

Chapitre V

*Contrôle de la chaîne
de conversion par des
régulateurs à mode
glissant d'ordre 2.*

V.1 Introduction

Dans le but de réduire ou d'éliminer le phénomène de réticence (anglais : chattering) de la commande par mode glissant d'ordre 1, de nombreuses solutions ont été proposées dans la littérature. Comme la solution de couche limite.

Afin d'éliminer ce phénomène de réticence nous proposons dans ce chapitre la commande par mode glissant d'ordre supérieur.

Elle conduit à des lois de commande relativement simples et permet de réduire le phénomène de réticence, tout en conservant les performances du système. Ceux-ci sont caractérisés par une commande discontinue agissant sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement, préservant les principaux avantages de la précédente approche. Ils réduisent le phénomène de réticence en garantissant même une meilleure précision de convergence par rapport aux imperfections du modèle ou d'organes de commande. L'ordre de glissement caractérise en particulier le degré de continuité des dynamiques du système au voisinage de la surface et correspond au nombre de dérivées.

Nous développons dans un premier temps la théorie de la commande par mode glissant d'ordre supérieur et dans un deuxième temps nous appliquons le mode glissant d'ordre 2 pour le contrôle des courants de la génératrice et du réseau.

V.2 Position du problème

On va considérer un système non linéaire avec la dynamique suivante [68]:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x, u) \\ u = U(t, x) \\ S = S(t, x) \end{cases} \quad (V.1)$$

Où

- $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in X$ représente le vecteur d'état $X \subset \mathbb{R}^n$,

- $u \in U \subset \mathbb{R}$: représente la commande,

- f : est une fonction supposée suffisamment différentiable, mais connue de façon incertaine.

- t : est le temps,

- S : est une fonction différentiable telle que ses $(r-1)$ premières dérivées par rapport au temps ne sont fonction que de l'état x (ce qui signifie qu'elles ne contiennent aucune discontinuité).

Comme il a été défini dans le chapitre 3, l'objectif de la commande par régime glissant du premier ordre est d'obliger le système à rester sur la surface de glissement, soit $S = 0$. Pour le cas de la commande par régime glissant d'ordre supérieur, le problème posé est de forcer le système à évoluer sur la surface et à maintenir S ainsi que ses $(r-1)$ premières dérivées successives à zéro : $S = \dot{S} = \dots = S^{(r-1)} = 0$ (V.2)

Où r désigne le degré relatif du système.

V.3 Degré relatif

La notion de degré relatif a été introduite dans un premier temps seulement dans le cas des systèmes autonomes, par la suite l'application a été faite dans le cas non autonome. Cette notion est un concept fondamental qui a joué un grand rôle récemment dans la compréhension de la commande des dynamiques non linéaires.

Le Degré Relatif (DR) d'un système, est le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie, par rapport au temps, pour y faire apparaître l'entrée de commande de manière explicite. Il est calculé en déterminant les dérivées successives de S :

a) Degré Relatif $r=1$, i.e., $\frac{\partial \dot{S}}{\partial u} \neq 0$

b) Degré Relatif $r \geq i$, i.e., $\frac{\partial S^i}{\partial u} \neq 0 (i = 1, 2, \dots, r-1) \frac{\partial S^r}{\partial u} \neq 0$

Dans le cas a) le problème de la commande est résolu par une loi en mode glissant du premier ordre. Cependant une loi 2-glissant peut être utilisée à afin d'éviter le Chattering.

Pour le cas b) on peut choisir la technique p -glissant (avec $p \geq r$) [69].

V.4 Principe

Le régime glissant standard est basé sur l'annulation de la dérivée première par rapport au temps de la surface de glissement soit en \dot{S} . Un régime glissant d'ordre r (noté r -glissant) agit sur les $r-1$ premières dérivées successives de la variable de glissement S^{r-1} . On aura ainsi une précision d'ordre r sur la convergence du système [68].

Le calcul des dérivées successives de la variable de glissement S le long d'une trajectoire d'un système discontinu, aboutit pour un ordre donné, à une discontinuité. Il est alors possible de classer les régimes glissants d'ordre supérieur par le numéro de r dérivées successives de la surface S^r . Ce numéro est appelé l'ordre de glissement, et il fixe le degré de douceur du système. Le $r^{\text{ème}}$ ordre du système est déterminé par l'équation :

$$S = \dot{S} = \dots = S^{(r-1)} \quad (V.3)$$

La précédente équation impose une condition " r -dimensionnel " sur les états du système. L'un des problèmes majeurs pour l'implantation des algorithmes r -glissant est que le nombre d'informations nécessaires augmente avec l'ordre du régime glissant. Par exemple, si on utilise un algorithme de glissement d'ordre 3 par rapport à S , on aura besoin de la connaissance de S, \dot{S} et \ddot{S} . Une bonne solution à ce problème sont les modes glissants du second ordre, Twisting et Super Twisting, qui n'ont besoin que de S comme information d'entrée.

Le régime glissant d'ordre supérieur le plus utilisé dans la littérature est la loi 2-glissant, mais il existe des exemples de modes glissants d'ordre 3 et plus, par exemple la loi r -glissant dans [70]. Dans ce mémoire nous donnons plus en détail les algorithmes d'ordre deux: 2-glissant et de quelques variantes comme le Twisting et Super Twisting. Ce sont les techniques les plus utilisées par les chercheurs et elles sont implémentées en temps réel sans trop de difficultés.

