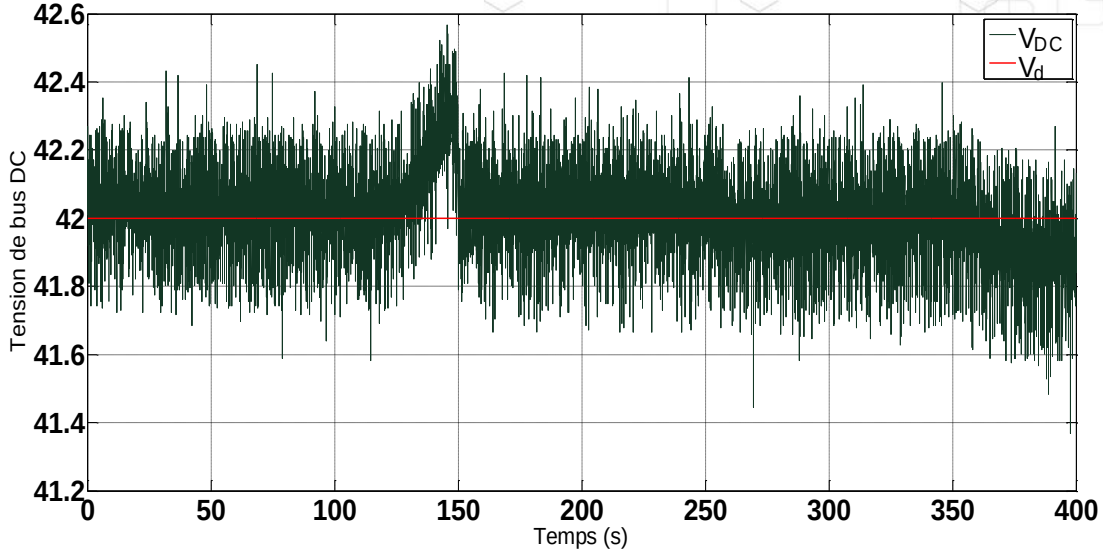


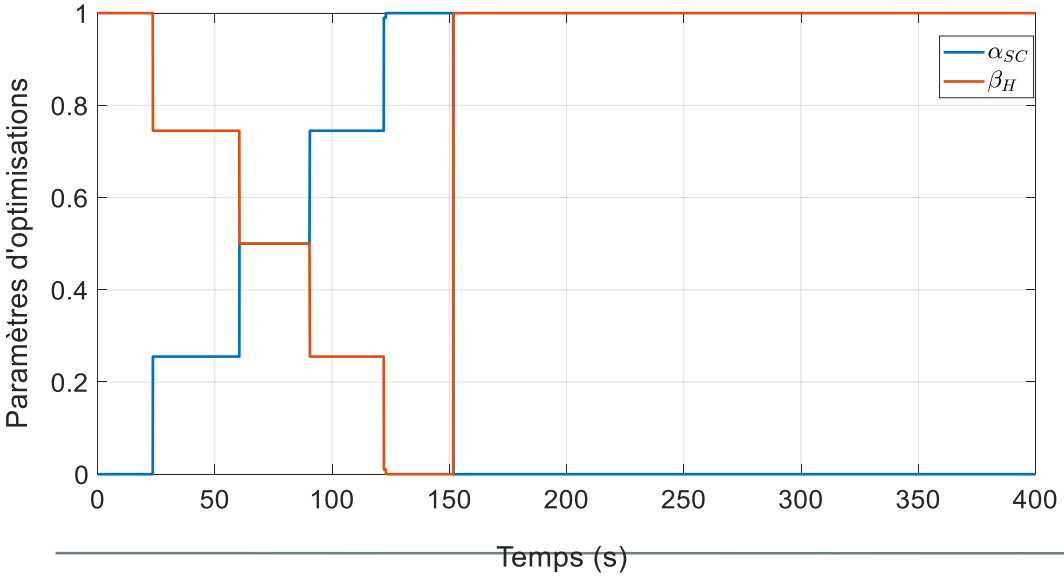


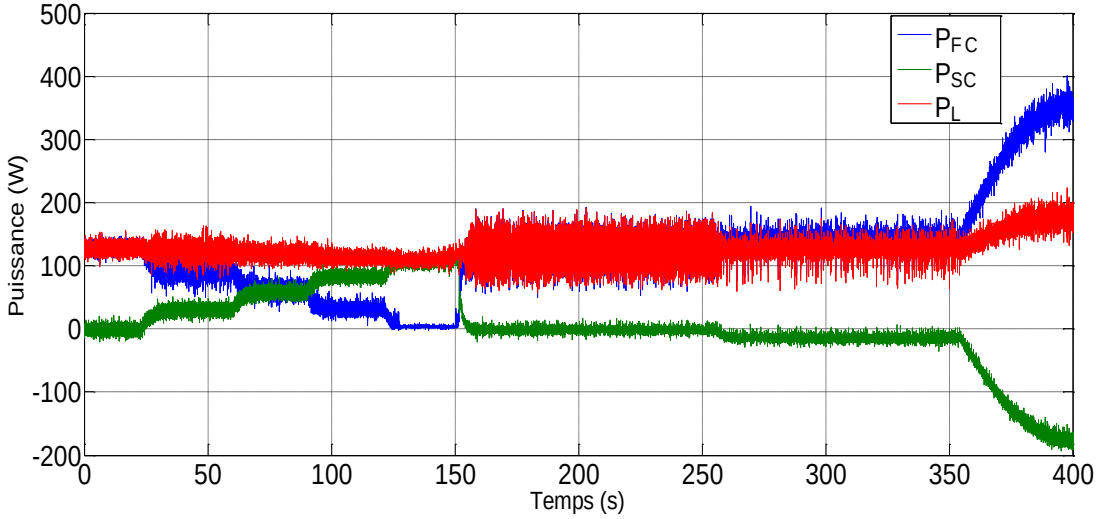
femto-st SCIENCES & TECHNOLOGIES · cnrs · utbm · FC LAB Systèmes pile à combustible

Résultats expérimentaux









femto-st SCIENCES & TECHNOLOGIES · cnrs · utbm · FC LAB Systèmes pile à combustible

Conclusion

- Etude expérimentale sur la gestion d'énergie d'un système hybride PàC/SC
- PàC est utilisée dans le régime permanente et le SC dans les phases de transition
- Méthode IDA-PBC + l'approche HJB pour prendre en compte les contraintes de limitation des sources embarquées et déterminer la répartition optimale de la puissance.
- La validation expérimentale avec prise en compte des limitations des sources montre l'efficacité et la faisabilité du contrôle proposé
- Combinaison entre les deux approches présente de bonnes performances