Chapitre III

Réglage par mode glissant

III-1-Introduction :

Dans la conception des systèmes automatiques, on cherche toujours à améliorer les performances dynamiques et à minimiser le temps de réponse.

Les algorithmes de commande classiques par exemple à action proportionnelle intégrale peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et les performances des systèmes ne sont pas trop strictes .néanmoins, dans le cas contraire et particulièrement lorsque la partie commandé est soumise à des fortes non linéarités et à des variations temporelles, il faut concevoir des algorithmes de commande assurant la robustesse du comportement du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations[9].

Nous avons ici adopté la technique de réglage par mode glissant, celle-ci repose sur la théorie des systèmes à structure variable.

III-2-Systèmes à structure variables :

Lorsque la structure du système ou du correcteur utilisé prend d'une façon discontinue deux ou plusieurs expressions, la notion de système à structures variables intervient .Il en découle les définitions suivantes:

a-Définition 1 :

Un système à structure variable (VSS) est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant. De plus un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure [7].

b-Définition 2 :

Un système est dit à structure variable s'il admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(X) & \text{si la condition 1 est vérifie} \\ \vdots & \vdots \\ f_n(X) & \text{si la condition n est vérifie} \end{cases} \quad (3\text{-}1)$$

Où f_i les fonctions appartiennent à un ensemble de sous-systèmes de classe C^k.

Par conséquence, les systèmes à structures variables sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation.

III-2-1 Exemple :

A titre d'exemple, prenons le cas d'un système du second ordre défini par l'équation suivante :

$$\ddot{x} = -x.u \quad (3\text{-}2)$$

Où x, u $\in$R, telle que x est l'état du système et u sa commande.

Le problème posé est le suivant : Comment ramener le système à l'origine $(x, \dot{x}) = (0,0)$ à partir d'un état initial $(x, \dot{x}) = (x_0, \dot{x}_0)$.

La solution proposée est la suivante :

Si on pose $u = \alpha^2$ (α est une constante), alors la solution de l'équation (3-2) est :

$$\begin{cases} x = c_1 e^{j\alpha t} + c_2 e^{-j\alpha t} \\ \dot{x} = j\alpha c_1 e^{j\alpha t} - j\alpha c_2 e^{-j\alpha t} \end{cases} \quad (3\text{-}3)$$

Où c_1 et c_2 sont des constantes qui dépendent des conditions initiales du système.

A partir de l'expression (3-3) on tire la relation liant x et $\dot{x}$:

$$\frac{\dot{x}}{\alpha^2} + x^2 = 4c_1c_2 > 0 \quad (3\text{-}4)$$

Cette solution représente l'équation d'une ellipse dans le plan de phase (figure3-1) suivant que α est supérieure, inférieure où égale à 1.

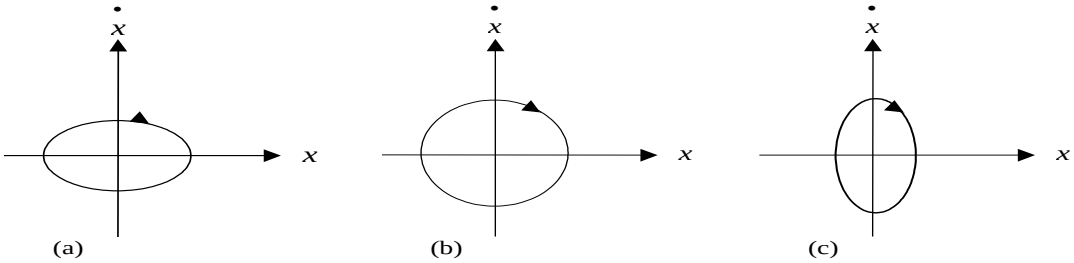


Figure (3-1): représentation dans le plan d'état du comportement du système
a: α <1 , β :α=1 , c :α >1

Etant donné que la variation se fait selon la direction des aiguilles d'une montre (figure 3-1), la loi de commutation de la commande est choisie suivant le signe de $x\dot{x}$ de la manière suivante :

$$u = \begin{cases} \alpha^2 = \alpha_1{}^2 < 1 & \text{si } x\dot{x} < 0 \\ \alpha^2 = \alpha_2{}^2 > 1 & \text{si } x\dot{x} > 0 \end{cases} \qquad (3\text{-}5)$$

Il en résulte un comportement convergeant et stable vers l'origine (figure 3-2).

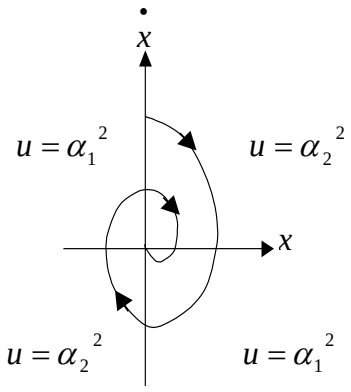


Figure (3-2) : Convergence et stabilisation par logique de commutation

III-3-Théories des Modes glissants:

Les systèmes à structure variable sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation appropriée .Ce choix assure à tout instant la commutation entre ces structures .La combinaison des propriétés de chacune de ces structures permet d'imposer le comportement désiré au système global [9].

Comme il a été présenté précédemment, la commande par le mode glissant est un cas particulier de la commande à structure variable appliquée à des systèmes décrits par l'équation suivante (on se limite au cas $n = 2$) :

$$\dot{x} = f = \begin{cases} f^+(x,u^+) & \text{si } S(x,t) > 0 \\ f^-(x,u^-) & \text{si } S(x,t) < 0 \end{cases} \tag{3-6}$$

Les champs de vecteurs u^+ et u^- sont définis par :

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x,t) > 0 \\ u^- & \text{si } S(x,t) < 0 \end{cases} \tag{3-7}$$

Où $S(x,t)$ est la fonction de commutation (surface).

La surface de commutation S_0 est définie comme suite :

$$S_0 = \{x(t) \quad / \quad S(x,t) = 0\} \tag{3-8}$$

Ici, on a choisi une surface de glissement sur laquelle le système commute; c'est la surface sur laquelle le système suit l'évolution désirée. En général, la variété de commutation est de dimension égale à «n » moins le nombre de fonction de commutation disponible (i.e. dans le cas de la commande, c'est le nombre de sorties à stabiliser).

Les trajectoires associées à la fonction f se résument en trois configurations où sont décrites les évolutions temporelles :

- La première configuration représente des trajectoires de f^+ et f^- qui mettent en évidence un phénomène de répulsion de celles-ci vis-à-vis de la surface de commutation S_0.

- La deuxième configuration représente des trajectoires où il existe des phénomènes d'attraction pour f^+ (respectivement pour f^-) et de répulsion pour f^- (respectivement pour f^+).
- La troisième configuration (Figure (3-3) représente des trajectoires de f^+ et f^- qui convergent vers la surface de commutation S_0, et qui ont la particularité de glisser sur celle-ci. Ce phénomène est appelé «mode de glissement »

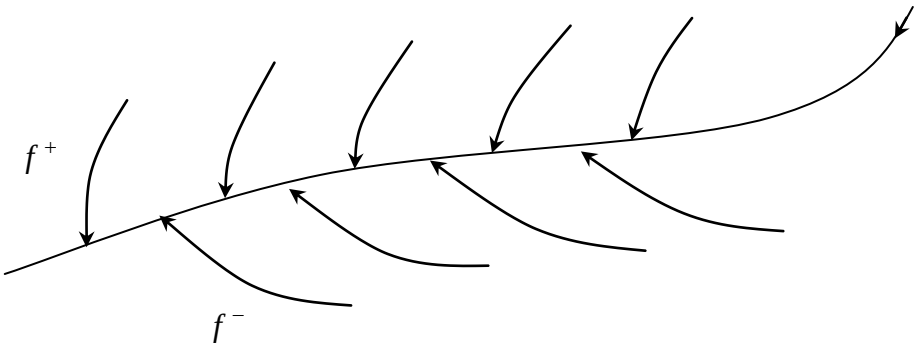


Figure (3-3): Trajectoires de f^+ et de f^- pour le mode de glissement.

f^-

f^-

III-3-1-Les modes de la trajectoire dans le plan de phase :

La technique de la commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre [11] Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes [10] (figure3-4) :

- **Le mode de convergence (MC)** : Dont la variable à réguler se déplace à partir du point d'équilibre initial, en d'autres termes c'est le comportement durant lequel la variable à réguler se déplace à partir d'un état initial vers la surface de commutation.