V.5 Commande par mode glissant d'ordre deux

Le principal avantage de la commande par modes glissants d'ordre deux est l'annulation du phénomène de Chattering. Son objectif est de générer un régime glissant d'ordre deux sur la surface de glissement sélectionnée $S = 0$ et d'obtenir en temps fini $S = \dot{S} = 0$.

Dans ce qui suit, nous allons décrire ces lois de commande de second ordre ($r=2$), telles que les techniques de Twisting et Super Twisting. Ces algorithmes sont les plus utilisés dans la littérature, du fait qu'ils ont uniquement besoin de la connaissance de la surface S [71].

La Figure V.1 fait apparaître la trajectoire de convergence du système vers la surface S .

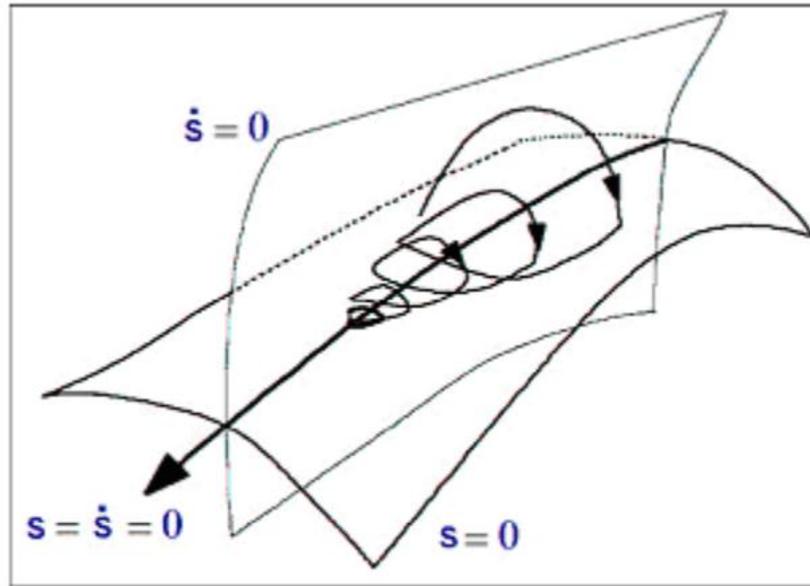


Figure V.1 : Trajectoire du mode glissant d'ordre 2.

Afin de détailler les algorithmes en régime glissant du second ordre, les fonctions f et S de l'expression (V.1) que les seules informations disponibles à l'instant t sont, la commande $u(t)$, la surface $S(t, x)$ et le signe de la dérivée par rapport au temps de S .

La dérivée de S :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} S(t, x) = \frac{\partial}{\partial t} S(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} S(t, x) \frac{dx}{dt} \\ \dot{S} = \frac{\partial}{\partial t} S(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} S(t, x) f(t, x, u) \end{cases} \quad (V.4)$$

La dérivée seconde de S :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \dot{S}(t, x, u) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{S}(t, x, u) \frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(t, x, u) \frac{du}{dt} \\ \ddot{S} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{S}(t, x, u) f(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(t, x, u) \dot{u} \end{cases} \quad (V.5)$$

On pose :

$$\begin{cases} \psi(t, x) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(t, x, u) f(t, x, u) \\ \zeta(t, x) = \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(t, x, u) \end{cases} \quad (V.6)$$

Le système est maintenant constitué des surfaces de glissement S et \dot{S} .

$$\begin{cases} y_1 = S \\ y_2 = \dot{S} \end{cases} \quad (V.7)$$

Si le degré relatif est $DR = 1$: Le système est décrit par le modèle (V.1) et par l'expression :

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ y_2 = \psi(t, x) + \zeta(t, x)u \end{cases} \quad (V.8)$$

Si le degré relatif est $DR = 2$: le problème de la commande peut être dérivé du cas précédent, en considérant la variable x comme une variable d'état, et u comme la commande effective. Le système à commander est défini par :

$$f(t, x, u) = a(t, x) + b(t, x)u(t) \quad (V.9)$$

Où, $a: R^{n+1} \rightarrow R^n$ et $b: R^{n+1} \rightarrow R^n$ sont des fonctions incertaines et continûment dérivables.

Finalement le système est représenté par le modèle (V.9) et par l'équation :

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ y_2 = \bar{\psi}(t, x) + \bar{\zeta}(t, x)u \end{cases} \quad (V.10)$$

En utilisant la stratégie précédente la commande u est régie par un système dynamique du premier ordre. Les algorithmes discontinus sont appliqués en fait à la dérivée par rapport au temps de la commande u , qui devient la nouvelle variable de commande du système considéré et conduit à l'obtention d'un régime glissant d'ordre deux sur la surface S . De cette façon, l'entrée u du système est maintenant continue et permet d'éliminer le Chattering.

V.6 Propriétés de convergence en temps fini de la commande 2-glissante

L'objectif du contrôleur glissant du deuxième ordre est d'amener S ainsi que sa dérivée \dot{S} à zéro dans un temps fini, en utilisant la commande $u(t)$. Afin d'atteindre ce but, les hypothèses suivantes sont considérées [72] :

1. Les valeurs de la commande sont définies par l'ensemble $U = \{u : |u| \leq U_M\}$, où U_M est une constante réelle, et la solution du système est définie sur la variable glissante de deuxième ordre ($S = \dot{S} = 0$).

2. Il existe $u_1 \in (0, 1)$ telle que pour toute fonction continue u avec $|u| > u_1$, il existe t_1 tel que $u > 0$ pour tout $t > t_1$. Ainsi la commande :

$$3. \quad u = -U_M \text{sign}(\dot{S}(t_0)) \quad (V.11)$$

Où t_0 est l'instant initial, assure la convergence en temps fini sur $S = 0$.

