

III.1. Introduction :

Comme nous l'avons précédemment annoncé, ce chapitre est dédié à la commande non-linéaire de la DFIG. Dans la bibliographie du génie électrique, porte le nom de commande par mode de glissement et la commande backstepping.

Ce chapitre est composé de deux parties :

La première partie est consacrée à l'application et la modélisation et la simulation de la commande mode glissant de la MADA.

Et la deuxième partie est consacrée à l'application et la modélisation et la simulation de la commande backstepping de la MADA. Nous donnerons finalement les résultats de simulation obtenus avec ces différentes modélisations qui confirme la validation du command.

III.2. Commande par mode glissant :

III.2.1. Principe de la commande par mode de glissement :

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son Fonctionnement [52]. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant [53]. Ainsi, dans la commande des systèmes à structure variable par le mode de glissant, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée d'y rester au voisinage de cette surface (figure III-1). Cette dernière est appelée surface de glissement [54].

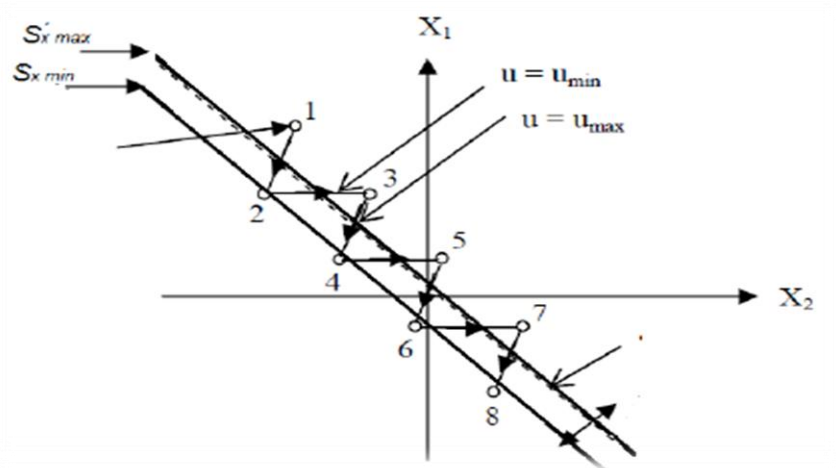


Figure III- 1 : mode de glissant réel.

III.2.2. Structure de la commande par mode de glissement :

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes principales complémentaires l'une de l'autre, définies par [52], [53],[55].

- Le choix des surfaces de glissement.
- La définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant.
- La détermination de la loi de commande.

III.2.2.1 Choix des surfaces de glissement :

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][U] \quad \text{III.1}$$

Où $[x] \in R^n$ est le vecteur d'état, $[U] \in R^m$ le vecteur de commande, avec $n > m$.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$.

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence, il faut choisir une surface de glissement. Elle est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface. Nous trouvons dans la littérature différentes formes de surface de glissement, et chaque surface présente de meilleures performances pour une application donnée [29]. Dans ce travail, nous nous intéressons à une surface non linéaire [56]

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + K \right)^{r-1} \cdot e(x) \quad \text{III.2}$$

Avec :

$$e(x) = x^n - x$$

L'objectif de la commande est de garder la surface à zéro, cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$.

III.2.2.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant :

Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence :

- **Approche directe :**

Cette approche est la plus ancienne, Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro, elle est donnée sous la forme : [57]

$$S(x). \dot{S}(x) < 0 \quad \text{III.3}$$

- **Approche indirecte :**

Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive $S(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{S}(x) < 0$.

Cette fonction de LYAPUNOV est définie comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x) \quad \text{III.4}$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x). \dot{S}(x) \quad \text{III.5}$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x). \dot{S}(x) < 0 \quad \text{III.6}$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la stabilité des systèmes non linéaires [58], [59].

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, logiquement sa dérivée et la partie discontinue le sont aussi. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente.

$$U_{eq} = - \left[\frac{ds}{dx} [B] \right]^{-1} \left\{ \frac{ds}{dx} [A] [x] \right\} \quad \text{III.7}$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que $\frac{ds}{dx} [B] \neq 0$

Durant le mode de convergence, on trouve la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$S'(x) = \frac{ds}{dx} [B] U_n \quad \text{III.8}$$

Et la condition d'attractivité $\dot{S}(x).S(x) < 0$ devient :

$$S(x) \frac{ds}{dx} [B] U_n < 0 \quad \text{III.9}$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x) \frac{ds}{dx} [B]$.