- **Mode de glissement (MG)** : C'est le mouvement (comportement) du système le long de la surface de commutation .La dynamique dans ce mode dépend du choix de la surface de glissement .Il apparaît quand la commande ramène l'état x sur la surface de commutation et s'efforce de l'y maintenir.

- **Le mode de régime permanent (MRP)** : Il est nécessaire pour l'étude du Comportement d'un système autour du point d'équilibre.

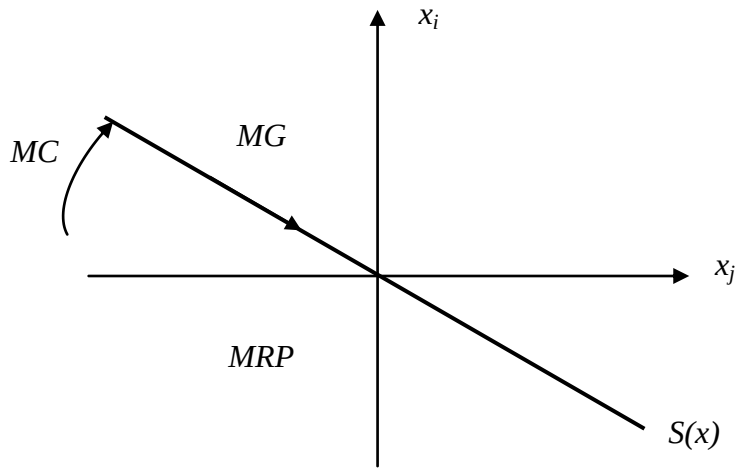


Figure (3-4) : Les modes de trajectoire dans le plan de phase

III-4-Conception de la commande par mode de glissement :

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique .La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

1. Le choix de la surface.
2. L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
3. La détermination de la loi de commande.

III-4-1-Choix de la surface de glissement :

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme .En fonction de l'application et de l'objectif **visé .En général, pour un système défini par l'équation d'état suivant [10], [9] :**

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x,t) + g(x,t)u(t) \\ y = C^t x, \qquad y \in R^m \end{cases} \tag{3-9}$$

Il faut choisir «*m*» surfaces de glissement pour un vecteur *y* de dimension «*m*» En ce qui concerne la forme de la surface, deux possibilités se présentent ; soit dans le plan de phase ou dans l'espace d'état .Dans ce dernier cas, on trouve la méthode dite «loi de commutation par contre réaction d'état », Celle-ci utilise les concepts du réglage par contre réaction d'état pour

synthétiser la loi de commutation .Son inconvénient majeur réside dans le faite qu'elle présente une réponse transitoire lente et de conception très difficile.

Dans le cas du traitement dans l'espace de phase, la fonction de commutation est une fonction scalaire, telle que la variable à régler glisse sur cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase .Ainsi, la surface $S(x)$ représente le comportement dynamique désiré du système. **J. J. Slotine** propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$S(x) = (\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x)^{r-1} e(x) \tag{3-10}$$

Avec :

$e(x)$: L'écart de la variable a régler $e(x) = x_{ref} - x$.

λ_x : Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour $r = 1$, $S(x) = e(x)$.

Pour $r = 2$, $S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$.

Pour $r = 3$, $S(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$.

$S(x) = 0$ Est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est e(x)=0.

En d'autre terme, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro .Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence .La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre « r ».

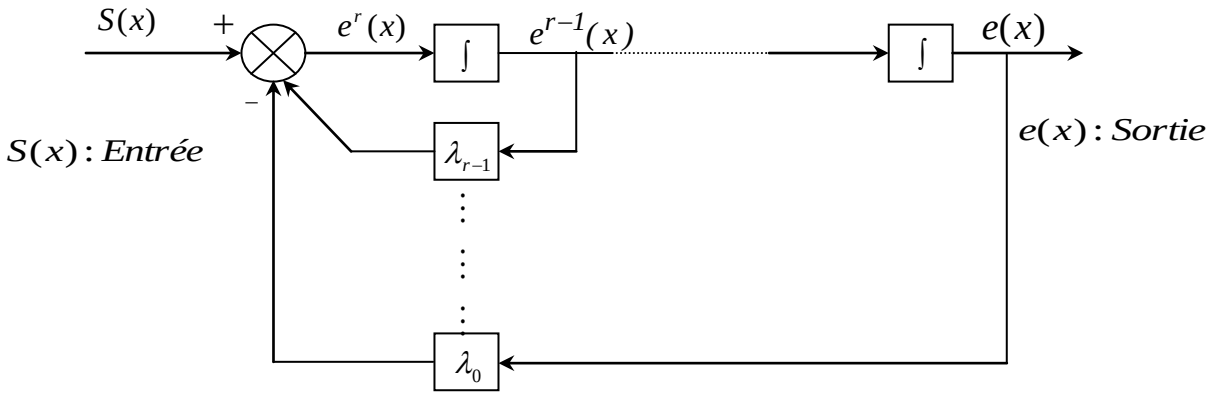


Figure (3-5) : Linéarisation exacte de l'écart.

III-4-2-Conditions de convergence :

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions, celles-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système.

III-4-2-1-Fonction directe de commutation:

Elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN .Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par [10] :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \tag{3-11}$$

III-4-2-2-Fonction de LYAPUNOV :

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction (i.e. $\dot{V}(x) < 0$) Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires [9] . En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \tag{3-12}$$

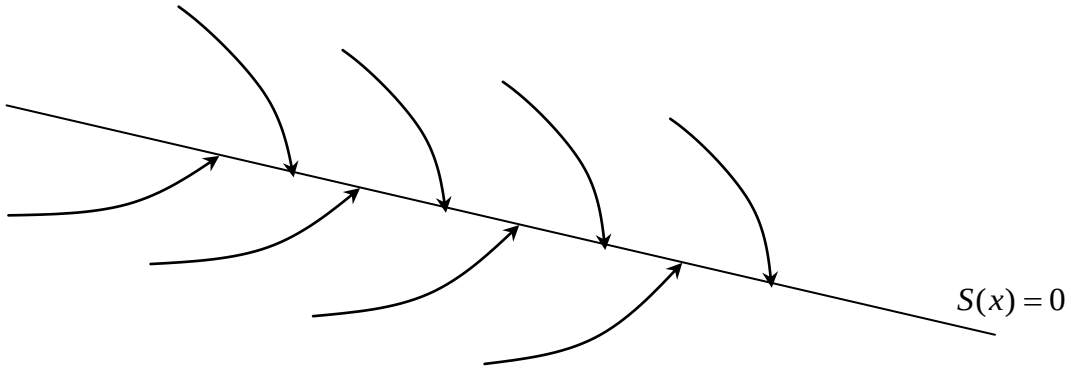
Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \tag{3-13}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifie si :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \tag{3-14}$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par $S^2(x)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux cotés (Figure 3.6) .Cette condition suppose un régime glissant idéal.