3. Il existe des constantes positives $|S(t, x)| < S_0$, telles que dans un voisinage $|S(t, x)| < S_0$,

$$0 < \Gamma_m \leq \frac{\partial \dot{S}(t, x, u)}{\partial u} \leq \Gamma_M, \forall u \in U, x \in X \quad (V.12)$$

Le fait que le terme $\frac{\partial \dot{S}}{\partial u}$ ne s'annule pas est nécessaire pour l'existence de la commande équivalente en régime glissant.

4. Il existe une constante positive Φ telle que dans la région $|S| < S_0$, l'inégalité suivante est vérifiée pour $\forall (t, x) \in X, u \in U$.

$$\left| \frac{\partial \dot{S}(t, x, u)}{\partial u} + \frac{\partial \dot{S}(t, x, u)}{\partial x} f(t, x, u) \right| \leq \Phi \quad (V.13)$$

Nous allons reprendre le système (V.7) et nous supposons que le système est de degré relatif DR=1 par rapport à la surface de glissement S . Ceci s'exprime par :

$$\dot{S} = \dot{y}_2 = \psi(t, x) + \zeta(t, x)u \quad (V.14)$$

Si on applique les propriétés de convergence précédentes nous avons :

$$\begin{cases} 0 < \Gamma_m \leq \zeta(t, x) \leq \Gamma_M \\ |\psi(t, x)| < \Phi \end{cases}$$

Si le système est de degré relatif DR=2 nous devons prendre le système :

$$\ddot{S} = \ddot{y}_2 = \bar{\psi}(t, x) + \bar{\zeta}(t, x)u \quad (V.15)$$

V.6.1 Loi 2-glissante

La technique du deuxième ordre ici proposée, peut être considérée comme une extension d'une loi en régime glissant d'ordre un. Elle est formée de deux parties :

$$u = \int u_{eq} + k_{glis} \int u_{glis} \quad (V.16)$$

- $\int u_{glis}$: Est composée par l'intégrale de la fonction signe de la nouvelle surface de glissement S_y (elle sera définie plus tard) multipliée par une constante k_{glis} .

- $\int u_{eq}$: Est conçue en utilisant la méthode de la commande équivalente pour la nouvelle surface de glissement S_y .

Nous allons maintenant décrire la méthodologie de conception de cette technique de commande.

V.6.2 Surface de glissement

Nous allons définir une surface de glissement S en fonction de l'espace d'états des erreurs.

$$S = y_1 = S_1(x - x_d) + S_2(\dot{x} - \dot{x}_d) + \dots + S_n(x^{r-1} - x_d^{r-1}) = S \bar{x} \quad (V.17)$$

Le calcul de la dérivée donne :

$$\dot{S} = y_2 = S_1(\dot{x} - \dot{x}_d) + S_2(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + \dots + S_n(x^r - x_d^r) = \dot{S} \bar{x} \quad (V.18)$$

Nous avons un nouveau système (V.18) en fonction de y_1 et y_2 , nous proposons alors une nouvelle surface de glissement S_y :

$$S_y = \dot{S} + \eta S = y_2 + \eta y_1 \quad (V.19)$$

Où : η est une constante positive.

Avec cette technique, la convergence du système est régie par la surface de glissement S et par sa dérivée \dot{S} .

V.6.3 Commande équivalente

On sait que la commande équivalente est la solution pour la commande une fois que la dérivée de la nouvelle surface de glissement est nulle, soit $\dot{S}_y = 0$.

$$\dot{S}_y = \ddot{S} + \eta \dot{S} = 0 \quad (V.20)$$

La valeur \ddot{x} est calculée avec la dérivée du système (V.1):

$$\ddot{x} = \frac{\partial}{\partial t} f(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} f(t, x, u) \dot{x} + \frac{\partial}{\partial u} f(t, x, u) \dot{u} \quad (V.21)$$

Finalement la commande équivalente s'exprime par :

$$\dot{u}_{eq} = -\frac{1}{\frac{\partial}{\partial u} f(t, x, u)} \left[\frac{\partial}{\partial t} f(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} f(t, x, u) \dot{x} + \eta \dot{S} \right] \quad (V.22)$$

L'algorithme du deuxième ordre qui a été présenté précédemment permet l'élimination du phénomène de Chattering qui est due à la discontinuité de la fonction *signe* qui se trouve à l'intérieur de la fonction d'intégration. Une autre conséquence est la convergence plus douce vers la surface de glissement, car la commande prend en compte la dérivée de la surface. Le désavantage de cette loi, est qu'elle a besoin de la connaissance de la dérivée de la surface de glissement. Dans la pratique, cela veut dire qu'il faudra mettre plus de capteurs afin de mesurer les états supplémentaires ou implémenter des observateurs d'états [69].

V.7 Algorithmes glissants d'ordre supérieur

Les définitions énoncées précédemment concernant les régimes glissants réels d'ordre r ont permis d'introduire un outil de comparaison de différents algorithmes de contrôle générant ces modes. On distingue ainsi les algorithmes idéaux des algorithmes réels. En effet, les travaux de M. Levant montrent qu'un ordre de glissement réel ne doit pas excéder l'ordre du mode de glissement correspondant. Les modes glissants standards procurent, ainsi un mode glissant réel seulement de premier ordre et un mode glissant réel de second ordre est réellement obtenu par modification de commutation discrète des algorithmes glissants de second ordre. Un mode glissant réel peut aussi être obtenu par un moyen différent de celui de la réalisation discrète du mode glissant et c'est le cas du 'Drift algorithme' qu'on verra par la suite [70].

