

## IV.1 Introduction

Dans la formulation de n'importe quel problème de commande il y a typiquement des anomalies entre le système réel et le modèle mathématique développé pour la conception de contrôle. Cette distinction peut être due à la variation des paramètres de la dynamique du système ou à l'approximation du comportement complexe de système par un modèle. Ceci a mené à un intérêt intense pour l'élaboration des méthodes de contrôle robustes qui cherchent à résoudre ce problème.

En effet, des techniques de commande sont demandées, dans le but de résoudre le problème des variations paramétriques, avec une erreur statique nulle, une réponse ferme et rapide, un système de contrôle stable et robuste. Cette méthode s'appelle la commande par mode glissement connue par sa simplicité et sa robustesse. Elle a été inventée pour la première fois en union soviétique dans le but de résoudre les problèmes de plusieurs applications.

Afin d'obtenir ce régime glissant, une loi de commande est requise pour avoir une nature discontinue, c'est à dire que la structure du système a besoin d'être modifiée dans le temps. Un tel système est appelé système à structure variable (VSS) (Variable Structure System).

## IV.2 Théorie de la commande par mode glissement

### IV.2.1.Objectifs de la commande par MG

L'objectif de la commande par mode glissant (MG) se résume en deux points essentiels:

- synthétiser une surface  $S(x, t)$ , telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- déterminer une loi de commande (commutation)  $u(x, t)$  qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

### IV.2.2. 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 la définition suivante:

- **Définition 1 :**

Un système à structure variable 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.

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

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[48].

- **Définition 2 :**

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

$$\dot{X} = \begin{cases} F_1(X,t) & \text{si la condition(1) est vérifiée} \\ F_2(X,t) & \text{si la condition(n) est vérifiée} \end{cases} \quad (\text{IV.01})$$

Ou X est le vecteur d'état et les fonctions  $F_i$  appartiennent à un ensemble de sous systèmes, et appelées structures.En effet ,il y a des commutations entre ces différentes structures suivant la condition vérifiée .

L'étude de tels systèmes présente un grand intérêt ,notamment en physique ,en mécanique et en électricité .Cela grace aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun de sous systèmes  $F_i(X)$  pris seul[49].

### IV.2.3. 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 .Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes[50]:

- **Mode de convergence (MC) :** C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation  $S(x)=0$ . Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence ;

- **Mode de glissement (MG) :**C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x)=0$  ;

- **Mode du régime permanent (MRP) :**Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande. Avant d'entamer les méthodes utilisées dans la synthèse de système de contrôle par mode de glissement, nous allons expliquer quelques notions de bases du régime glissant[51].

# Chapitre IV:Commande par mode glissant

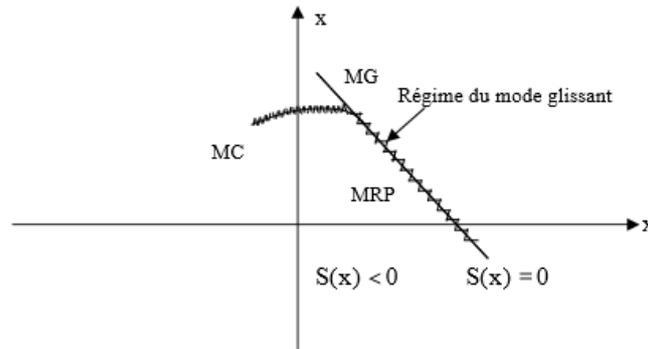


Figure VI.01: Différents modes de trajectoire dans le plan de phase

## IV.3. Commande par mode glissant d'ordre 1

La commande par mode glissant d'ordre 1 (SMC) est une commande à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique  $s(x)$ .

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci.

### IV.3.1. Conception de commande par mode glissant

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes :

- Le choix de la surface de glissement
- L'établissement des conditions de la convergence
- La détermination de la loi de commande

#### IV.3.1.1 Principe de la commande par MG

##### ➤ Choix de la surface de glissement

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = f(x,t) + g(x,t)U \quad (IV.02)$$

Où :

$f$  et  $g$  sont des fonctions non linéaires,  $g$  est supposée inversible.

$U$  : L'entrée du système

## Chapitre IV: Commande par mode glissant

$x$ : état du système.

La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit[52] :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{IV.03})$$

Avec :  $e(x) = X_{ref} - X$

$e(x)$  : écart de la variation à régler.

$\lambda$  : Constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

$r$  : degré relatif ,égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaitre la commande.