Figure(3-6) : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.

III-4-3-Calcul de la commande :

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants.

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre u_{Max} et u_{Min} instantanément (fréquence infinie), en fonction du signe de la surface de glissement (Figure 3-7) .Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées « *broutement* » ou « Chattering **»** apparaissent dans le mode de glissement**.**

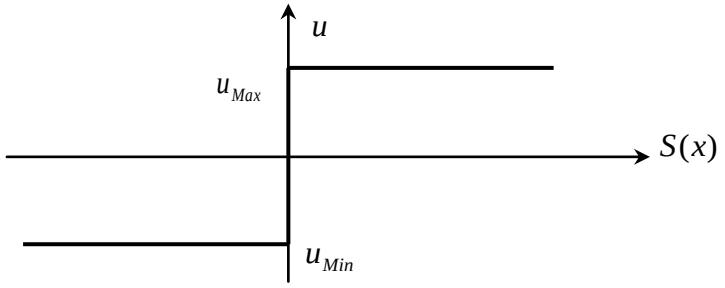


Figure (3-7) : Commande appliquée aux systèmes à structure variable.

a-Définition des grandeurs de commande :

Comme il a été vu précédemment, la surface de glissement se détermine en fonction du système et des performances désirées, indépendamment de la commande, et l'obtention du régime glissant supposerait la commande discontinue De ce fait, si cette commande est indispensable, elle n'empêche nullement, au contraire, qu'une partie continue lui soit adjointe pour diminuer amplitude de la discontinuité.

Par conséquent, la structure d'un contrôleur comporte deux parties; une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante .Cette dernière est très importante dans la technique de commande par modes de glissement, car elle est utilisée pour rejeter les perturbations extérieures.

Nous posons donc :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \tag{3-15}$$

$u_{eq}(t)$ Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin. Cette commande est considérée comme la plus directe et la plus simple .Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par : $\dot{S}(x) = 0$

$u_N(t)$ Est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence $S(x)\dot{S}(x) < 0$ .Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et il est donné par : $\dot{S}(x) = u_N$

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre u_{Max} et u_{Min}.

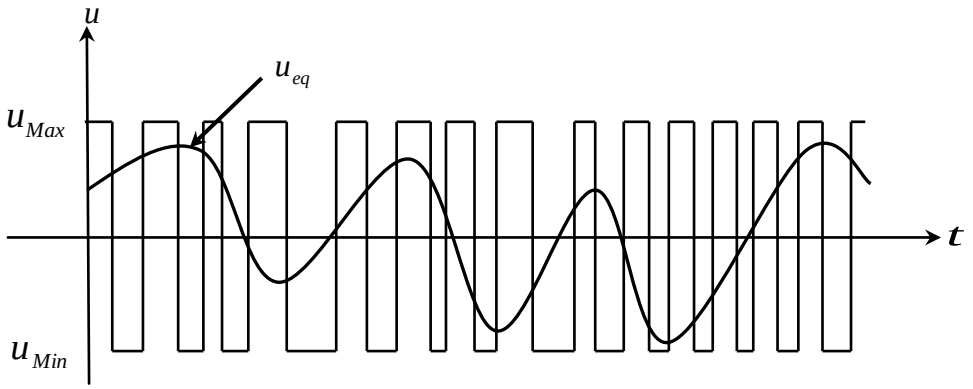


Figure (3- 8) :La valeur continue u_{eq} prise par la commande lors de la commutation entre u_{Max} et u_{Min}.

b-Expression analytique de la commande :

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (3-15) [12].

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + g(x,t)u(t) \tag{3-15}$$

Le vecteur u est composé de deux grandeurs : u_{eq} et u_N, soit :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \tag{3-16}$$

Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x}\left\{f(x,t) + g(x,t)u_{eq}(t)\right\} + \frac{\partial S}{\partial x}\left\{g(x,t)u_N\right\} \tag{3-17}$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro) .Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = \left\{\frac{\partial S}{\partial x} f(x,t)\right\}^{-1}\left\{\frac{\partial S}{\partial x} f(x,t)\right\}, \qquad u_N = 0 \tag{3-18}$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur (3-18) dans l'équation (3-15) .Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x}\{g(x,t)u_N\} \tag{3-19}$$

Le problème revient à trouver u_N tel quel :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x)\frac{\partial S}{\partial x}\{g(x,t)u_N\} < 0 \tag{3-20}$$

La solution la plus simple est de choisir u_N sous la forme de relais (Figure 3-9) .Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_N = K \cdot sign(S(x)) \tag{3-21}$$

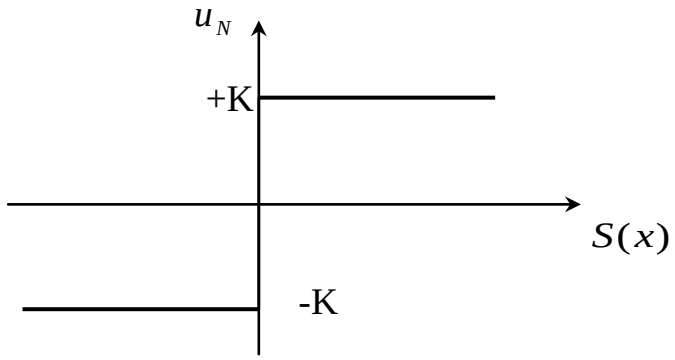


Figure (3-9) : Représentation de la fonction « SIGN »

En remplaçant l'expression (3-21) dans (3-20), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x,t)K|S(x)| < 0 \tag{3- 22}$$

Où le facteur $\frac{\partial S}{\partial x} g(x,t)$ est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (3-22) .Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et, s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande .Ces oscillations peuvent

exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande [5].

III-4- 4- Elimination du phénomène de chattering :

Le phénomène de Chattering est provoqué par une commutation non infiniment rapide de la commande quand les techniques des modes glissants sont utilisées .Ce phénomène est indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de haute fréquence [9].

Le broutement (phénomène de Chattering) peut être réduit en remplaçant la fonction « *sign* » par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences .On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation [10]

(Figure 3-10) :

- Fonction **SAT** :

$$\begin{cases} Sat(S) = 1 & si \quad S > \mu \\ Sat(S) = -1 & si \quad S < \mu \\ Sat(S) = \dfrac{S}{\mu} & si \quad |S| < \mu \end{cases}$$

μ : Un paramètre petit et positif.

