

Stratégie robuste de commande d'une petite éolienne sans capteur mécanique.

SAGIP - 2^{ème} congrès annuel

Adrien Prévost, Xavier BRUN, Romain DELPOUX, Vincent
LÉCHAPPÉ

Laboratoire Ampère, INSA Lyon, Villeurbanne, France

31 mai 2024

Contexte des travaux : le petit éolien

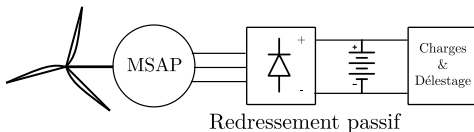


Eolienne auto-construite

Contexte des travaux : le petit éolien



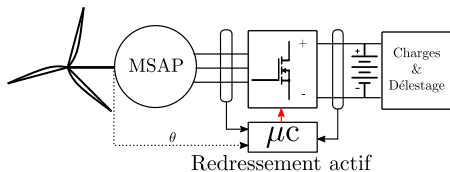
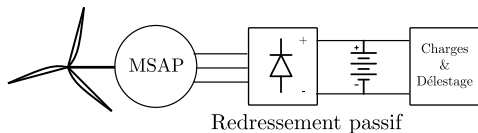
Eolienne auto-construite



Contexte des travaux : le petit éolien



Eolienne auto-construite



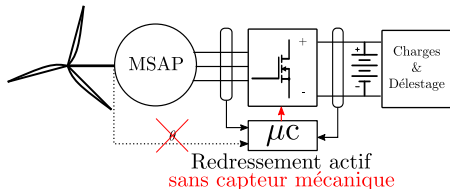
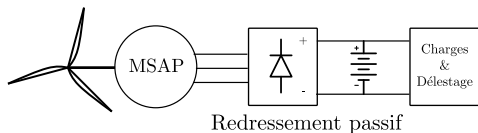
Gain important de production d'énergie avec le redressement actif¹

¹ [Adrien Prévost et al.](#) “Experimental Comparison of Passive and Synchronous Rectification on a Locally Manufactured Small Wind Turbine”. In: *2023 6th International Conference on Renewable Energy for Developing Countries (REDEC)*. Zouk Mosbeh, Lebanon: IEEE, July 5, 2023, pp. 84–89.

Contexte des travaux : le petit éolien



Eolienne auto-construite



Gain important de production d'énergie avec le redressement actif¹

¹Prévost et al., "Experimental Comparison of Passive and Synchronous Rectification on a Locally Manufactured Small Wind Turbine".

Constats

- Besoin d'un observateur basé sur le modèle de la génératrice (GSAP avec aimants montés en surface)
- Eolien auto-construit \rightarrow incertitudes sur les paramètres électriques (R_s, L_s, Φ_f)

En conséquence, des erreurs d'observation sont possibles.

Problématiques

- Peut-on quantifier ces erreurs d'observations ?
- Comment influencent-elles la performance du système ?

Objectifs

- Proposer une synthèse d'observateur prenant en compte les incertitudes paramétriques
- Modéliser l'erreur d'observation et son impact sur l'équilibre du système

Constats

- Besoin d'un observateur basé sur le modèle de la génératrice (GSAP avec aimants montés en surface)
- Eolien auto-construit \rightarrow incertitudes sur les paramètres électriques (R_s, L_s, Φ_f)

En conséquence, des erreurs d'observation sont possibles.

Problématiques

- Peut-on quantifier ces erreurs d'observations ?
- Comment influencent-elles la performance du système ?

Objectifs

- Proposer une synthèse d'observateur prenant en compte les incertitudes paramétriques
- Modéliser l'erreur d'observation et son impact sur l'équilibre du système

Constats

- Besoin d'un observateur basé sur le modèle de la génératrice (GSAP avec aimants montés en surface)
- Eolien auto-construit \rightarrow incertitudes sur les paramètres électriques (R_s, L_s, Φ_f)

En conséquence, des erreurs d'observation sont possibles.