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction *Sign* (figure III-2)[60] [61].

$$U_n = K. \text{Sign } S(x)$$

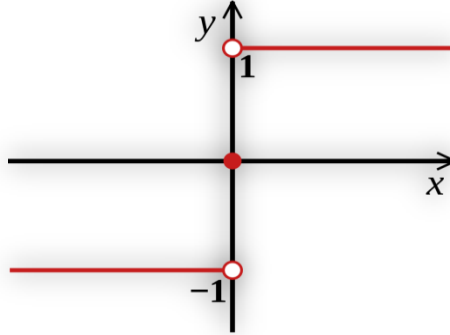


Figure III- 2:Représentation de la fonction " Signe "

III.2.3. Application de la commande à mode glissant à la DFIG :

Afin de réaliser la loi de commande nous choisissons d'orienter le flux statorique suivant l'axe *d*.

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0 \tag{III.10}$$

L'équation de flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M_{sr} i_{dr} \\ 0 = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{qr} \end{cases} \tag{III.11}$$

Les puissances active et réactive s'écrivent alors :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_q}{L_s} - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} I_{rd} \end{cases} \tag{III.12}$$

On peut écrire les courants rotoriques sous la forme :

$$\begin{cases} I_{qr} = -\frac{L_s}{V_s M_{sr}} P_s \\ I_{dr} = \frac{L_s}{V_s M_{sr}} \left(\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - Q_s \right) \end{cases} \tag{III.13}$$

A partir du chapitre trois on tire les équations suivants :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)} \left(V_{dr} - R_r I_{rd} + \omega_r \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)} \left(V_{qr} - R_r I_{qr} - \omega_r \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} \right) \end{cases} \tag{III.14}$$

III.2.3.a.Surface de régulation de la puissance active :

Pour contrôler la puissance active on prend le degré relatif $r = 1$ l'expression de la surface de contrôle de la puissance active à la forme suivante :

$$s(P) = (P_{ref} - P_s) \tag{III.15}$$

La dérivée de la surface est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}(P) = (\dot{P}_{ref} - \dot{P}_s) \\ \dot{S}(P) = \left(\dot{P}_{ref} - \dot{V}_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \right) \\ \dot{S}(P) = \left(\dot{P}_{ref} + \dot{V}_s \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right)} \left(V_{qr} - R_r I_{qr} - \omega_r \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} - \omega_r \frac{V_s M_{sr}}{\omega_s L_s} \right) \right) \end{array} \right. \tag{III.16}$$

On a:

$$\delta = \left(1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_s} \right)$$

On remplace dans l'équation précédent on aura :

$$\dot{S}(P) = \left(\left(\dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M_{sr}}{\delta L_r L_s} \right) \left(V_{qr} - R_r I_{qr} - \omega_r L_r \delta I_{dr} - \omega_r \frac{V_s M_{sr}}{\omega_s L_s} \right) \right) \tag{III.17}$$

Durant le mode de glissement et le régime et le régime permanent, on a $S(P) = 0$ et par conséquent $\dot{S}(P) = 0$ et $V_{qr}^n = 0$ on tire la formule de la commande équivalent :

$$\left\{ V_{qr-éq} = R_r L_r + \omega_r L_r \delta I_{dr} + \omega_r \frac{V_s M_{sr}}{\omega_s L_s} - P_{s-ref} \frac{\delta L_s L_r}{M_{sr} V_s} \right. \tag{III.18}$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(P) \cdot \dot{S}(P) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant

$$\dot{S}(P) = \left(\frac{V_s M_{sr}}{\delta L_s L_r} V_{qr-n} \right) \tag{III.19}$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{qr-n} = K \cdot \text{Sign}(S(P)) \tag{III.20}$$