Après le choix de la surface "S", le vecteur de commande "u" dont chaque composante  $U_i$  subit une discontinuité sur  $S_i(x)=0$ , est donné par[53] :

$$\begin{cases} u_i(x) = \overset{+}{u}_i & \text{si } S_i(x) > 0 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \\ u_i(x) = \overset{-}{u}_i & \text{si } S_i(x) < 0 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (\text{IV.04})$$

L'équation (IV.) nous montre que le changement de valeur du vecteur de commande  $u$  dépend du signe de la surface  $S(x)$ . La surface  $S(x)=0$  s'appelle surface de commutation et la commande est indéterminée sur cette surface[54].

### ➤ Condition d'existence du mode de glissement :

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/

#### • Fonction directe de commutation

C'est l'approche la plus ancienne et directe, a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par:

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) < 0 \quad (\text{IV.05})$$

#### • Fonction de LYAPUNOV

L'approche de Lyapunov est une condition globale d'accès au mode glissant. 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.  $V'(x) < 0$ ). Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires[55].

## Chapitre IV: Commande par mode glissant

En définissant la fonction de LYAPUNOV par :

$$V(X) = \frac{1}{2}S^2(X) \quad (\text{IV.06})$$

L'idée est de choisir cette fonction pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et de concevoir une commande  $U$  telle que le carré de la surface corresponde à une fonction de LYAPUNOV. La dérivée de la fonction  $V(x)$  donne :

$$\dot{V}(X) = S(X)\dot{S}(X) \quad (\text{IV.07})$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître et converger vers zéro (pour garantir l'existence du mode de glissant), il suffit d'assurer que:

$$S(X)\dot{S}(X) < 0 \quad (\text{IV.08})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesurée par  $S^2(x)$ , diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés [56].

### ➤ Détermination de loi de commande

#### • Commande équivalente

Un vecteur de commande équivalente  $U_{eq}$  se définit comme étant les équations du régime glissant idéal. Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation [57].

Le vecteur  $u$  est composé de deux grandeurs  $U_{eq}$  et  $U_n$  soit :

$$U(t) = U_{eq} + U_n \quad (\text{IV.09})$$

Utilisons des équations (IV.02) et (IV.09) pour obtenir la commande équivalente  $U_{eq}$ , nous avons:

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \{f(x, t) + B(x, t)U_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial t} \{B(x, t)U_n\} \quad (\text{IV.10})$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (parce que  $\dot{S}(x) = 0$ ), on obtient:

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\} U_n = 0 \quad (\text{IV.11})$$

En portant  $U_{eq}$  dans l'équation (IV.01), on obtient l'équation du régime glissant idéal :

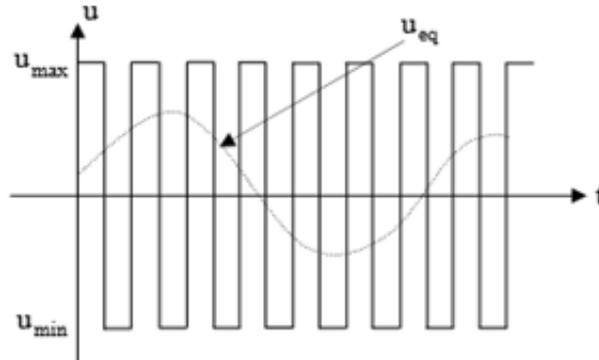
$$\dot{x} = f(x, t) - B(x, t) \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\} \quad (\text{VI.12})$$

## Chapitre IV: Commande par mode glissant

La commande équivalente  $U_{eq}$  est calculée en reconnaissant que le comportement dynamique durant glissement.

La commande équivalente peut être interpréter comme la valeur moyenne (continue) que prend la commande lors de la commutation rapide entre  $U_{max}$  et  $U_{min}$ .

$U_{eq}$  correspond à la commande de linéarisation proposée par Fillipov et Utkin (commande équivalente), telle que la trajectoire de l'écart reste sur la surface de glissement  $S(x) = 0$  [58].



*Figure IV.02: Commande équivalente  $U_{eq}$*

### IV.3.2 La commande discontinue de base

L'addition du terme  $U_n$  à la loi de commande permet d'assurer l'attractivité de la surface de glissement  $S(x)$ . Celle-ci est attractive si seulement si  $S(x)\dot{S}(x) < 0$ .

Cette condition permet de définir la région dans laquelle le mode de glissement existe.

Durant le mode de convergence, on remplace le terme  $U_{eq}$  par sa valeur donné par (IV.11) dans l'équation (IV.10). Nous obtenons donc une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} [B(x, t)U_n] \quad (IV.13)$$

Le problème revient à trouver  $U_n$  tel que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} [B(x, t)U_n] < 0 \quad (IV.14)$$

La solution la plus simple est de choisir  $U_n$  sous la forme de relais. Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit:

$$U_n = K \cdot \text{Sign}(S(x)) = K \frac{S(x)}{|S(x)|} \quad (IV.15)$$

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

En remplaçant l'expression (IV.15) dans (IV.14) on obtient :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \cdot K \frac{S(x)}{|S(x)|} < 0 \quad (\text{IV.16})$$

Où le facteur  $\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$  est toujours négatif pour la classe de systèmes que nous considérons. Le gain K doit être positif afin de vérifier les conditions de l'attractivité et de la stabilité. 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[58].