- Fonction **SMOOTH** :

On peut aussi remplacer la fonction « *sign* » par une fonction de classe C^1 .On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction (Figure 3-11) ; soit :

$$Smooth(S) = \frac{S}{|S| + \mu}$$

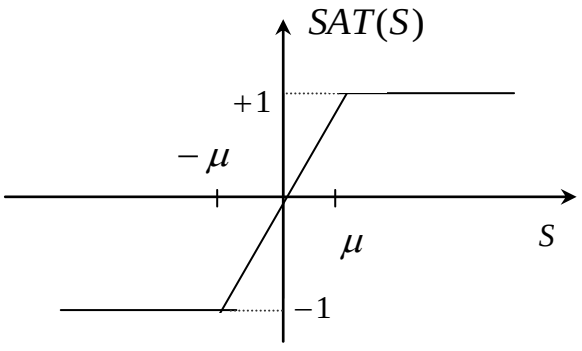


Figure (3- 10): Fonction « SAT »

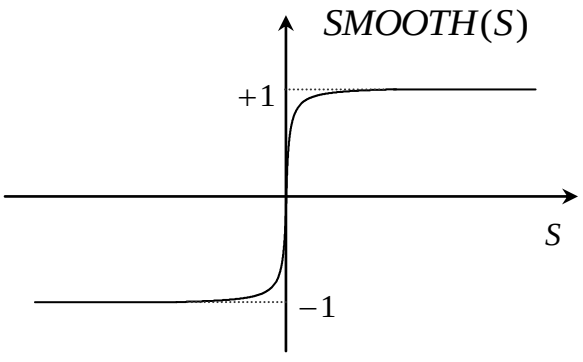


Figure (3- 11): Fonction « SMOOTH »

III-5-Application de la commande par mode de glissement à la MAS :

III-5-1 Description :

Dans cette étude nous contenterons d'appliquer la technique de réglage par mode glissant à la machine asynchrone et nous établirons les expressions de valeur de commande en s'appuyant sur le modèle établi au deuxième chapitre .Rappelons que ce modèle a été calculé par le principe d'orientation du flux rotorique .Ceci a permis de découpler la machine selon les deux axes d et q et de faire la régulation sur chacun d'eux. La structure cascade impose un choix de trois surfaces sur les deux axes .La boucle interne permet de contrôler les courants « i_{ds} et i_{qs} » et la boucle externe la vitesse « Ω_r ».

La figure (3-12) représente la structure en cascade des régulateurs en mode de glissement appliquée à la machine asynchrone .L'application de cette stratégie de commande commence par la détermination du degré relatif des variables à réguler .Les variables sont le courant directe pour l'axe d et la vitesse et le courant en quadrature pour l'axe q .La grandeur de sortie de boucle externe représente les références de courant des boucles internes .Les sorties de ces dernières représentent les tensions de commande directe et en quadrature à appliquer sur la machine.

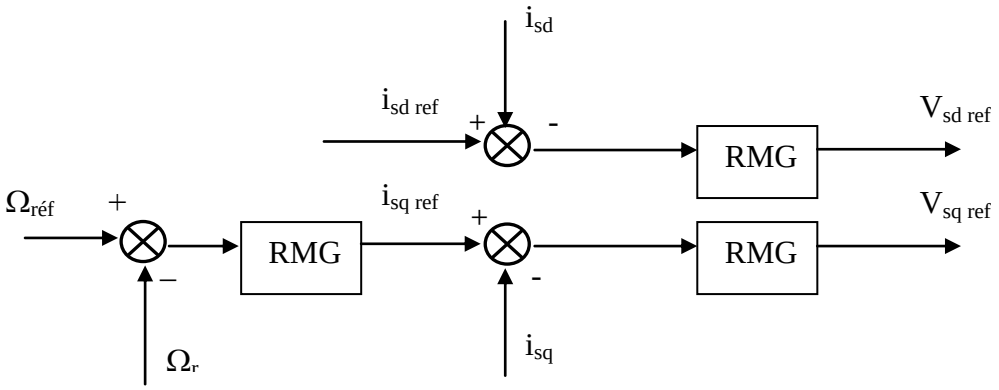


Figure (3-12): Schéma de la structure en cascade de la commande par mode de glissement

III-5-2 Sélection des surfaces de commutation :

III-5-2-1 Surface de régulation de la vitesse :

$$S(\omega_r) = \omega_{rréf} - \omega_r \tag{3-23}$$

La dérivée de la surface est :

$$S(\dot{\omega}_r) = \dot{\omega}_{rref} - \dot{\omega}_r \tag{3-24}$$

En remplaçant $\dot{\omega}_r$ on obtient :

$$S(\dot{\omega}_r) = \dot{\omega}_{rref} - p.\frac{M}{J.lr}\Phi_{rd}.i_{sq} + \frac{f}{J}\omega_r + \frac{C_r}{J} \tag{3-25}$$

Avec:

$$i_{sq} = i_{sqeq} + i_{sqn} \tag{3-26}$$

Durant le régime de mode glissant ;

$$\dot{\omega}_r = \dot{\omega}_{rref} \text{ et } i_{sqn} = 0$$

D'après l'expression (18) on obtient :

$$i_{sqeq} = \frac{J.l_r}{p.M.\Phi_{rd}}\left[\dot{\omega}_{rref} + \frac{f}{J}\omega_{rref} + \frac{C_r}{J}\right] \tag{3-27}$$

Et :

$$i_{sqn} = K_1.\frac{S(\omega_r)}{|S(\omega_r)| + \mu_1} \tag{3-28}$$

III-5-2-2 Surface de régulation du courant i_{sq}:

$$S(i_{sq}) = i_{sqref} - i_{sq} \tag{3-29}$$

Durant le régime de mode glissant

$$\dot{i}_{sq} = \dot{i}_{sqref} \text{ et } V_{sqn} = 0$$

A travers l'expression (3-7) on obtient

$$V_{sqeq} = \sigma.Ls\left[\dot{i}_{sq} + \left(\frac{1}{\sigma.Ts} + \frac{1-\sigma}{\sigma}.\frac{1}{Tr}\right).i^*_{sq} + \omega_s.i_{sd} + \frac{1-\sigma}{\sigma}.\frac{1}{Msr}.\omega_r.\Phi_{rd}\right] \tag{3-30}$$

Et :

$$V_{sqn} = K_2 \cdot \frac{S(i_{sq})}{|S(i_{sq})| + \mu_2} \tag{3-31}$$

Avec :

$$V_{sq} = V_{sqeq} + V_{sqn} \tag{3-32}$$

III-5-2-3 Surface de régulation du courant i_{sd}:

$$S(i_{sd}) = i_{sdref} - i_{sd} \tag{3-33}$$

En respectant les mêmes étapes que les précédente, on obtient :

$$V_{sdeq} = \sigma . l_s \left[\dot{i}_{sdref} + \left(\frac{1}{\sigma . T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{T_r} \right) . i_{sdref} - \omega_s . i_{sq} - \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M . T_r} . \Phi_{rd} \right] \tag{3-34}$$

Et :

$$V_{sdn} = K_3 \cdot \frac{S(i_{sd})}{|S(i_{sd})| + \mu_4} \tag{3-35}$$

Avec :

$$V_{sq} = V_{sqeq} + V_{sqn} \tag{3-36}$$

Le choix des gains (K_1, K_2 et K_3) se fera de façon à imposer la valeur désirée à la sortie du régulateur

III-5-3 Simulation et interprétation des résultats :

La figure (3-13) représente le schéma bloc de simulation de la réglage par mode glissant associe à la commande vectorielle indirecte.

Le choix de les gains se fera de façon à imposer la valeur désirée à la sortie du régulateur .on notons que les gains des régulateurs sont donnés en annexe.