III.2.3.b. Surface de régulation de la puissance réactive :

$$s(Q) = (Q_{ref} - Q_s) \tag{III.21}$$

La dérivée de la surface est :

$$\begin{cases} \dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_s) \\ \dot{S}(Q) = \left(\dot{Q}_{ref} - V_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{dr} \right) \\ \dot{S}(Q) = \left(\dot{Q}_{ref} - V_s \frac{M_{sr}}{L_s} (V_{rd} - R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} \delta) \right) \end{cases} \quad \text{III.22}$$

En remplaçant l'expression de V_{rd} par $V_{rd_eq} + V_{rd_n}$ la commande apparait clairement dans l'équation suivant

$$\dot{S}(Q) = \left(\dot{Q}_{ref} - V_s \frac{M_{sr}}{L_s} \left((V_{rd_eq} + V_{rd_n}) - R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} \delta \right) \right) \quad \text{III.23}$$

Durant le mode de glissement et le régime et le régime permanent, on a $S(Q) = 0$ et par conséquent $\dot{S}(Q) = 0$ et $V_{rd_n} = 0$ on tire la formule de la commande équivalent :

$$V_{rq_eq} = \left(-\dot{Q}_{s-ref} \frac{L_r \delta L_s}{V_s M_{sr}} + (R_r I_{dr} - \omega_r L_r \delta L_s) \right) \quad \text{III.24}$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(Q) \cdot \dot{S}(Q) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant on trouve :

$$\dot{S}(Q) = -\frac{V_s M_{sr}}{\delta L_r L_s} V_{rd_n} \quad \text{III.25}$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{rd_n} = K \cdot \text{Sign}(S(Q)) \quad \text{III.26}$$

Le schéma bloc de la commande par mode glissant appliquée à la GADA est illustré par la figure II-3 :

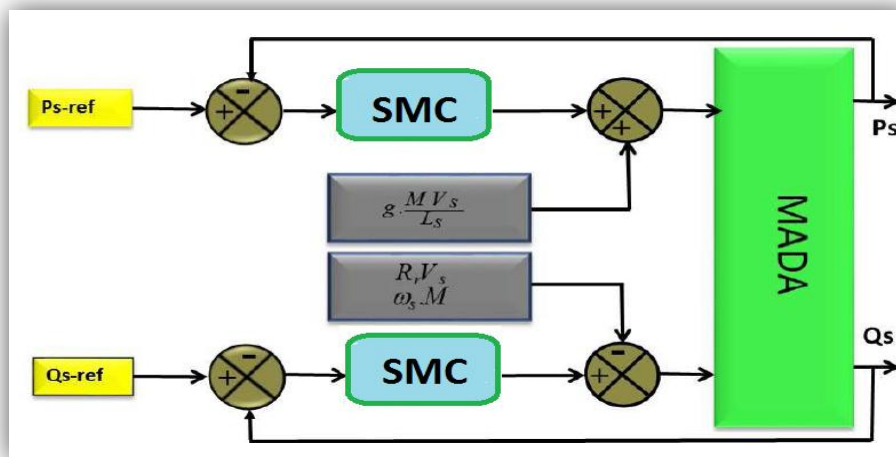


Figure III- 3 : schéma de Surface de régulation de la puissance active et réactive

III.2.4 Résultats de simulation :