Généralement, pour utiliser un algorithme de glissement d'ordre r par rapport à $S = 0$ on a besoin de connaître S, \dot{S} et S^{r-1} , ce qui induit une difficulté d'implémentation lorsque l'ordre de glissement augmente. Les algorithmes réels ne requièrent que les mesures de S, \dot{S} et S^{r-2} et ceci constitue une bonne solution pour les modes glissants du second ordre. En effet, seule l'information sur S est nécessaire.

V.7.1 Algorithme de Twisting

Cet algorithme a été défini comme le premier contrôleur par mode glissant d'ordre supérieur. Cet algorithme twiste autour de l'origine du plan de glissement d'ordre deux est appelé Twisting en raison de sa convergence en temps fini vers l'origine du plan de phase (S et \dot{S}), avec un nombre infini de rotation, voir la Figure (V.2). Son principe de fonctionnement est la commutation de l'amplitude de la commande entre deux valeurs V_m et V_M , de telle façon que l'abscisse et l'ordonnée soient croisées de plus en plus vers l'origine [73].

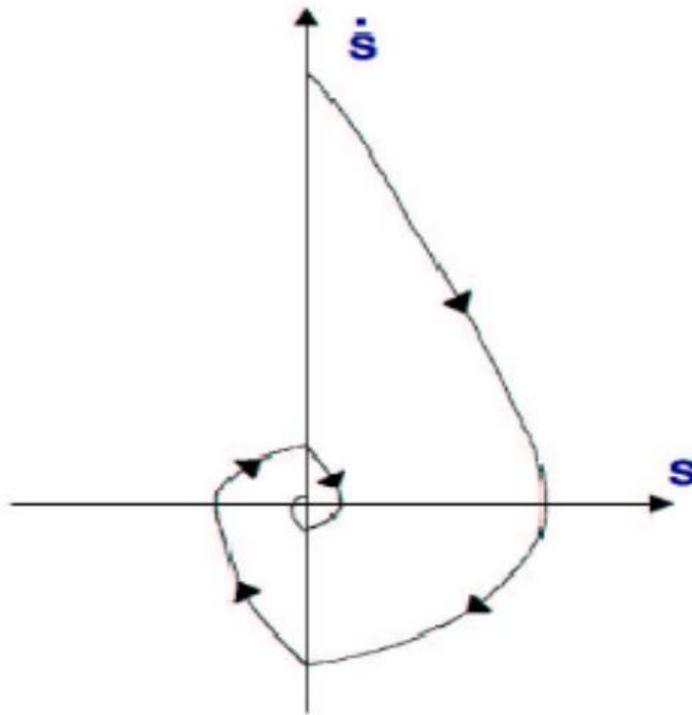


Figure V.2 : Convergence en temps fini de l'algorithme Twisting.

Nous allons reprendre le système $y_1 = S$ et $y_2 = \dot{S}$. Maintenant le problème de la commande est de stabiliser en temps fini le système du deuxième ordre suivant :

$$\begin{cases} y_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = \psi(t, x) + \zeta(t, x) u \end{cases} \quad (V.23)$$

Où : $\psi(t, x)$ et $\zeta(t, x)$ sont des fonctions mal connues mais bornées.

$$\phi > 0, |\psi| \leq \phi, 0 < \Gamma_m \leq \zeta \leq \Gamma_M \quad (V.24)$$

L'algorithme du Twisting pour un degré relatif 1 est défini par la loi de commande suivante :

$$\dot{u} = \left\{ \begin{array}{ll} -u & \text{si } |u| > 1 \\ -V_m \text{sgn}(S) & \text{si } S\dot{S} \leq 0, |u| \leq 1 \\ -V_M \text{sgn}(S) & \text{si } S\dot{S} > 0, |u| \leq 1 \end{array} \right\} \quad (\text{V.25})$$

Où $|u|$ est une valeur bornée de commande, donné pour $u \leq 1$.

L'équation de commande pour un degré relatif 2 est :

$$u = \left\{ \begin{array}{l} -V_m \text{sgn}(S), \text{si } S\dot{S} \leq 0. \\ -V_M \text{sgn}(S), \text{si } S\dot{S} > 0. \end{array} \right. \quad (\text{V.26})$$

Avec les conditions suffisantes assurant la convergence en temps fini sur la variété S sont [73] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_M > V_m, \\ V_m > \frac{4\Gamma_M}{S_0}, \\ V_m > \frac{\phi}{\Gamma_m}, \\ \Gamma_m V_m - \phi > \Gamma_M V_m + \phi \end{array} \right. \quad (\text{V.27})$$

Si dans la pratique la dérivée de la surface S n'est pas mesurable, son signe peut être estimé par le signe de la dérivée de la surface s dans un intervalle de temps Δ_t . Le $\text{sgn}(\dot{S}(t))$ est calculé par l'expression $\text{sgn}(\dot{S}(t) - S(t - \Delta_t))$. En considérant les incertitudes du système et les intervalles de temps entre les croisements successifs de l'axe des abscisses, il est possible de définir la borne supérieure du temps de convergence du système [69] :

$$t_{\infty} \leq t_{M_1} + \Theta_{tw} \frac{1}{1 - \theta_{tw}} \sqrt{|y_{1M_1}|} \quad (\text{V.28})$$