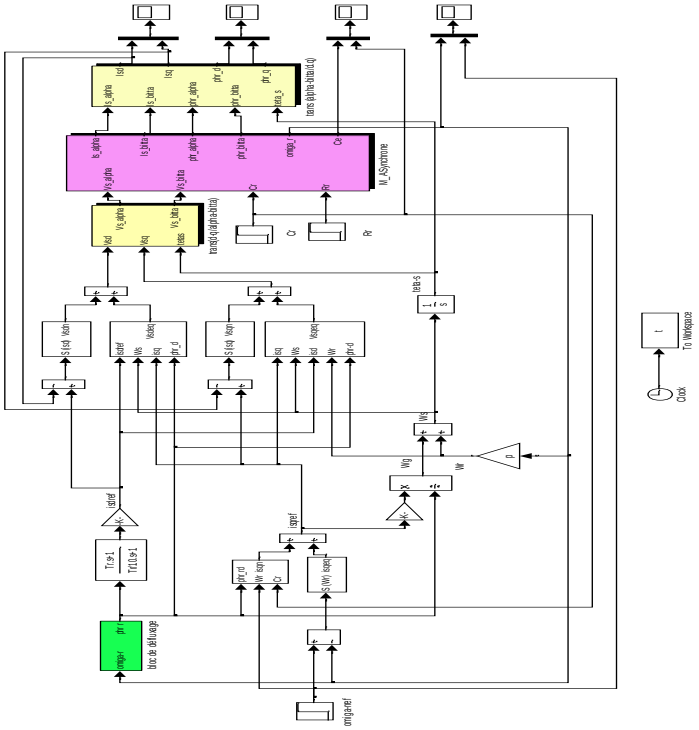


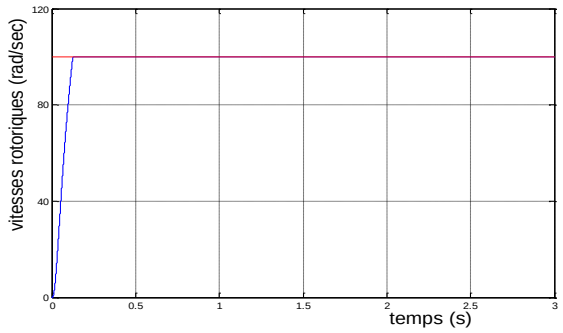
Figure (3-13): Schéma de simulation

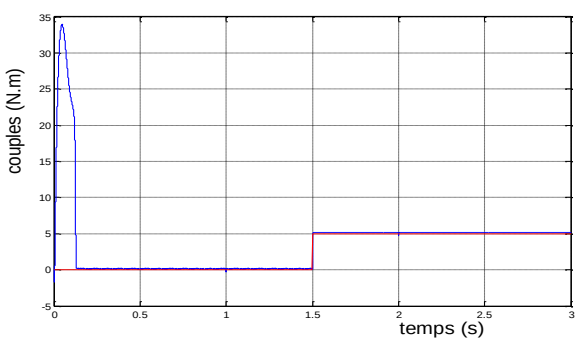
III-5-3-1 Essai a vide et en charge :

La figure (3-14) représente les résultats de simulation de l'essai a vide et en charge, cette figure montre que avant l'application de la charge, la vitesse possède une caractéristique presque linéaire et atteint la vitesse de référence dans un temps de réponse très petit environs (0.1s) .Après l'application de la charge (Cr = 5 N.m), on constate aucune influence sur l'allure de vitesse.

Le couple subit au moment de démarrage un pic, puis atteint rapidement la valeur de couple résistant avant et après l'application de la charge.

Le flux est orienté sur l'axe d, tout on respectant le principe de la commande vectorielle.





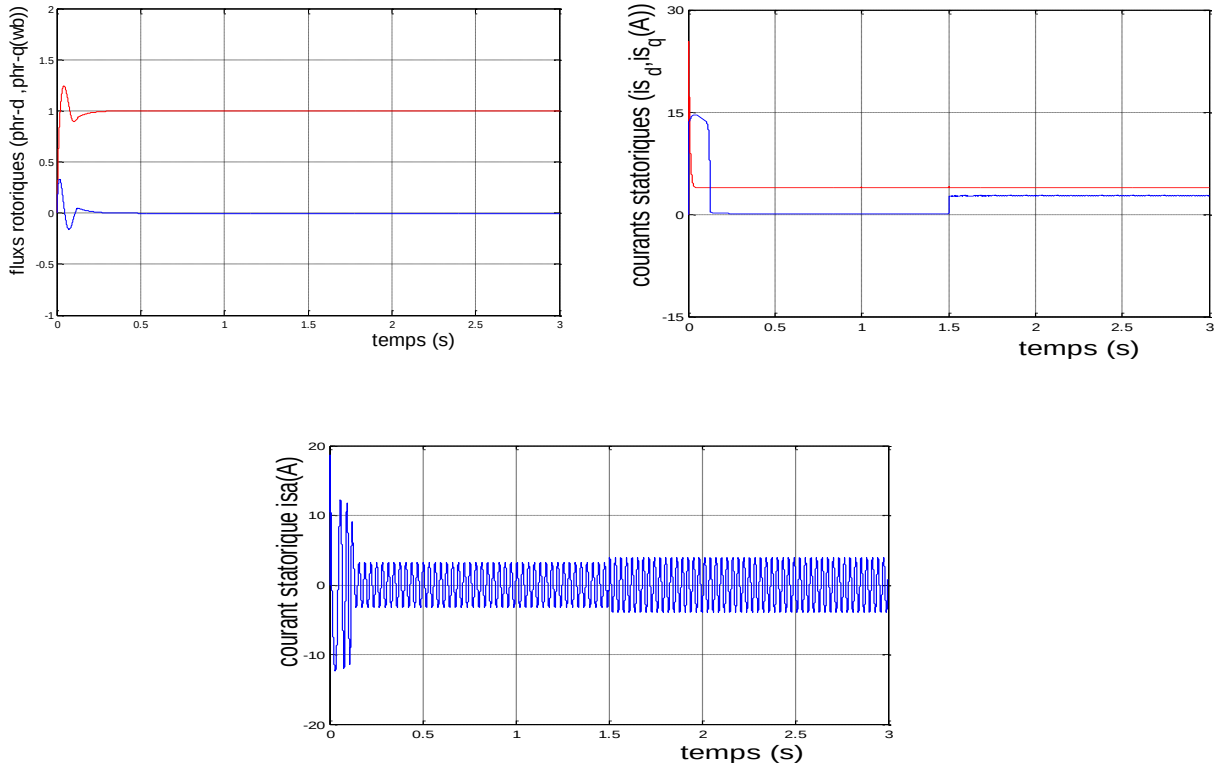


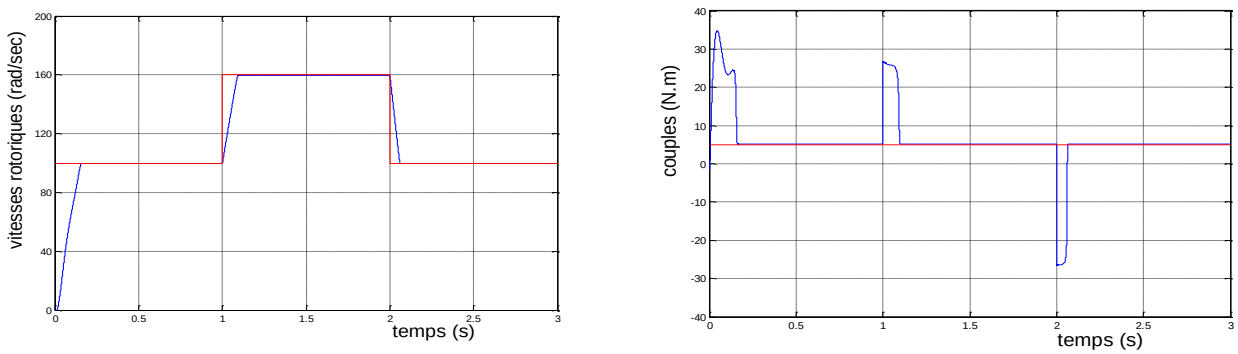
Figure (3-14): Résultats de simulation de le RMG de la MAS alimentée en tension lors de démarrage à vide et en charge

III-5-3-2 Test de robustesse pour la variation de la vitesse :

La figure (2-15) présente les résultats de simulation lors de la variation de la vitesse (100rad/s, 160et100rad/s) .On remarque que le système répond positivement à ce test, la vitesse suit rapidement sa nouvelle référence, ce la vent dire que la régulation est robuste .Le couple subit un pic de transition lors du passage d'un mode à l'autre, puis regagne sa valeur sans erreur.