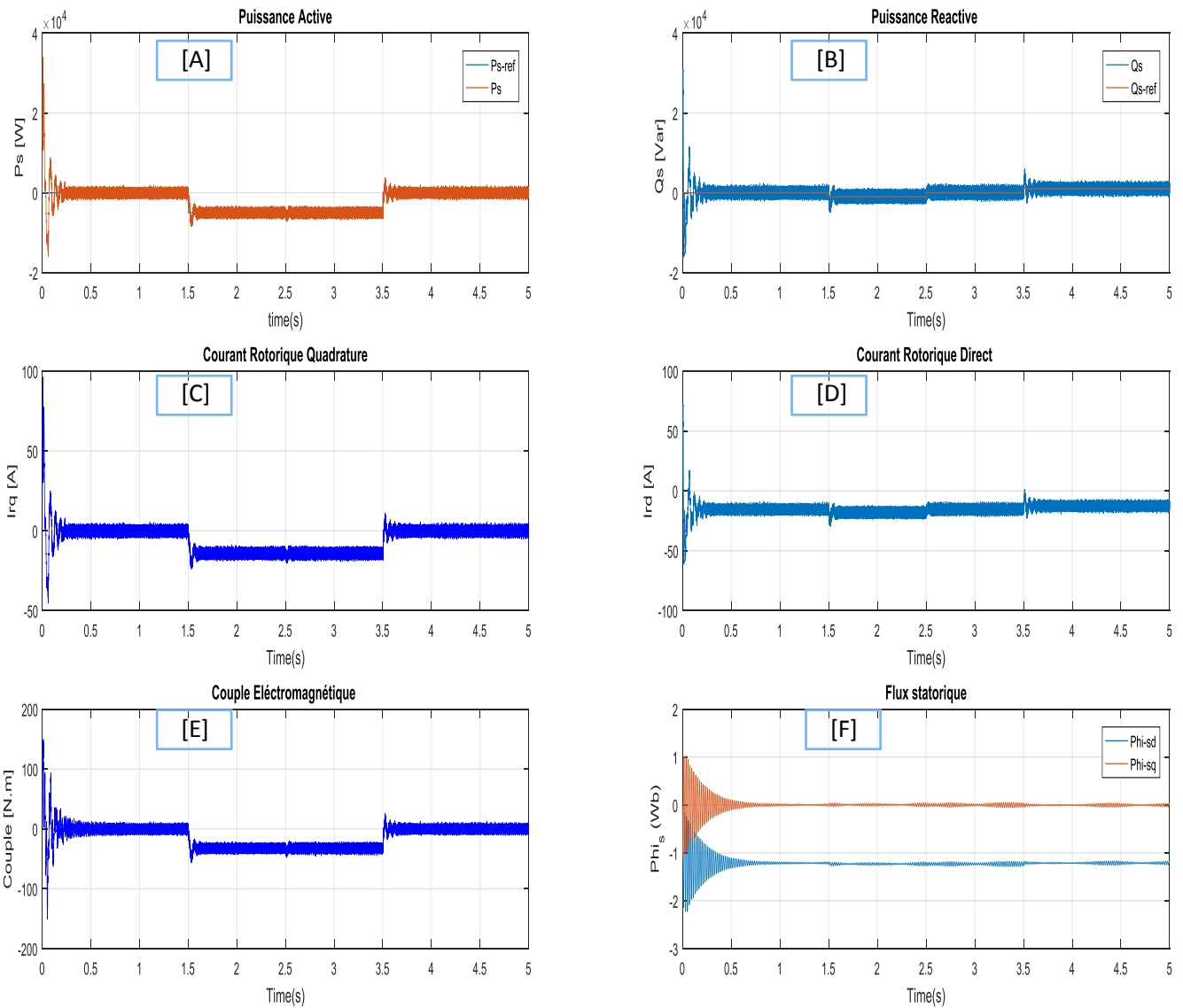


Figure III.4 : résultats de la commande vectorielle régler par la méthode Mode Glissant

III.2.5 interprétation des résultats :

Les modèles précédemment cités ont donné les résultats de simulation suivants :

Les courbes (figure III.4.A et B) les grandeurs commandées suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances active et réactive et sans erreur statique en régime permanent. Les courbes (figure III.4. C et D), présentent le courant en quadrature (I_{rq}) et le courant direct (I_{rd}) dont le premier contrôle la puissance active et le deuxième contrôle la puissance réactive. Cela est constaté lors des variations des composantes directes et en quadrature des courants rotoriques qui sont respectivement les images des puissances réactives et actives. Le couple (figure III.4.E) prend la même allure que celle de la puissance active, à cause de la variable commune entre eux (I_{rq})

III.3. Commande Backstepping :

III.3.1 Introduction :

Afin de régler les puissances active et réactive de la MADA, deux erreurs sont choisies vu la dimension du vecteur de commande définie par les tensions V_{rd} et V_{rq} . Les variables à régler sont la puissance active P_s et la puissance réactive Q_s .