Où y_{1M_1} est la valeur de la surface S quand l'axe des abscisses est traversé pour la première fois, t_{M_1} est la valeur de temps à cet instant. Les expressions Θ_{tw} et θ_{tw} sont données par les formules suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_{tw} = \sqrt{2} \frac{\Gamma_m V_M + \Gamma_M V_m}{(\Gamma_m V_M - \phi) \sqrt{\Gamma_M V_m + \phi}} \\ \theta_{tw} = \sqrt{\frac{\Gamma_m V_M + \phi}{\Gamma_M V_m + \phi}} \end{array} \right. \quad (\text{V.29})$$

V.7.2 Algorithme de Super Twisting

La convergence de cet algorithme est régie aussi par les rotations autour de l'origine du diagramme de phase. La loi de commande Super Twisting $u(t)$, est formée de deux parties. La première est définie par sa dérivée par rapport au temps (u_1), tandis que la deuxième est donnée par la fonction continue de la variable de glissement (u_2) :

$$u = u_1(t) + u_2(t) \quad (V.30)$$

$$\dot{u} = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > 1 \\ -W \operatorname{sgn}(S) & \text{si } |u| \leq 1 \end{cases} \quad (V.31)$$

$$u_2 = \begin{cases} -\lambda_1 |S_0|^{p_1} \operatorname{sgn}(S) & \text{si } |S| > S_0 \\ -\lambda_1 |S|^{p_1} \operatorname{sgn}(S) & \text{si } |S| \leq S_0 \end{cases}$$

Les conditions suffisantes de convergence en temps fini sont [68] :

$$\begin{cases} W > \frac{\phi}{\Gamma_m}, \\ \lambda_1^2 \geq \frac{4\phi\Gamma_m(W + \phi)}{\Gamma_m^2\Gamma_m(w - \phi)}, \\ 0 < \rho_1 \leq 0.2 \end{cases} \quad (V.32)$$

Ce contrôleur peut être simplifié si le système de contrôle est linéairement dépendant de la commande, ainsi la loi de commande est donnée par :

$$\begin{cases} u = -\lambda |S|^{1/2} \operatorname{sgn}(S) + u_1 \\ \dot{u}_1 = -W \operatorname{sgn}(S) \end{cases} \quad (V.33)$$

L'intérêt de cet algorithme est qu'il très robuste, elle n'a pas besoin d'information sur la dérivée de S . A cause de cette caractéristique on peut réduire les nombres de capteurs du système, ainsi que le temps de calcul.

V.8 Suppression de la réticence

En utilisant la stratégie de commande du second ordre qui a été décrite dans la section précédente, le système est formé par les équations (V.1) et (V.8) si le degré relatif est DR=1 ou par les expressions (V.9) et (V.10) si DR=2. La caractéristique principale de ces stratégies, est que la partie discontinue (la fonction signe) est appliquée à la dérivée par rapport au temps

de la commande, soit \dot{u} . Le but principal de la commande est d'obtenir un régime glissant du deuxième ordre sur la surface de glissement S .

Avec la prise en compte de la dérivée de la surface de glissement dans le calcul de la commande, le système atteint la surface S plus doucement. Finalement quand on fait le calcul de l'entrée du système $u = \int \dot{u}$, la commande devient continue évitant de cette façon le phénomène de réticence dans la plus parts des systèmes.

V.9 Application de la commande par mode glissant d'ordre 2 à la chaîne de conversion

Après avoir présenté la théorie de la commande par mode glissant d'ordre 2, nous allons dans cette partie l'appliquer au contrôle des courants de la GSAP et du réseau électrique.

La structure de cette stratégie de contrôle est détaillée à la figure (V.3) ci -dessous. La première partie de de la figure montre la commande du convertisseur coté machine et la deuxième celle du convertisseur coté réseau

L'approche de contrôle du second ordre est détaillée à la figure (V.3) ci -dessous. La première partie de de la figure montre la commande du convertisseur coté machine et la deuxième celle du convertisseur coté réseau.