On remarque aussi une diminution en module de la composante directe du flux lors la variation en sur vitesse (mode défluxé), puis retourne à sa valeur désiré .La composante quadrature du flux présente une petite variation en module.

Les courbes des courants présentes des pics aux moments la variation de la vitesse.



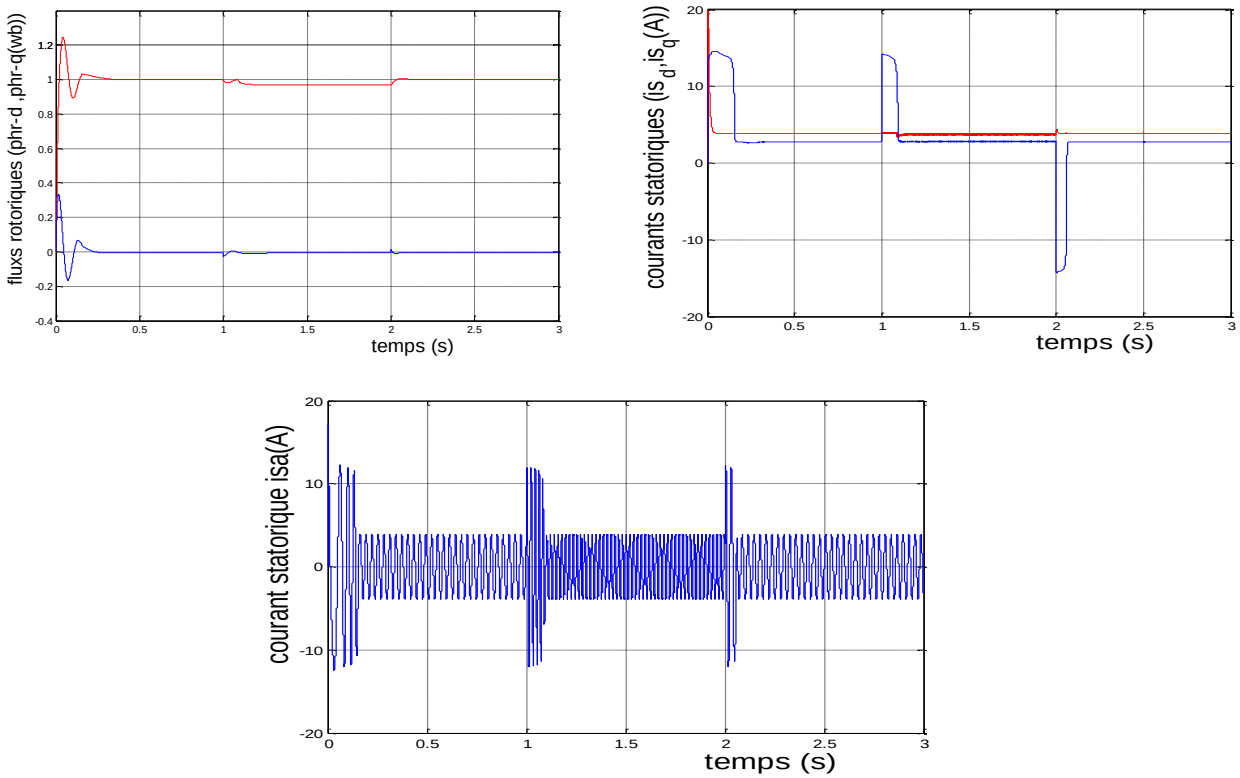
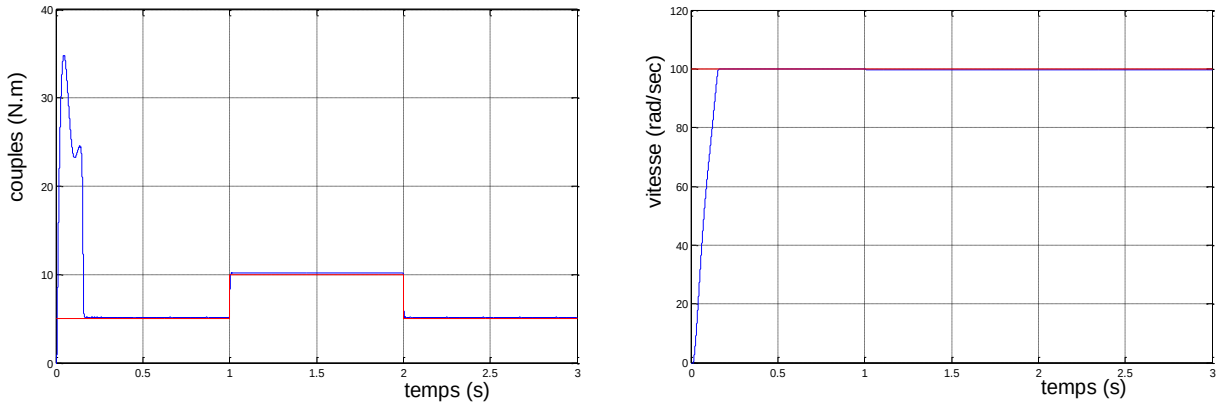


Figure (3-15) : Test de robustesse pour la variation de la vitesse

III-5-3-3 Test de robustesse pour la variation de la charge :

Les résultats de simulation de la figure (3-16) montre que la vitesse atteinte très rapidement sa référence sans aucun dépassement .L'allure de couple électromagnétique présente le fort couple aux premiers instants de démarrage, puis suit sa référence .Le courant de phase statorique suit parfaitement la variation de la charge .Le découplage est toujours réalisé.