III.3.2 Principe de la commande par la méthode Backstepping :

La plupart des techniques de commande non linéaire sont basées sur la théorie de la stabilité de Lyapunov. L'objectif est de trouver une loi de commande qui rend la dérivée d'une fonction de Lyapunov, choisie a priori, définie ou semi-définie négative. La principale difficulté réside alors dans le choix d'une fonction de Lyapunov convenable. La technique du backstepping surmonte cette difficulté en construisant progressivement une fonction de Lyapunov adaptée au système, et permet de déduire la commande qui rend la dérivée de cette fonction définie négative. Cette technique s'applique à la classe de système dite en strict feedback [62].

La méthode du backstepping commence en définissant une fonction d'énergie qui intègre l'écart entre les sorties régulées du système et les objectifs de commande. Le principe est alors de construire à chaque étape un écart entre l'état courant du système et une commande virtuelle qui garantirait, s'il pouvait être appliqué tel quel, la non-positivité de la dérivée de la fonction de Lyapunov. A la fin de chaque étape, la fonction d'énergie est complétée par cet écart, afin d'en assurer la convergence vers zéro. Le processus s'achève lorsque le vecteur de commande du système apparaît : la commande virtuelle défini au dernier pas est alors une commande réelle, garantissant la convergence des états du système vers zéro, et l'équilibre des sorties régulées autour des objectifs de commande. Dans cette partie nous contenterons sur l'application de la commande backstepping au GADA. Rappelons que ce modèle a été calculé par le principe d'orientation du flux statorique. [63].

III.3.3. Application du command backstepping a la DFIG :

III.3.3.1 Commande de la puissance active : [64]

L'erreur de poursuite de la puissance active est :

$$e_1 = P_{s_ref} - P_s \quad \text{III.27}$$

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V(e_1) = \frac{1}{2} \cdot e_1^2 \quad \text{III.28}$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov est :

$$\dot{V}(e_1) = e_1 \cdot \dot{e}_1 \quad \text{III.29}$$

Avec :

$$\dot{e}_1 = \dot{P}_{s_{ref}} - \dot{P}_s = \dot{P}_s + \frac{\delta L_s L_r \dot{i}_{rq}}{v_s M_{sr}} \quad \text{III.30}$$

En remplaçant l'expression de la dérivée des courants i_{qr} dans l'équation de la tension v_{qr} , on obtient :

$$\dot{e}_1 = \dot{P}_s + \frac{v_s M_{sr}}{\delta L_r L_s} \left(v_{rq} - R_r \cdot i_{qr} - \delta L_r \omega_r i_{rd} + \frac{g M_{sr} v_s}{\omega_s L_s} \right) \quad \text{III.31}$$

En remplaçant la dernière équation dans (III.29) on obtient :

$$\dot{V}(e_1) = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left(\dot{P}_{s_{ref}} + \frac{v_s M_{sr}}{\delta L_r L_s} \left(v_{rq} - R_r \cdot i_{qr} - \delta L_r \omega_r i_{rd} + \frac{g M_{sr} v_s}{\omega_s L_s} \right) \right) \quad \text{III.32}$$

On tire l'expression de la commande stabilisante backstepping comme suite :

$$v_{rq} = -\frac{\delta L_s L_r}{v_s M_{sr}} \dot{P}_{s_{ref}} + R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \delta L_r i_{rd} - g \frac{M_{sr} v_s}{\omega_s L_s} - \frac{\delta L_s L_r}{v_s M_{sr}} k_1 \cdot e_1 \quad \text{III.33}$$

Pour assurer la convergence de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}(e_1) = -k_1 \cdot e_1^2 < 0 \quad \text{III.34}$$

Avec :

k_1 : Constante positive.

III.3.3.2. Commande de la puissance réactive : [64]

L'erreur de poursuite de la puissance réactive est :

$$e_2 = Q_{s_{ref}} - Q_s \quad \text{III.35}$$

On considère la fonction de Lyapunov augmentée est donnée par l'expression suivante :

$$V(e_1, e_2) = \frac{1}{2} \cdot (e_1^2 + e_2^2) \quad \text{III.36}$$

Sa dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\dot{V}(e_1) = e_1 \cdot \dot{e}_1 \quad \text{III.37}$$

Avec :

$$\dot{V} = (e_1, e_2) = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -k_1 e_1^2 + e_1 (\dot{Q}_{s_ref} - \dot{Q}_s) \tag{III.38}$$

$$\dot{e}_2 = \dot{Q}_{s_ref} + \frac{\delta L_s L_r}{v_s M_{Sr}} \dot{i}_{rd} \tag{III.39}$$