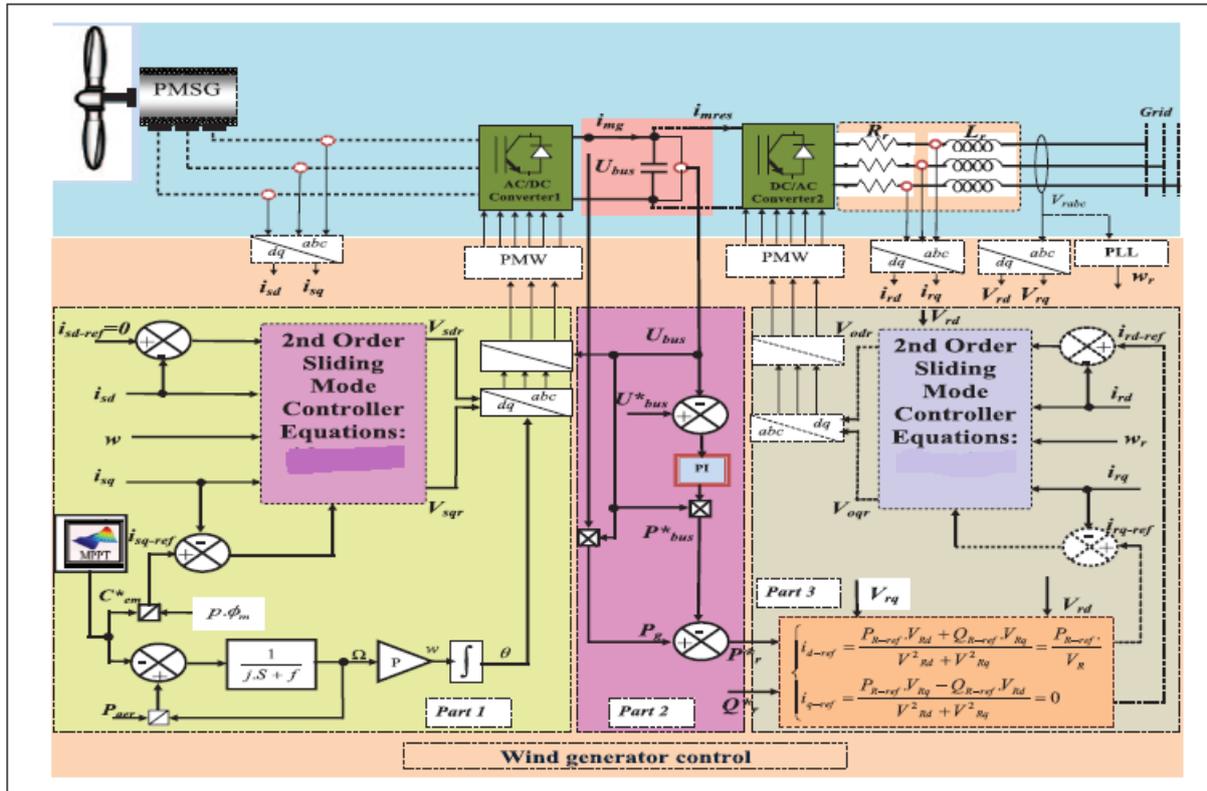


Figure V.3: Stratégie de contrôle de chaîne par MGO2.

V.10 Contrôle du convertisseur coté machine

V.10.1 Régulation de la vitesse mécanique

Pour le réglage de la vitesse mécanique on va utiliser le même régulateur IP utilisé au niveau de la commande vectorielle à base des régulateur PI (Chapitre III).

V.10.2 Commande vectorielle de la GSAP à base des régulateurs à MGO2

Pour la régulation des courants statorique i_{sd} et i_{sq} nous appliquons la commande vectorielle à base des régulateurs à mode glissant d'ordre 2 (MGO2).

Les surfaces de glissement sont déterminées par la relation fournie dans l'équation (V.8).

La dérivée primaire des surfaces de glissement est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} S_d = \frac{d}{dt} i_{sd-ref} - \frac{d}{dt} i_{sd} = -\frac{1}{L_s} (V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega L_s i_{sq}) \\ \frac{d}{dt} S_q = \frac{d}{dt} i_{sq-ref} - \frac{d}{dt} i_{sq} = -\frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega L_s i_{sd} - \omega \phi) \end{cases} \quad (V.34)$$

Afin de satisfaire la condition de transition de l'équation (V.34) et tester la stabilité et la robustesse en boucle fermée, nous considérons une dérivée seconde de la surface de glissement.

$$\begin{cases} \ddot{S}_d = \varphi_d(x, t) + \gamma_d(x, t)\dot{V}_{sd} \\ \ddot{S}_q = \varphi_q(x, t) + \gamma_q(x, t)\dot{V}_{sq} \end{cases} \quad (V.35)$$

En plus de la commande équivalente V_{sd-eq} donnée dans l'équation (V.34), la commande globale est constituée des deux termes de super-twisting U_{1i} et U_{2i} . Après regroupement, la commande globale sera donnée par l'équation.

$$\begin{cases} V_{sd}^* = U_{1d} + U_{2d} + V_{sd-eq} \\ V_{sq}^* = U_{1q} + U_{2q} + V_{sq-eq} \end{cases} \quad (V.36)$$

Les signaux V_{sd}^* , V_{sq}^* déterminent les références du vecteur tension du redresseur. Ces tensions de référence sont ensuite transformées en système abc et déterminent les tensions de commande requises pour le bloc MLI.

Où :

$$\begin{cases} V_{sd-eq} = R_s i_{sd} - \omega_e L_s i_{sq} \\ V_{sq-eq} = L_s \frac{d}{dt} i_{sq-ref} + R_s i_{sq} + L_s \omega_e i_{sd} + \omega_e \phi \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{1d-g} = \int \lambda_{1d-g} \text{sign}(S_{d-g}); U_{2d-g} = \lambda_{2d-g} |S_{d-g}|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_{d-g}) \\ U_{1q-g} = \int \lambda_{1q-g} \text{sign}(S_{q-g}); U_{2q-g} = \lambda_{2q-g} |S_{q-g}|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_{q-g}) \end{cases} \quad (V.37)$$

λ_{1d-g} , λ_{2d-g} , λ_{1q-g} , λ_{2q-g} des gains à déterminer.

V.11 Contrôle du convertisseur coté réseau

V.11.1 Contrôle du bus continu

Le contrôle de la tension du bus continu est le même à celui décrit dans la partie précédente.

V.11.2 Contrôle des courants du réseau

Pour contrôler les courants injectés au réseau, la stratégie de contrôle de tension orienté (VOC) avec le contrôle à mode glissant d'ordre 2 a été appliquée comme le montre la troisième partie de la figure (IV.3).