- **Commande signe**

Plusieurs choix pour la commande discontinue  $U_n$  peuvent être faits. Le plus simple consiste à exprimer la commande discontinue  $U_n = [U_1, U_2 \dots U_n]$  avec la fonction *sign* par rapport à

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_n].$$

$$\begin{cases} \text{sign}(S(x)) = +1 & \text{si } S(x) > 0 \\ \text{sign}(S(x)) = -1 & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

$U_n$  s'exprime donc comme :

$$U_n = K \text{sign}(S(x)) \quad (\text{IV.18})$$

Où: K est un gain positif.

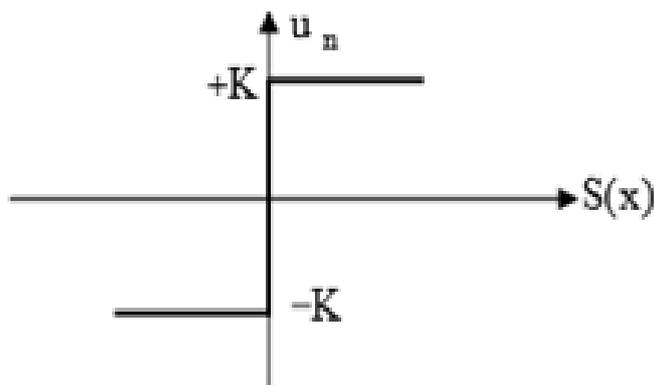


Figure.IV.03 : Définition de la fonction sign

Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition. 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

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

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 [59].

- **Le phénomène de réticence ou 'chattering'**

La technique de commande décrite dans la partie précédente assure un comportement nondésiré du système en boucle fermée. Cependant, elle a besoin (dans le cas idéal) d'une commutation infinie au niveau des actionneurs. Cette oscillation au voisinage de la surface est appelée réticence ou broutement. La Figure (IV.4) montre l'effet de la réticence dans la convergence du système. La réticence n'est pas désirable, car elle induit des dynamiques de haute fréquence du système, augmentant la consommation énergétique qui peut endommager les actionneurs[60].

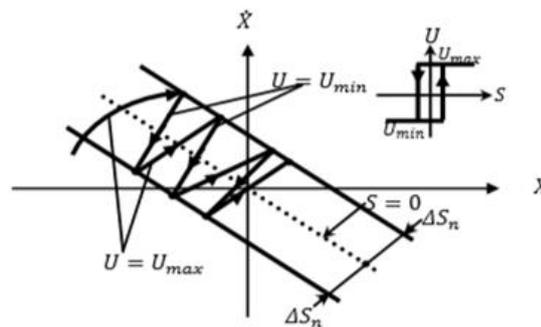


Figure.IV.04 :Démonstration du phénomène de réticence

La réticence est le principal desavantages des modes glissants. De nombreuses études ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer ce problème, par exemple : les solutions par limitation de la condition de glissement, les solutions par observateur, etc. Dans cette section nous allons décrire les techniques de limitation de la condition de glissement, car elles sont les plus utilisées pour les applications en temps réel. Ces techniques sont basées sur la définition d'une zone autour de la surface  $S$ , à l'intérieur de laquelle une condition de glissement moins stricte que la condition signe est appliquée. Ainsi, le terme  $sign(S)$  dans la partie du glissement de la commande est souvent remplacé par un terme à variation plus douce:

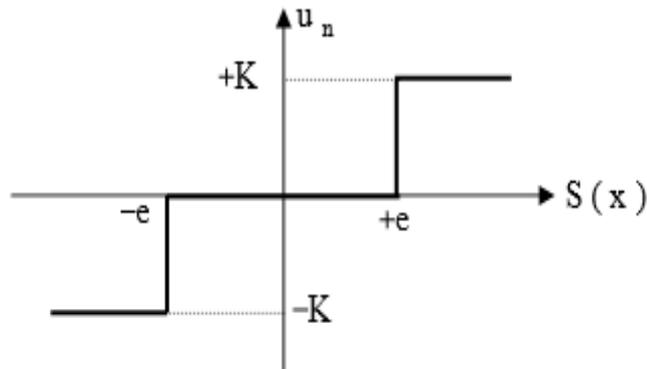
- **Commande avec un seuil**

Cette commande est caractérisée par un seuil et la commande discontinue est donner par l'expression :

## Chapitre IV: Commande par mode glissant

$$\begin{cases} U_n = 0 & \text{si } |S(x) < e| \\ U_n = K \cdot \text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > e \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

Avec  $e$  : positive et petit.