En remplaçant l'expression de la dérivée du courants i_{dr} dans l'équation de la tension v_{dr} , on obtient :

$$\dot{e}_2 = \dot{Q}_{s_ref} + \frac{v_s M_{Sr}}{\delta L_r L_s} (v_{rd} - R_r i_{rd} + \delta L_r \omega_r i_{rq}) \tag{III.40}$$

On tire l'expression de la commande stabilisante backstepping comme suite :

$$v_{rd} = -\frac{\delta L_s L_r}{v_s M_{Sr}} \dot{Q}_{s_ref} + R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \delta L_r i_{rq} - \frac{\delta L_s L_r}{v_s M_{Sr}} k_2 \cdot e_2 \tag{III.41}$$

Pour assurer la convergence de la fonction candidate de lyapunove :

$$\dot{V}(e_1) = -k_1 \cdot e_1^2 - k_2 e_2^2 < 0 \tag{III.42}$$

Avec k_2 constante positive.

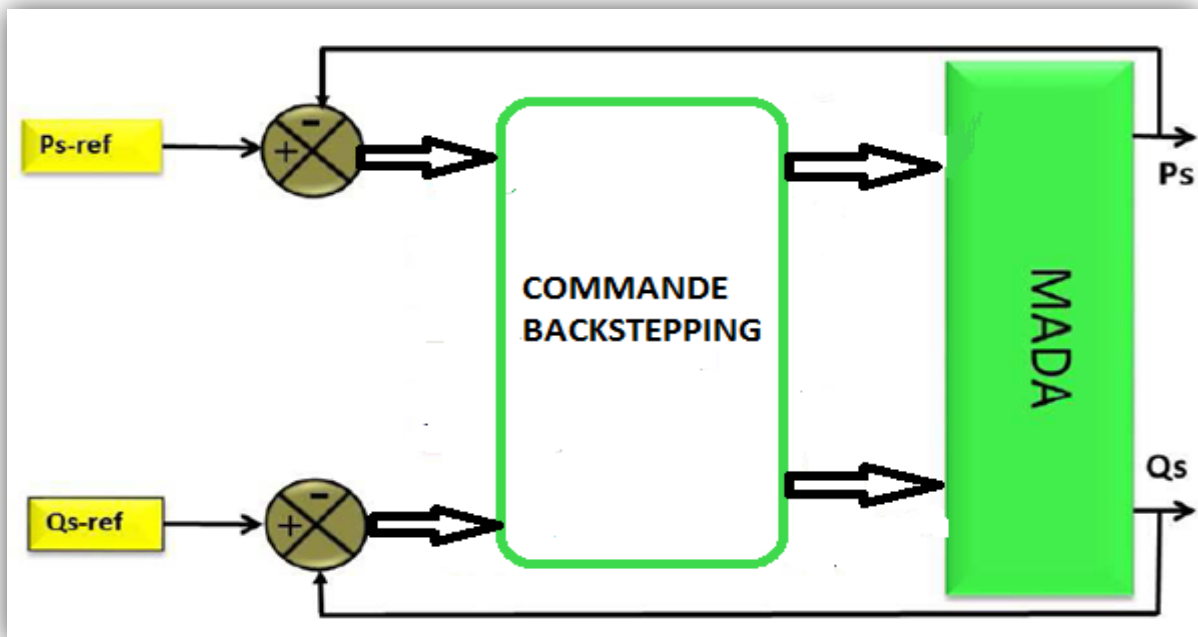


Figure III- 5 : Schéma de commande backstepping.