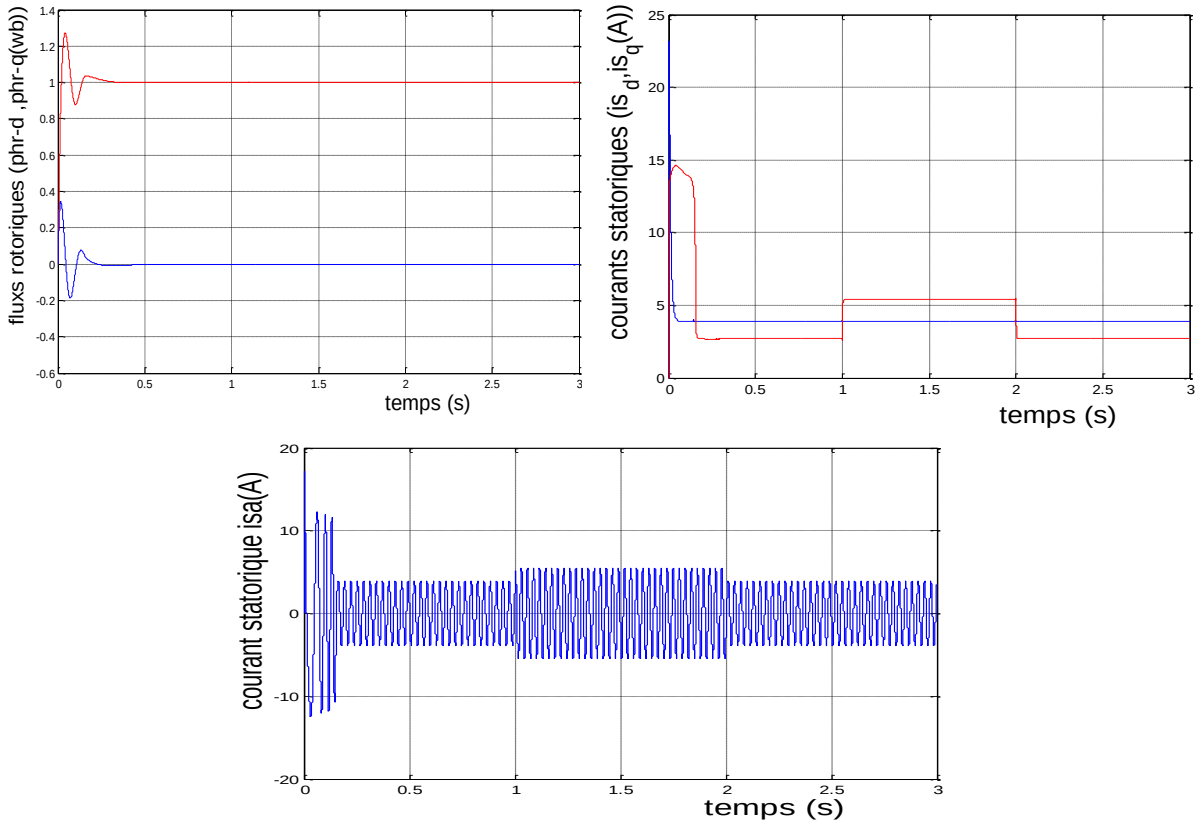
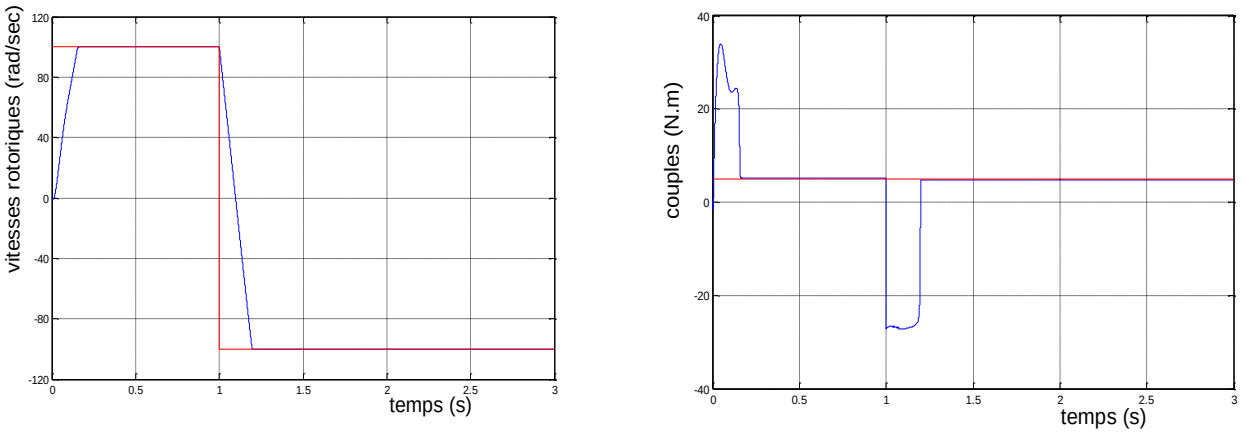


Figure (3-16): Test de robustesse pour la variation de la charge

III-5-3-4 Test de robustesse pour l'inversion de vitesse :

La figure (3-17) illustre les courbes pour une inversion de la vitesse, on remarque que la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse pratiquement le même .L'allure de couple et des courants statoriques présente des pics lors de l'inversion de la vitesse avant de se stabiliser à la valeur désirée.

Au moment de l'inversion de la vitesse en constate une variation négligeable au niveau les composantes du flux rotorique, donc en peut dire que le découplage est parfaitement réalisé.



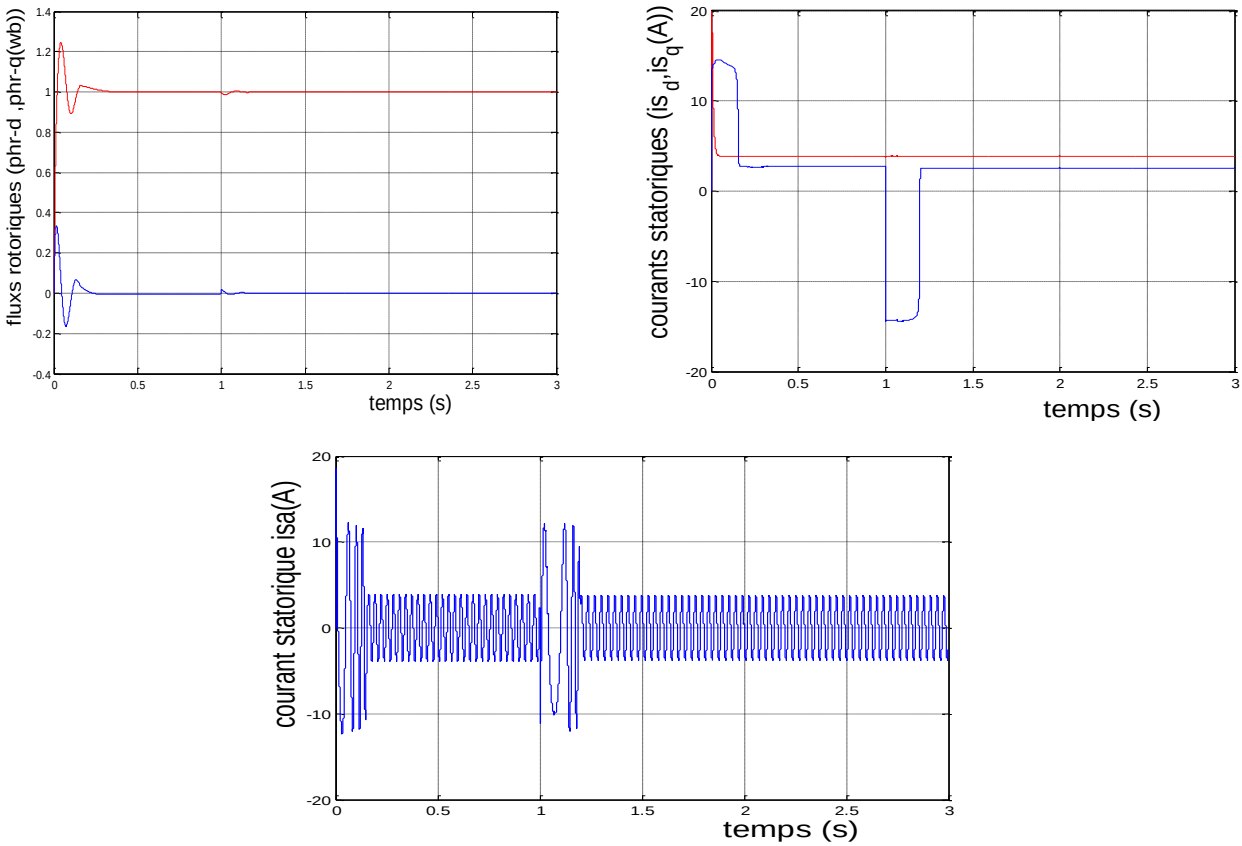
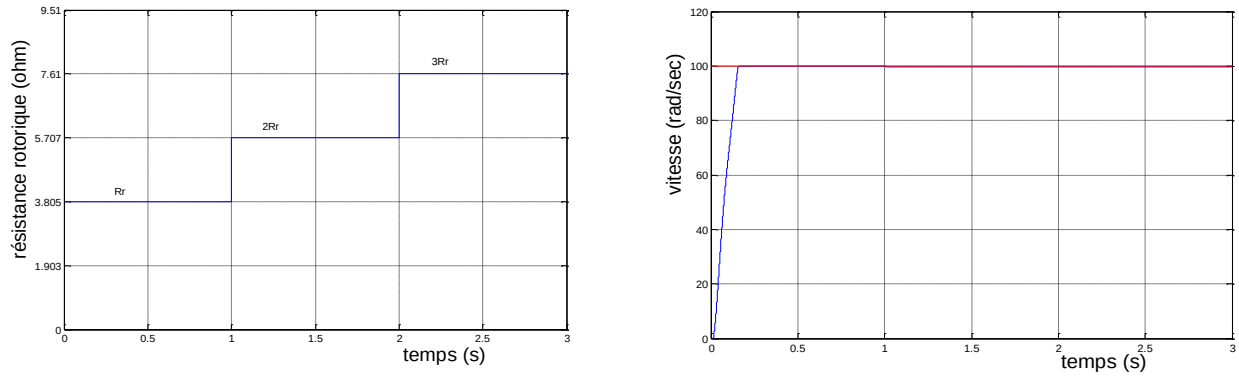