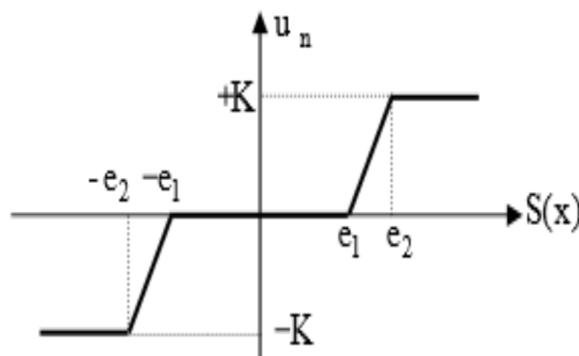


*Figure.IV.05 : Fonction sign de la commande avec un seul seuil.*

- **Commande adoucie**

Dans le but de diminuer progressivement la valeur de la commande  $U_n$  en fonction de la distance entre la trajectoire de la variation à régler et la surface de glissement, on doit encadrer la surface par une bande avec un ou deux seuils.

On peut distinguer trois zones qui dépendent de la distance du point à la surface de glissement. Si la distance est supérieure au seuil  $e_2$ , alors la fonction *sign* est activée. Si la distance est inférieure au seuil  $e_1$ , alors  $U_n$  est nulle (zone morte). Si le point est dans la bande  $(e_1, e_2)$ , alors  $U_n$  est une fonction linéaire de la distance (droite de pente  $\frac{K}{e_1 - e_2}$ ) [61].



*Figure IV.06: Fonction sign de la commande adoucie*

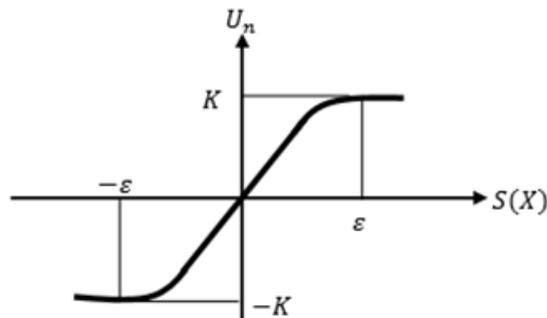
## Chapitre IV: Commande par mode glissant

- **La commande intégrale**

Les oscillations de haute fréquence qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évitées en rendant continue la commande discontinue  $U_n$ , en remplaçant la fonction signe par la fonction continue voisine:

$$U_n = \frac{S(x)}{|S(x)+\lambda|} \quad (\text{IV.21})$$

Où  $\lambda$  est un paramètre définissant le degré d'atténuation des oscillations. Lorsque  $\lambda$  tend vers zéro, on tend vers la même commande discontinue. La fonction  $U_n$  continue est illustrée sur la figure (IV.07).



*Figure.IV.07 : Définition de la fonction intégrale*

Pour augmenter la précision de la réponse du système, on peut utiliser une commande continue incluant une composante intégrale qui devient active lorsque le point est proche de la surface. En général, le compensateur intégral diminue l'erreur en régime permanent, mais il est souvent indésirable pour les régimes transitoires brusques, car il provoque des oscillations supplémentaires sur la réponse. La commande  $U_n$  dans ce cas devient :

$$U_n = \frac{S(x)}{|S(x)+\lambda|} + \eta \quad (\text{IV.21})$$

$$\lambda = \lambda_0 + |\gamma| \quad (\text{IV.22})$$

$$\eta = \begin{cases} \gamma_0 \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| < \epsilon \\ 0 & \text{si } |S(x)| > \epsilon \end{cases} \quad (\text{IV.23})$$

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| < \epsilon \\ 0 & \text{si } |S(x)| > \epsilon \end{cases} \quad (\text{IV.24})$$

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

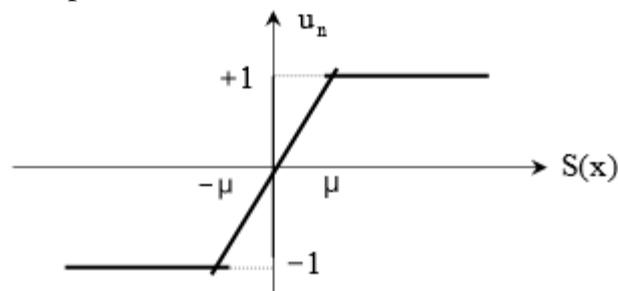
Où  $\gamma, \eta, \lambda$  et  $\varepsilon$  sont des constantes ou paramètres adaptatifs en fonction des références. Ce type de commande est difficile à mettre en œuvre car il y a un grand nombre de paramètres à déterminer[62].