Problématiques

- Peut-on quantifier ces erreurs d'observations ?
- Comment influencent-elles la performance du système ?

Objectifs

- Proposer une synthèse d'observateur prenant en compte les incertitudes paramétriques
- Modéliser l'erreur d'observation et son impact sur l'équilibre du système

Modélisation et loi de commande

Synthèse de l'observateur

Analyse de sensibilité

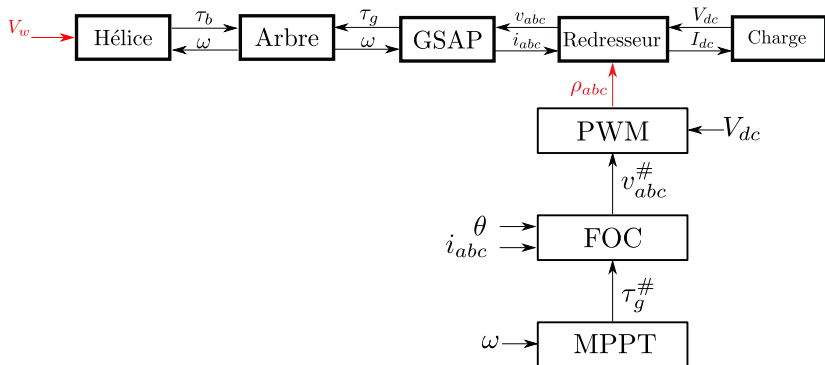
Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

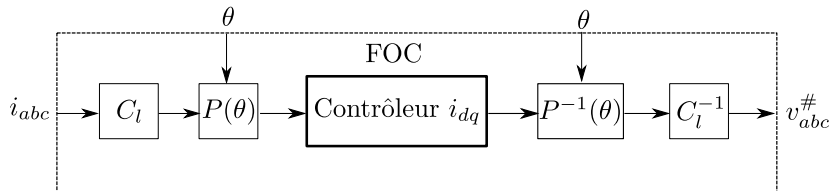
Modélisation et commande originale



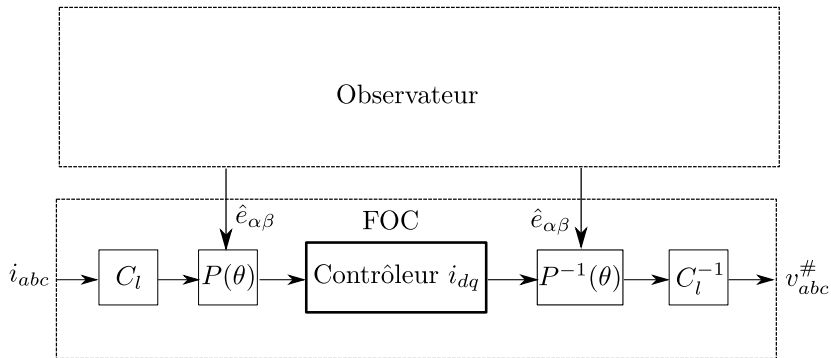
Modélisation et commande originale



Intégration de l'observateur à la commande



Intégration de l'observateur à la commande



Modélisation et loi de commande

Synthèse de l'observateur

Analyse de sensibilité

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Objectif d'observation

Dynamiques électriques dans le repère $\alpha - \beta$

$$\frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L_s}v_{\alpha\beta} - \frac{1}{L_s}e_{\alpha\beta} - \frac{R_s}{L_s}i_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

avec $e_{\alpha\beta}$ les tensions induites telles que

$$e_{\alpha\beta} = -p\Phi_f\omega \begin{bmatrix} \sin(p\theta) \\ -\cos(p\theta) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Reconstruction de la transformée de Park

$$\mathcal{P}_{eq} = \frac{1}{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}} \begin{bmatrix} \hat{e}_\beta & -\hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\alpha & \hat{e}_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

avec $\hat{e}_{\alpha\beta}$ les estimations des FEMs.