Figure (3-17) : Test de robustesse pour l'inversion de vitesse

III-5-3-5 Test de robustesse pour la variation de la résistance rotorique :

La figure (3-18) montre que une variation de la résistance rotorique mène à une perturbation de découplage, il n'est pas parfait, cela peut être justifié par l'absence de l'observateur de flux ; car pour nous on a appliqué la méthode indirecte.

Pour cela, on peut conclure que cette méthode reste toujours incapable de résoudre ce problème d'où l'appel à l'application de le RMG avec la méthode directe (observation de flux).



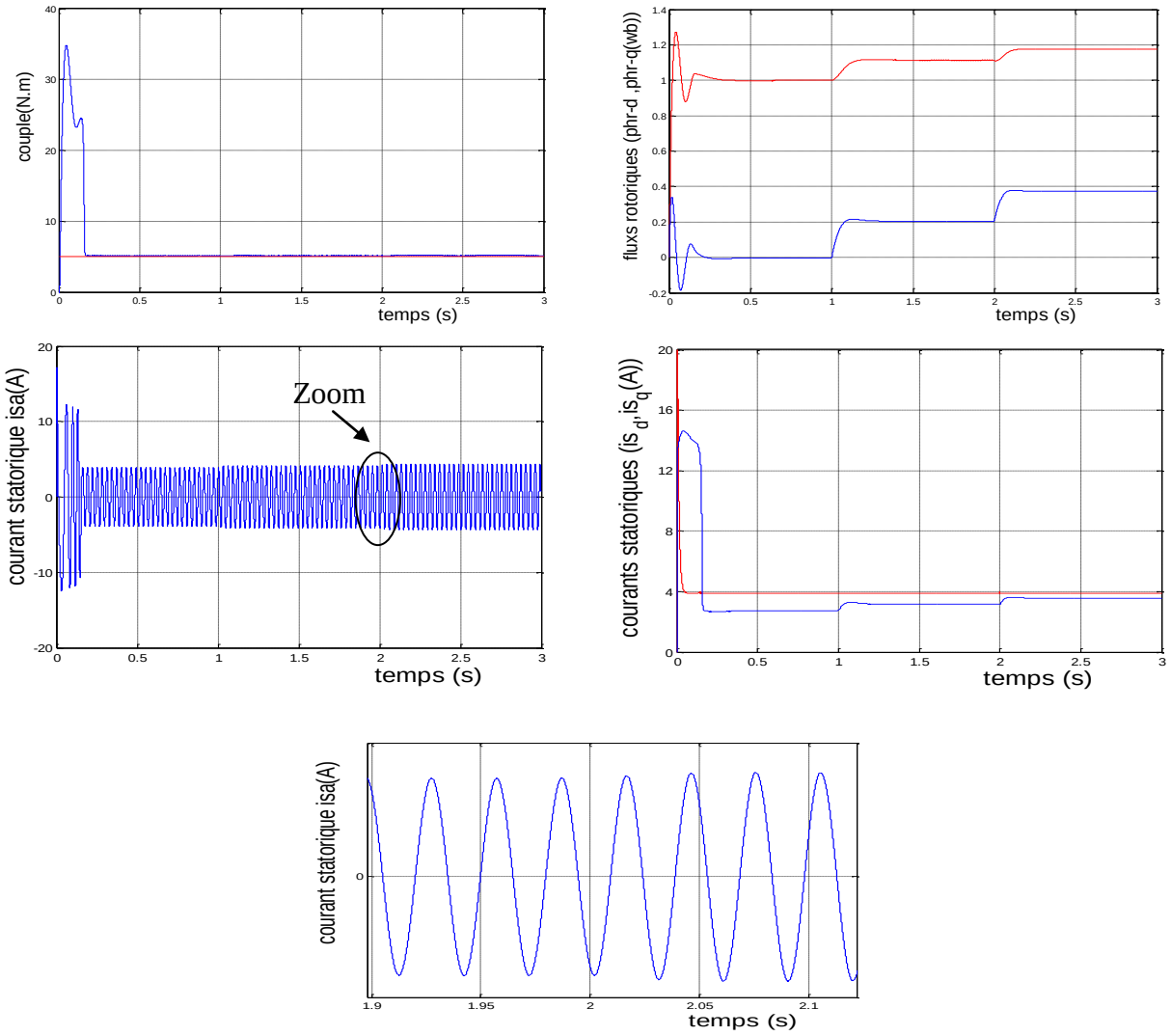


***Figure (3-18): Test de robustesse pour la variation de la résistance rotorique* rotorique**

III-6-domaine d'application du réglage par mode glissant :

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables : complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10Hz.

Les entraînements électriques pour des machines-outils ou des robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un régalage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation) sont des avantages incontestables en faveur du réglage par mode glissant.

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que : les processus chimiques et métallurgies, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions, le procédé par mode glissant peut apporter plusieurs avantages cités précédemment. [13]

III-7-les avantages de la commande par mode de glissant :

Cette commande présente les caractéristiques suivantes :[13]

- ✓ La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations ;
- ✓ Il suffit de connaître une borne pour v, ce qui simplifie le réglage ;
- ✓ Le choix de la surface de commutation est assez libre ;
- ✓ La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de v.

III-8-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande à structure variable (CSV) fonctionnant en mode de glissement appliquée à la machine asynchrone .Après la présentation de la théorie de base de cette commande, nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande; nous constatons que le choix convenable des surfaces de commutation permet d'obtenir des hautes performances suite à la nature de la CSV qui s'adapte bien aux systèmes non linéaires.

Les résultats de simulation nous montrent que les réponses obtenues avec le RMG sont plus rapides à vide et plus robuste lors des variations de la charge, mais le problème réside dans le cas où on change la résistance rotorique, dont on a une perturbation de découplage.

Pour diminuer le phénomène de « **Chattering** » une commande adoucissante est appliquée.