- **La commande SAT**

Elle est connue sous le nom de "boundary layer solution", consiste à remplacer la fonction *sign* par une approximation continue, du type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface, parmi les fonctions utilisées, nous citerons la fonction de saturation:

$$\begin{cases} Sat(S) = 1 \text{ si } S > \mu \\ Sat(S) = -1 \text{ si } S < -\mu \\ Sat(S) = \frac{S}{\mu} \text{ si } |S| < \mu \end{cases} \text{ (VI.25)}$$

$\mu$  : Un paramètre petit et positif.



*Figure.IV.08: Définition de la fonction Saturation(SAT)*

### IV.3.3 Commande par MG d'ordre un de la machine asynchrone à cage en défaut

Le modèle utilisé est le modèle de la machine asynchrone à cage (équation (II.28)). Mais les grandeurs électriques de la commande sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator, et qui sera qualifié de modèle (a-b). Le modèle est donné par[63].

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t). U$$

Avec :

$$\begin{cases} U = [V_{sa} V_{sb}]^t \\ x = [i_{sa} i_{sb} \phi_{ra} \phi_{rb} \Omega]^t = [x_1 x_2 x_3 x_4 x_5]^t \end{cases} \text{ (IV.26)}$$

## Chapitre IV: Commande par mode glissant

Les variables  $x$  sont composés de deux états électriques ( $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ ) et deux états mécaniques ( $\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$ ) et un état représentant la vitesse de rotation du rotor  $\Omega_r$ , gouverné par une équation mécanique.

f et g sont des fonctions des variables  $x$ .

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\lambda \cdot x_1 + \frac{\Gamma}{T_r} \cdot x_3 + p \cdot \Gamma \cdot x_4 \cdot x_5 + \delta \cdot V_{s\alpha} \\ \dot{x}_2 = -\lambda \cdot x_2 + \frac{\Gamma}{T_r} \cdot x_4 - p \cdot \Gamma \cdot x_3 \cdot x_5 + \delta \cdot V_{s\beta} \\ \dot{x}_3 = \frac{-3 \cdot M_{sr}}{2 \cdot T_r} \cdot x_1 - \frac{1}{T_r} \cdot x_3 - p \cdot x_4 \cdot x_5 \\ \dot{x}_4 = \frac{-3 \cdot M_{sr}}{2 \cdot T_r} \cdot x_2 - \frac{1}{T_r} \cdot x_4 + p \cdot x_3 \cdot x_5 \\ \dot{x}_5 = \eta \cdot (x_2 \cdot x_3 - x_1 \cdot x_4) - \frac{C_r}{J} \end{cases} \quad (IV.27)$$

Avec :

$$\begin{cases} \lambda = \frac{R_s}{\sigma \cdot L_{sc}} + \frac{1}{T_r} \cdot \left( \frac{1-\sigma}{\sigma} \right) \\ \Gamma = - \left( \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{2}{3 \cdot M_{sr}} \right) \\ \delta = \frac{R_s}{\sigma \cdot L_{sc}} \\ \eta = - \frac{3}{4} \cdot \frac{3 \cdot M_{sr} \cdot N_r}{J \cdot L_{rc}} \end{cases} \quad (IV.28)$$

### ➤ Choix des surfaces de glissements

Dans le contrôle de la machine, il faut assurer le contrôle du flux par la suite celui de la vitesse, où de la dynamique de vitesse est la plus lente. Notre choix des surfaces de glissements des variables à contrôler dont la vitesse et le flux qui sont donnés sous forme d'un système de surface du premier ordre.

#### ➤ pour la vitesse $\omega$

$$S(\omega_r) = (\omega_{rref} - \omega_r) \quad (IV.29)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{s}(\omega_r) = (\dot{\omega} \omega_{ref}) \quad (IV.30)$$

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

## Chapitre IV: Commande par mode glissant

---

$$S(\dot{\omega}_r) = \omega_{rref} - p \cdot \frac{M}{J.Lr} \dot{\Phi}_{rd} \cdot i_{sq} + \frac{f}{J} \omega_r + \frac{C_r}{J} \quad (IV.31)$$

Avec:

$$i_{sq} = i_{sqeq} + i_{sqn} \quad (IV.32)$$

Durant le régime de mode glissant ;

$$\dot{\omega}_r = \dot{\omega}_{rref} \text{ et } \dot{i}_{sqn} = 0 \quad (IV.33)$$