Objectif: observer $e_{\alpha\beta}$ pour reconstruire la transformée de Park.

Observateur de courants en présence d'incertitudes paramétriques

Définition de l'observateur par mode glissant^a

^aVadim Utkin, Juergen Guldner, and Jingxin Shi. *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 503 pp.

$$\frac{d\hat{i}_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L_o}v_{\alpha\beta} - \frac{R_o}{L_o}\hat{i}_{\alpha\beta} - \frac{l_1}{L_o}\text{sign}(\hat{i}_{\alpha\beta} - i_{\alpha\beta}) \quad (4)$$

avec $\hat{i}_{\alpha}, \hat{i}_{\beta}$ les courants estimés, l_1 le gain de mode glissant, R_o et L_o les paramètres électriques fournis à l'observateur.

Définition des incertitudes

$$\begin{aligned} R_o &= R_s + \delta_R, \\ L_o &= L_s + \delta_L, \end{aligned} \quad (5)$$

avec δ_R, δ_L les incertitudes sur la résistance et l'inductance respectivement.

Observateur de courants en présence d'incertitudes paramétriques

Définition de l'observateur par mode glissant^a

^aUtkin, Guldner, and Shi, *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*.

$$\frac{d\hat{i}_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L_o}v_{\alpha\beta} - \frac{R_o}{L_o}\hat{i}_{\alpha\beta} - \frac{l_1}{L_o}\text{sign}(\hat{i}_{\alpha\beta} - i_{\alpha\beta}) \quad (4)$$

avec $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ les courants estimés, l_1 le gain de mode glissant, R_o et L_o les paramètres électriques fournis à l'observateur.

Définition des incertitudes

$$\begin{aligned} R_o &= R_s + \delta_R, \\ L_o &= L_s + \delta_L, \end{aligned} \quad (5)$$

avec δ_R, δ_L les incertitudes sur la résistance et l'inductance respectivement.

Condition pour le mode glissant

Dynamique de la surface de glissement $s_{\alpha\beta} = \hat{i}_{\alpha\beta} - i_{\alpha\beta}$

$$\frac{ds_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L_s} e_{\alpha\beta} + \frac{1}{L_o} \Pi_{\alpha\beta} - \frac{R_o}{L_o} s_{\alpha\beta} - \frac{l_1}{L_o} \text{sign}(\bar{s}_{\alpha\beta}). \quad (6)$$

Déclenchement du mode glissant

Lorsque $\Pi_{\alpha\beta} \neq 0$, la condition $s_{\alpha\beta} \dot{s}_{\alpha\beta} < 0$ nécessaire au mode glissant implique que

$$l_1 > \max \left(\left| \frac{L_o}{L_s} e_\alpha + \Pi_\alpha \right|, \left| \frac{L_o}{L_s} e_\beta + \Pi_\beta \right| \right). \quad (7)$$

Condition pour le mode glissant

Dynamique de la surface de glissement $s_{\alpha\beta} = \hat{i}_{\alpha\beta} - i_{\alpha\beta}$

$$\frac{ds_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L_s} e_{\alpha\beta} + \frac{1}{L_o} \Pi_{\alpha\beta} - \frac{R_o}{L_o} s_{\alpha\beta} - \frac{l_1}{L_o} \text{sign}(\bar{s}_{\alpha\beta}). \quad (6)$$

Déclenchement du mode glissant

Lorsque $\Pi_{\alpha\beta} \neq 0$, la condition $s_{\alpha\beta} \dot{s}_{\alpha\beta} < 0$ nécessaire au mode glissant implique que

$$l_1 > \max \left(\left| \frac{L_o}{L_s} e_\alpha + \Pi_\alpha \right|, \left| \frac{L_o}{L_s} e_\beta + \Pi_\beta \right| \right). \quad (7)$$

Modélisation et loi de commande

Synthèse de l'observateur

Analyse de sensibilité

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Sortie de l'observateur de courants

$$z_{\alpha\beta} = l_1 \text{sign}(\bar{s}_{\alpha\beta}) = \frac{L_o}{L_s} e_{\alpha\beta} + \Pi_{\alpha\beta} + \Pi_{HF}. \quad (8)$$

avec Π_{HF} la perturbation haute fréquence due à la commutation (chattering).