Pour effectuer ce contrôle des courant i_{rd} et i_{rq} injectés au réseau les surfaces de glissement sont déterminées par la relation fournie dans l'équation (V.38). Après la première dérivation des deux surfaces, nous avons :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} S_{d-g} = \frac{d}{dt} i_{rd-ref} - \frac{d}{dt} i_{rd} = -\frac{1}{L_r} (V_{od} - R_r i_{rd} + \omega L_r i_{rq} - V_r) \\ \frac{d}{dt} S_{q-g} = \frac{d}{dt} i_{rq-ref} - \frac{d}{dt} i_{rq} = -\frac{1}{L_r} (V_{oq} - R_r i_{rq} - \omega L_r \omega_r i_{rq}) \end{cases} \quad (V.38)$$

La deuxième dérivée des surfaces de glissement est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \ddot{S}_d = \varphi_{d-g}(x,t) + \gamma_{d-g}(x,t) \dot{V}_{od} \\ \ddot{S}_q = \varphi_{q-g}(x,t) + \gamma_{q-g}(x,t) \dot{V}_{oq} \end{cases} \quad (V.39)$$

La commande globale est constituée des deux termes de Super-Twisting U_{1i} et U_{2i} . Après regroupement, la commande globale sera donnée par l'équation :

$$\begin{cases} V_{odr} = U_{1d-g} + U_{2d-g} + V_{od-eq} \\ V_{oqr} = U_{1q-g} + U_{2q-g} + V_{oq-eq} \end{cases} \quad (V.40)$$

Ou,

$$\begin{cases} V_{od-eq} = L_r \frac{d}{dt} i_{rd-ref} + R_r i_{rd} - L_r \omega_r i_{rq} + V_r \\ V_{oq-eq} = R_r i_{rq} + L_r \omega_r i_{rq} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{1d} = \int \lambda_{1d} \text{sign}(S_d); U_{2d} = \lambda_{2d} |S_d|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_d) \\ U_{1q} = \int \lambda_{1q} \text{sign}(S_q); U_{2q} = \lambda_{2q} |S_q|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_q) \end{cases} \quad (V.41)$$

λ_{1d} , λ_{2d} , λ_{1q} , λ_{2q} des gains à déterminer.

Les conditions suffisantes de convergence en temps fini vers la surface de glissement sont les suivantes :

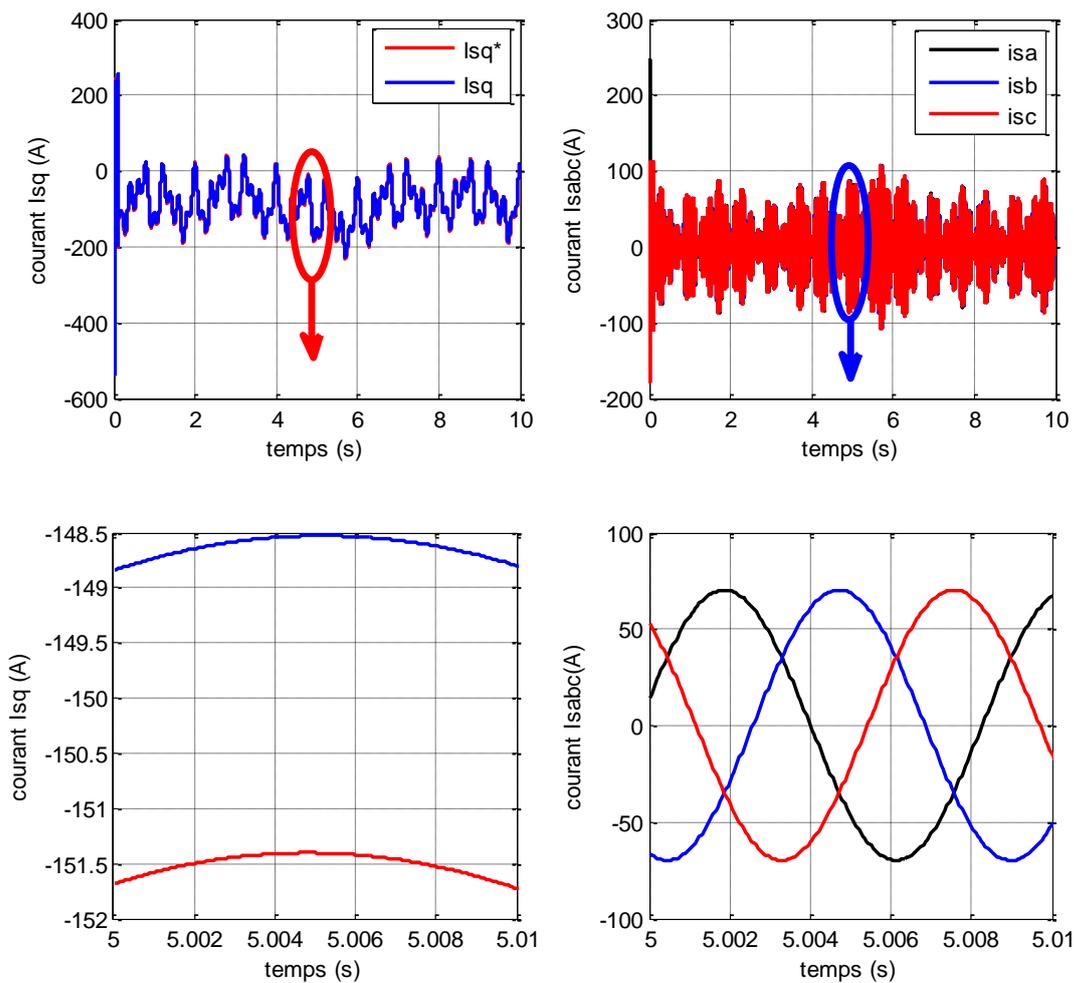
$$\begin{cases} \lambda_{1j} > \frac{\Phi_j}{\Gamma_{mj}} \\ \lambda_{2j} \geq \sqrt{\frac{4\Phi_{Mj}(\lambda_{1j} + \Phi_j)}{\Gamma_{mj}(\lambda_{1j} - \Phi_j)}} \end{cases} \quad (V.42)$$