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

$$i_{sqeq} = \frac{J.Lr}{p.M.\dot{\Phi}_{rd}} \left[ \dot{\omega}_{rref} + \frac{f}{J} \omega_{rref} + \frac{C_r}{J} \right] \quad (IV.34)$$

et:

$$i_{sqn} = K_1 + \frac{S(\omega_r)}{|S(\omega_r)| + \mu_1} \quad (IV.35)$$

➤ **Surface de régulation du courant  $i_{sq}$ :**

$$S(i_{sq}) = i_{sqref} - i_{sq} \quad (IV.36)$$

Durant le régime de mode glissant

$$\dot{i}_{sq} = \dot{i}_{sqref} \text{ et } \dot{V}_{sqn} = 0 \quad (IV.37)$$

A travers l'expression (IV.07) on obtient :

$$V_{sqeq} = \sigma.Ls \left[ \dot{i}_{sq} + \left( \frac{1}{\sigma.Ts} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{Tr} \right) i_{sq}^* + \omega_s \cdot i_{sd} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{Msr} \cdot \omega_r \cdot \Phi_{rd} \right] \quad (IV.38)$$

et

$$V_{sqn} = K_2 \cdot \frac{S(i_{sq})}{|S(i_{sq})| + \mu_2} \quad (IV.39)$$

Avec :

$$V_{sq} = V_{sqeq} + V_{sqn} \quad (IV.40)$$

Surface de régulation du courant  $i_{sd}$ :

$$S(i_{sd}) = i_{sdref} - i_{sd}$$

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

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

$$V_{sdeq} = \sigma l_s \left[ \dot{i}_{sdref} + \left( \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{T_r} \right) i_{sdref} - \omega_s i_{sq} - \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M T_r} \cdot \Phi_{rd} \right] \quad (IV.42)$$

et

$$V_{sdn} = K_3 \cdot \frac{S(i_{sd})}{|S(i_{sd})| + \mu_4} \quad (IV.43)$$

Avec :

$$V_{sq} = V_{sdeq} + V_{sdn} \quad (IV.44)$$

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.

### IV.4 Résultats de simulation de la commande par MG

La commande par MG induit en pratique des commutations haute fréquence connue sous le nom de chattering. Ces commutations peuvent exciter des dynamiques non désirées qui risquent de déstabiliser, détériorer voire même de détruire le système étudié. Dans le but de réduire les broutements (phénomène de chattering haute fréquence), nous pouvons imposer une variation de la valeur de la commande (ordre un) en fonction de la distance entre la variable d'état et la surface de glissement[64].

#### ➤ Cas d'une saine

La figure (IV.09) représente les résultats de simulation pour un démarrage à vide pour une référence de (120rad/s), l'application d'une charge de 7 Nmest effectuée à l'instant  $t= 1s$ .

On remarque que la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse pratiquement acceptable.

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

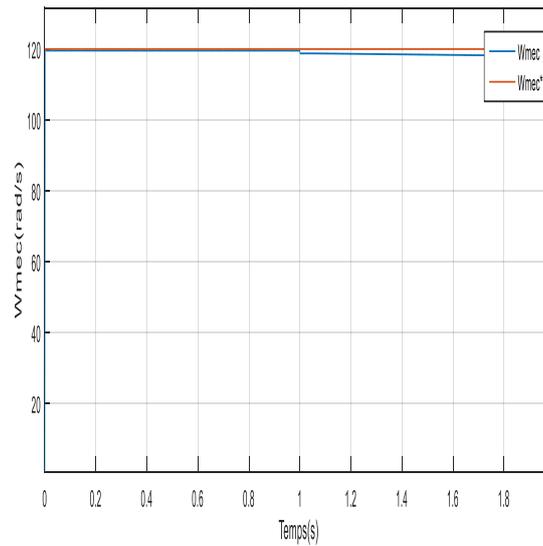


Figure IV.09: vitesse de rotation ( $g=0.01$ )

- **Robustesse de l'inversion de vitesse**

La figure (IV.10) illustre le test d'inversion de la vitesse. On remarque que la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse pratiquement acceptable (figure IV.10.a). L'allure du couple électromagnétique (figure IV.10.b) présente des pics provoqués par cette inversion avant de se stabiliser à la valeur désirée