Un observateur filtrant² est utilisé pour rejeter le terme Π_{HF} .

Expression des FEMs observées

$$\hat{e}_{\alpha\beta} = \frac{L_o}{L_s} e_{\alpha\beta} + \Pi_{\alpha\beta} = \sqrt{a^2 + b^2} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_e + \varphi) \\ \cos(\theta_e + \varphi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

avec l'angle φ donné par

$$\varphi(\underline{i}_{dq}, \delta_R, \delta_L, \omega) = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{b}{-a}\right) & \text{si } a > 0, \\ -\arctan\left(\frac{a}{-b}\right) + \pi & \text{sinon} \end{cases} \quad (10)$$

Sortie de l'observateur de courants

$$z_{\alpha\beta} = l_1 \text{sign}(\bar{s}_{\alpha\beta}) = \frac{L_o}{L_s} e_{\alpha\beta} + \Pi_{\alpha\beta} + \Pi_{HF}. \quad (8)$$

avec Π_{HF} la perturbation haute fréquence due à la commutation (chattering).

Un observateur filtrant² est utilisé pour rejeter le terme Π_{HF} .

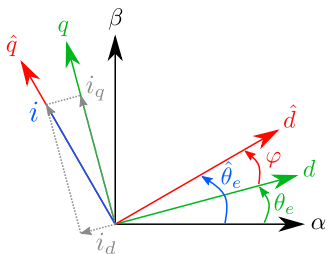
Expression des FEMs observées

$$\hat{e}_{\alpha\beta} = \frac{L_o}{L_s} e_{\alpha\beta} + \Pi_{\alpha\beta} = \sqrt{a^2 + b^2} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_e + \varphi) \\ \cos(\theta_e + \varphi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

avec l'angle φ donné par

$$\varphi(\underline{i}_{dq}, \delta_R, \delta_L, \omega) = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{b}{-a}\right) & \text{si } a > 0, \\ -\arctan\left(\frac{b}{a}\right) + \pi & \text{sinon} \end{cases} \quad (10)$$

Modélisation de l'erreur de points d'équilibre des courants



Modèle des points d'équilibre en régime permanent

$$\underline{i}_d \simeq \frac{\delta_L i_q^{\#2}}{\Phi_f}, \quad (11)$$

$$\underline{i}_q \simeq \text{sign}(i_q^{\#}) \cdot \sqrt{\frac{\Phi_f \sqrt{4 \delta_L^2 i_q^{\#2} + \Phi_f^2} - \Phi_f^2}{2 \delta_L^2}}. \quad (12)$$

Sommaire

Modélisation et loi de commande

Synthèse de l'observateur

Analyse de sensibilité

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Plateforme expérimentale

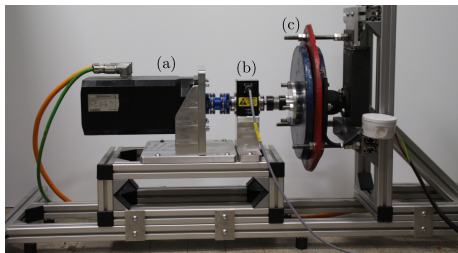


Figure: Banc d'essai : MSAP (a),
Couplemètre (b), GSAP (c)

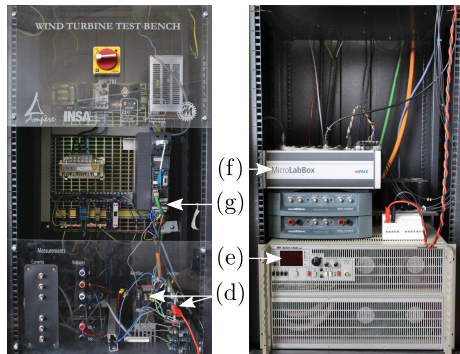


Figure: Composants de puissance et de commande : redresseur actif (d), charge active (e), Variateur (g), microLabBox (f).