II.3.4 Résultats de simulation :

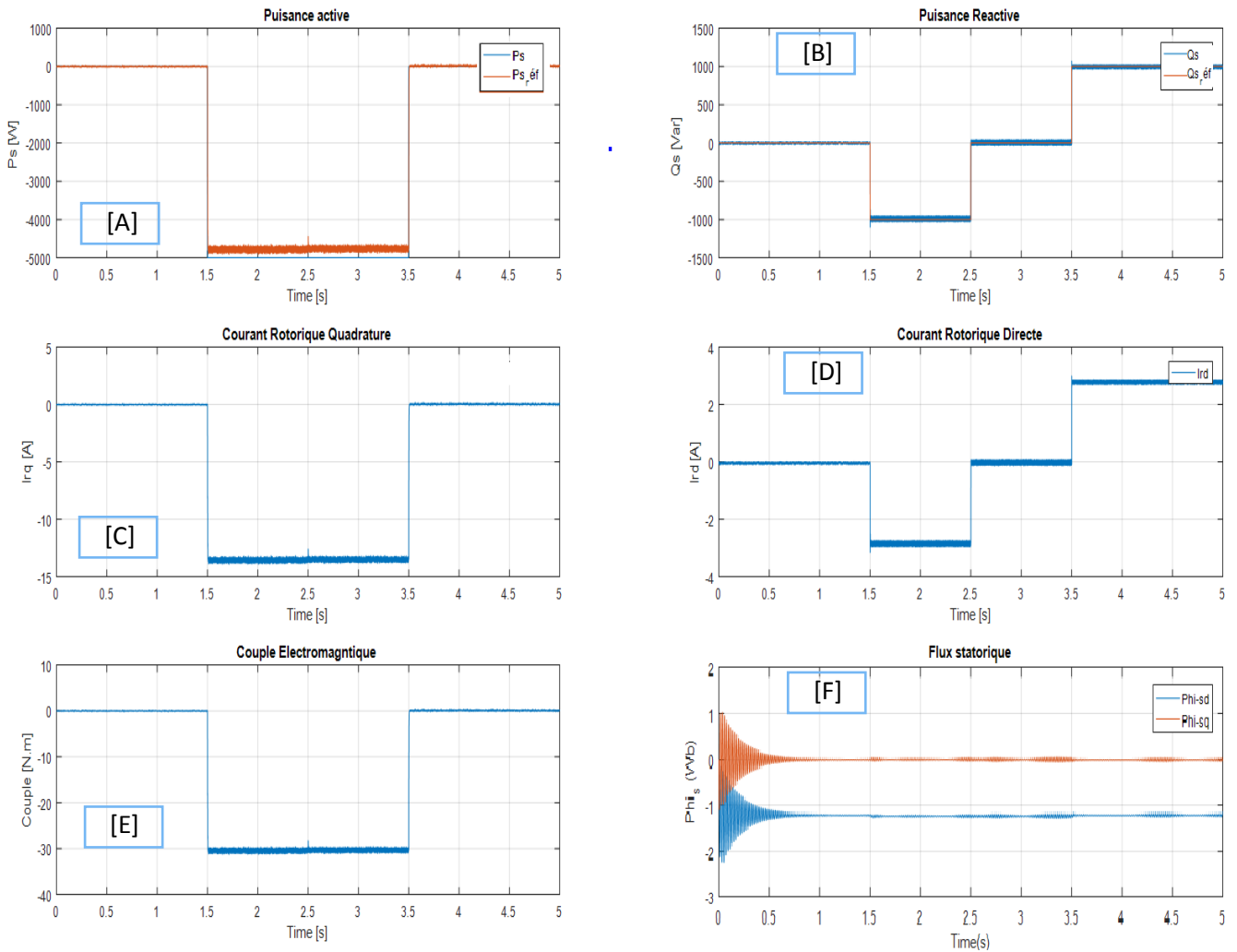


Figure III.6 : résultats de la commande vectorielle régler par la méthode BackStepping.

III.3.5 Interprétations :

Pour évaluer les performances de la commande des puissances munit de la méthode du backstepping. Nous avons procédé à une série de simulations sous environnement MATLAB /Simulink, Le but est de contrôler indépendamment les puissances actives et réactives.

Pour le test de poursuite, les grandeurs commandées suivent bien leur trajectoire de Référence, sans dépassement des puissances active et réactive et sans erreur statique en Régime permanent. (Figure III.6 A et B). Le couple électromagnétique. (Figure III.6. E) et la puissance active. (Figure III.6. a), étant proportionnelles, sont de même allure à vitesse constante. À cause de la variable commune entre eux (I_{rq}) (Figure III.6. C), et le courant (I_{rd}) (Figure III.6. D) qui a la même allure que la puissance réactive (Figure III.6. B). Ainsi la valeur du flux statorique quadrature (Figure III.6. F) est nulle à cause du dimensionnement effectué précédemment

III.3.6. Test de la robustesse :

Pour une évolution plus juste de la méthode de contrôle, on fait appel à des tests de robustesses qui seront l'objectif de cette section. L'évolution de la robustesse des systèmes de contrôles est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres ainsi que dans le cas où la mesure des paramètres démontre des incertitudes importants.