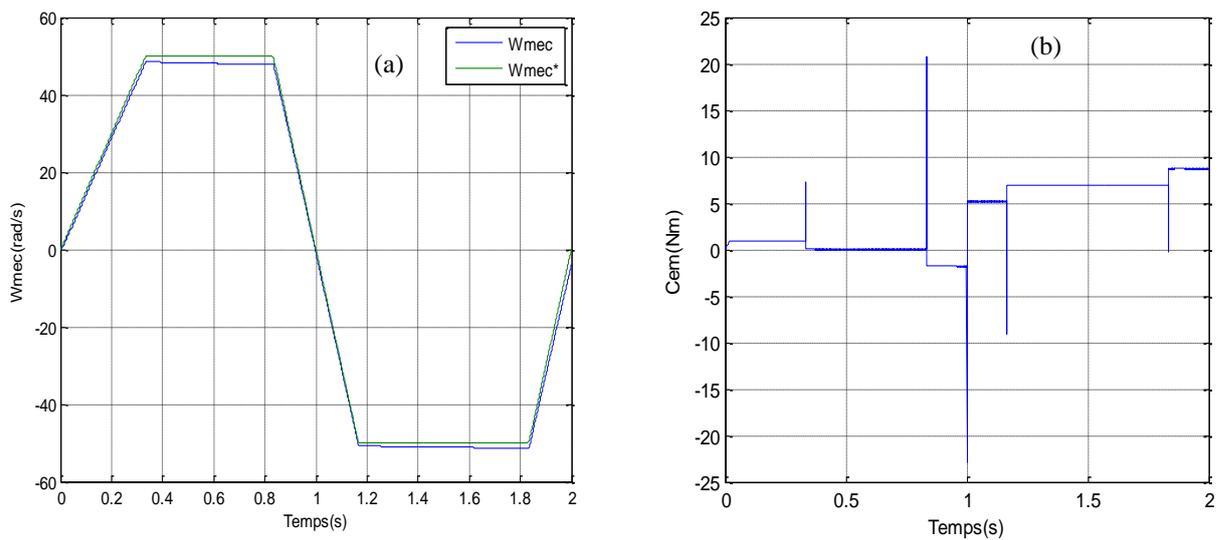


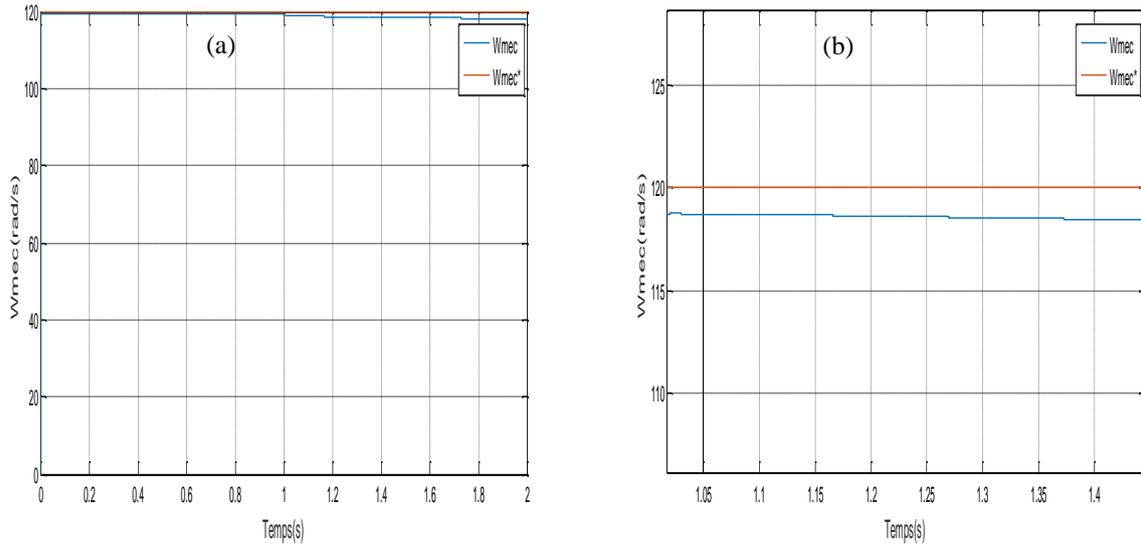
Figure IV.10: (a) vitesse de rotation (b) le couple électromagnétique

# Chapitre IV:Commande par mode glissant

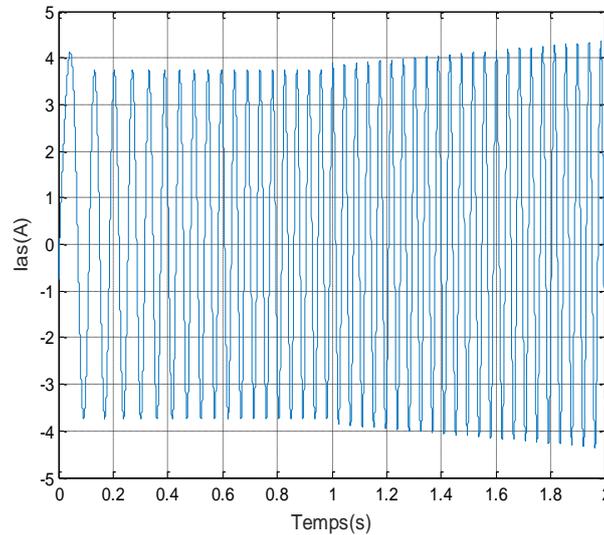
## Machine avec défaut

- **Cassure de deux barres rotorique adjacente**

La figure (IV-11) présente les résultats de simulation de la machine avec un défaut de cassures de barres adjacentes avec une vitesse de (120rad/s) .On remarque que le système répond positivement à ce test, la vitesse suit rapidement sa référence, cela vent dire que la régulation est robuste .