Étude de stabilité. :

En utilisant la même fonction de Lyapunov, il est clair que γ_3 est défini positif.

$$\dot{\gamma}_3 = S_d \dot{S}_d + S_q \dot{S}_q + S_{d-g} \dot{S}_{d-g} + S_{q-g} \dot{S}_{q-g} < 0 \quad (V.43)$$

V.12. Résultats de simulation du contrôle du convertisseur coté machine



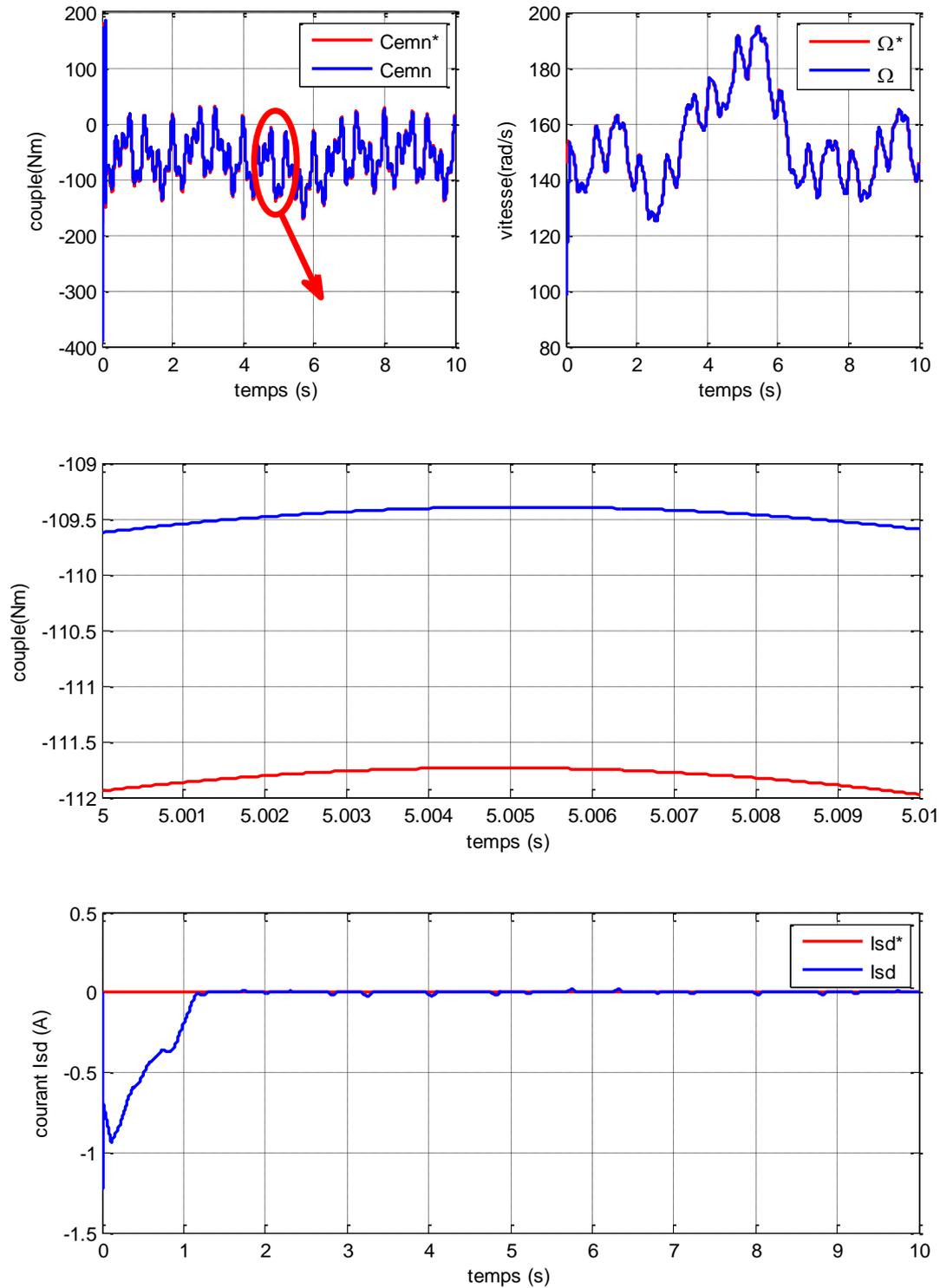


Figure V.4: Résultats de contrôle du convertisseur coté machine par contrôle de vitesse par IP et réglages des courants statorique de la GSAP par RMG2

Interprétations des résultats:

En analysant le résultat de simulations obtenus nous remarquons clairement que le contrôleur à mode glissant d'ordre 2 à éliminer le phénomène de chattering observé au niveau des grandeurs de la machine à savoir le couple électromagnétique et les courant triphasés lorsqu'on a utilisé le contrôleurs à mode glissant d'ordre 1 pour la régulation des courants statorique de la machine.

V.13 Conclusion

Le contrôleur à mode glissant d'ordre 2 possède un grand avantage par rapport au contrôleur à mode glissant d'ordre 1. Il protège la machine contre les surintensités et les vibrations qui sont générées par le problème de chattering existant dans le contrôleur à mode glissant classique augmentant ainsi la durée de vie de la machine.