L'objectif de l'essai de robustesse est d'examiner la sensibilité de la commande face aux éventuelles variations des paramètres qui sont supposés fixes. Toutefois, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances ...). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est soumise à des imprécisions dues à la méthode employée et aux appareils de mesure conditionnant l'essai :

- ✚ Résistances R_s et R_r multipliées par 5.
- ✚ Inductances L_s, L_{rs} et M_{sr} divisées par 2.

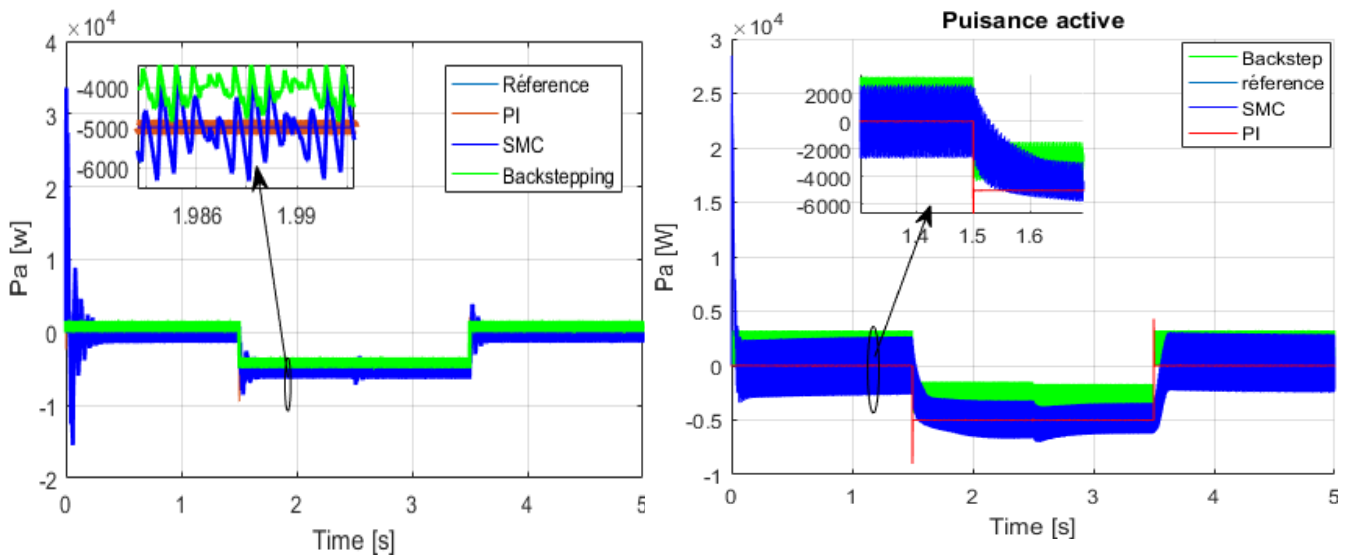


Figure III.7 : teste de la robustesse

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné et évalué les performances de différentes lois De commande non linéaire des puissances active et réactive statoriques au niveau de la MADA.

Les résultats obtenus avec les techniques de commande proposées par mode glissant, méthode backstepping, montrent des performances équivalentes, très satisfaisantes et une très bonne robustesse. Les résultats exposés confirment la faisabilité de l'approche proposée. En plus ces résultats sont équivalents à ceux obtenus avec l'utilisation de la commande vectorielle et en négligeant la résistance statorique. Ca confirme que l'hypothèse précédente n'affecte pas les performances de la commande des puissances de la MADA.

L'objectif du prochain chapitre, pour s'approcher du modèle réel nous allons reprendre les Mêmes essais dans le chapitre suivant en insérant la partie de stockage mécanique de notre système éolien.