**Figure.IV.11 :** (a)vitesse mecanique,(b)courant ias



**Figure.IV.12 :** courant statorique ias

Le spectre de la vitesse (figure IV.13.b) ne donne aucune information sur la présence du défaut, puisque les amplitudes des ondulations sont très réduites due à l'action de la boucle de régulation. Par contre l'analyse du courant statorique (figure IV.13.a) montre l'apparition des raies latérales au voisinage du fondamental.

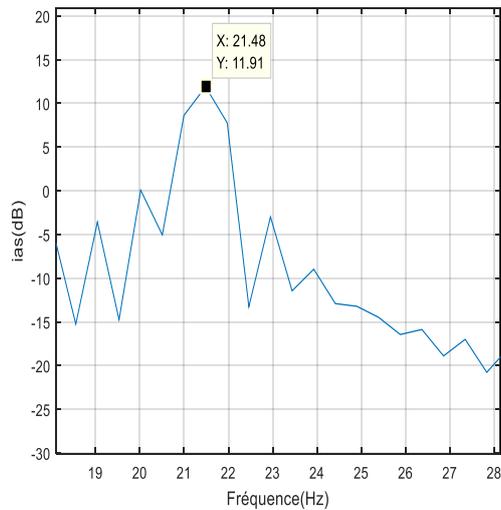


Figure.IV.13:spectre de courant  $i_{as}$

- **Test de robustesse pour l'inversion de vitesse**

Les figures illustrent 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 on constate une variation négligeable au niveau des composantes du flux rotorique, donc on peut dire que le découplage est parfaitement réalisé.

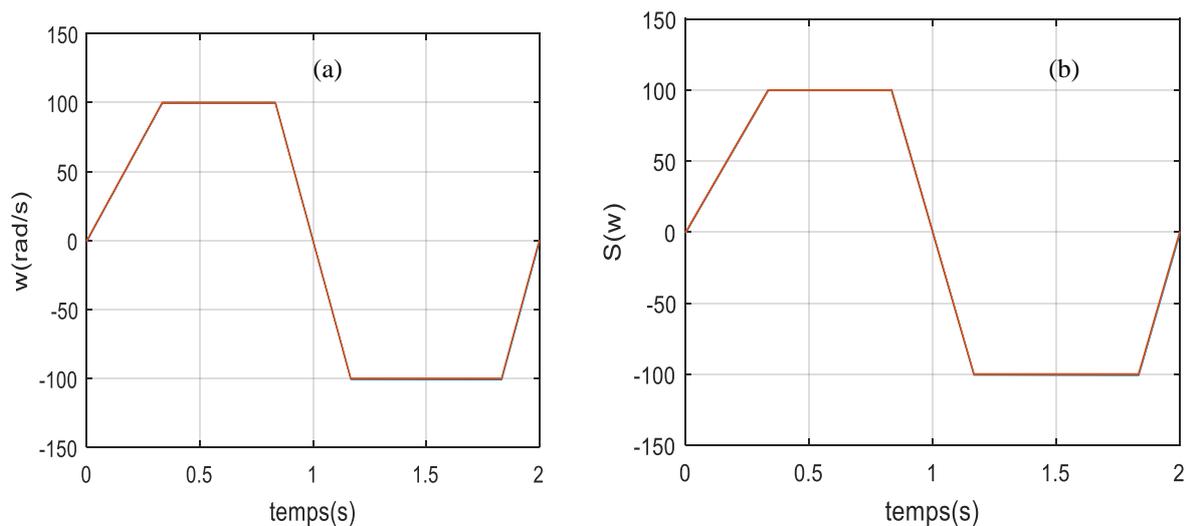


Figure. IV.14: (a)vitesse mécanique,(b)surface de la vitesse

## Chapitre IV:Commande par mode glissant

---

### IV.5Conclusion

Dans ce chapitre, la théorie de mode glissant a été brièvement présentée. La commande par MG offre de meilleures performances autour du point de fonctionnement, aussi bien par rapport à des variations paramétriques et des perturbations extérieures. La commande classique des systèmes en MG d'ordre un présente, en général, l'inconvénient majeur du phénomène de chattering. Pour atténuer ou éliminer celui-ci, des solutions ont été proposées en remplaçant le terme discontinu (fonction signe) par une fonction continue (saturation, intégrale etc ...). L'utilisation de cette dernière produit une erreur statique en présence de perturbations, pour assurer la convergence de la surface vers l'origine en un temps fini.

Dans cette partie, on a représenté l'influence du défaut sur le courant statorique, une étude analytique de défaut nous a permis d'analyser et d'expliquer l'influence des défauts sur les performances de la machine.

.