Plateforme expérimentale

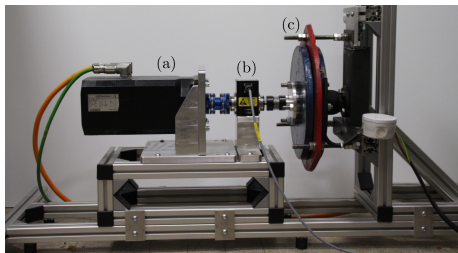


Figure: Banc d'essai : MSAP (a),
Couplemètre (b), GSAP (c)

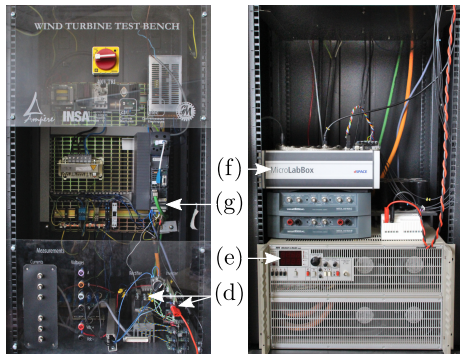


Figure: Composants de puissance et de
commande : redresseur actif (d),
charge active (e), Variateur (g),
microLabBox (f).

Performance énergétique

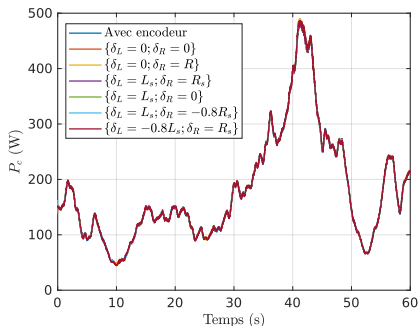


Figure: Puissance récupérée en sortie de redresseur.

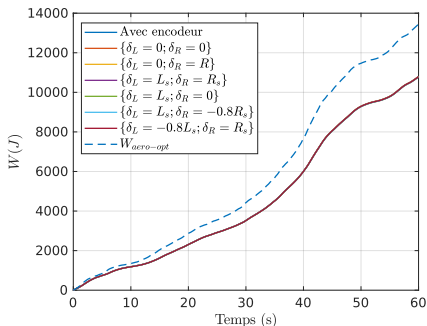


Figure: Energie récupérée en sortie de redresseur.

Performance énergétique

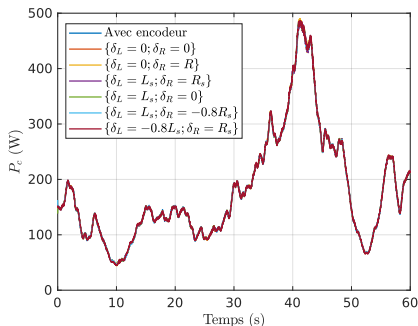


Figure: Puissance récupérée en sortie de redresseur.

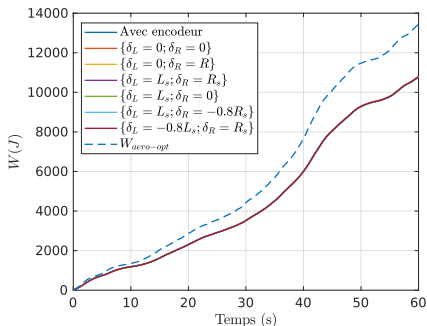


Figure: Energie récupérée en sortie de redresseur.

Erreur de points d'équilibres sur les courants

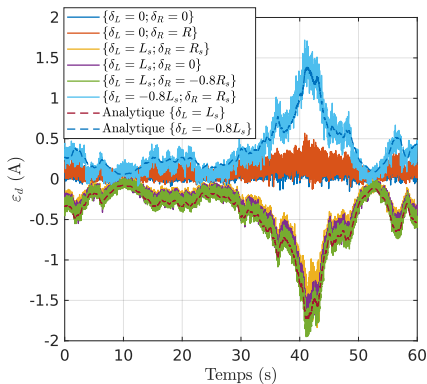


Figure: Erreur sur le courant dans l'axe direct : $\varepsilon_d = i_d - \hat{i}_d$.

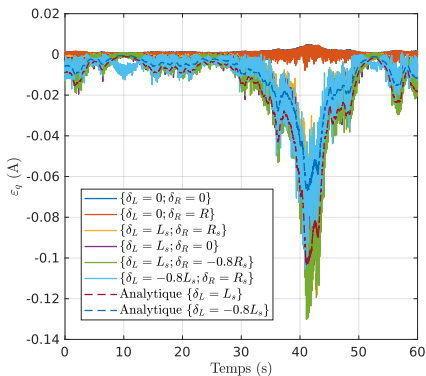


Figure: Erreur sur le courant dans l'axe q : $\varepsilon_q = i_q - \hat{i}_q$.

Erreur de points d'équilibres sur les courants

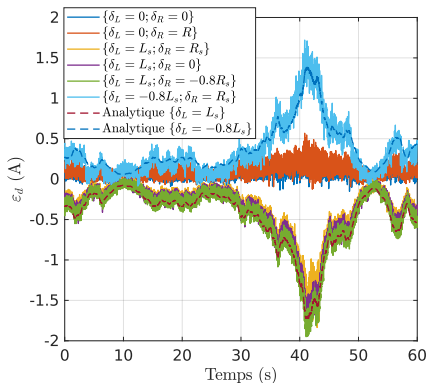


Figure: Erreur sur le courant dans l'axe direct : $\varepsilon_d = i_d - \hat{i}_d$.

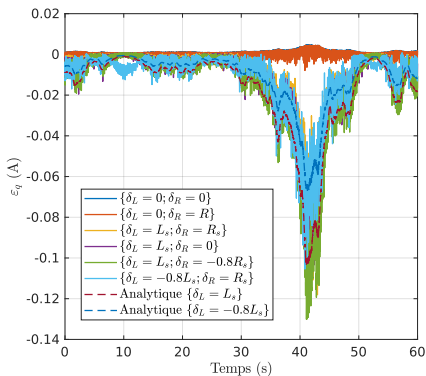


Figure: Erreur sur le courant dans l'axe q : $\varepsilon_q = i_q - \hat{i}_q$.

Modélisation et loi de commande

Synthèse de l'observateur

Analyse de sensibilité

Résultats expérimentaux

Conclusion et perspectives

Conclusions

- La stratégie est insensible aux variations sur R_s
- Performance non dégradée sur le cycle de vent turbulent malgré de fortes incertitudes sur L_s
- Le modèle d'erreur sur les points d'équilibre montre une bonne correspondance avec l'expérimentation

Perspectives

- Implémentation sur site de test
- Réaliser une méthode d'identification à l'aide du modèle sur les points d'équilibre
- Utilisation du modèle pour quantifier la dégradation de performance en lien avec les incertitudes paramétriques

Conclusion et perspectives

Conclusions

- La stratégie est insensible aux variations sur R_s
- Performance non dégradée sur le cycle de vent turbulent malgré de fortes incertitudes sur L_s
- Le modèle d'erreur sur les points d'équilibre montre une bonne correspondance avec l'expérimentation

Perspectives

- Implémentation sur site de test
- Réaliser une méthode d'identification à l'aide du modèle sur les points d'équilibre
- Utilisation du modèle pour quantifier la dégradation de performance en lien avec les incertitudes paramétriques

Questions

Merci de votre attention !

adrien.prevost@insa-lyon.fr