Afrique SCIENCE *04(1) (2008) 21 - 37*
ISSN 1813-548X

La commande par mode glissant : Application à la machine synchrone à aimants permanents (approche linéaire)

Abderrahmane KECHICH [1*] et Benyounes MAZARI [2]

[1] *Institut d'électrotechnique, B.P 417 C .U. Bechar, Algérie*
[2] *Institut d'Electrotechnique, U.S.T.O. B.P1505, Oran El M'naouer, Algérie*

* Correspondance, courriel : *akechich@yahoo.fr*

Résumé

Cet article est consacré à l'étude des performances de la commande linéaire par mode glissant avec l'intégration d'un régulateur intégrateur, appliqué à la machine synchrone à aimant permanent *(M.S.A)*.
Dans une première étape, nous avons présenté la conception de la commande par cette nouvelle approche suivie d'une structure de la commande optimale du réglage avec la loi de commutation par contre réaction d'état avec intégrateur.

La deuxième étape est consacrée à l'élaboration d'une commande à structure variable, ce qui a permis l'élimination des surcharges qui peuvent conduire à une destruction du système à régler. Nous présentons les résultats de simulation de l'évolution des grandeurs réelles de la *M.S.A*, ainsi que des caractéristiques dynamiques du système global, lors du démarrage de la *M.S.A*. Enfin, les résultats de simulation prouvent que le système à régler est robuste face aux perturbations inconnues.

Mots-clés : *Machine synchrone, aimants permanents, mode glissant, surface de glissement, découplage, simulation, commande, structure variable.*

Abstract

Application of sliding-mode linear to permanent magnet synchronous machine (approached linear)

This article is devoted to the study of the performances of the nonlinear order by mode slipping with the integration of an integrating regulator, applied to the permanent magnet synchronous machine (*P.M.S.M*).

In a first stage, we presented the design of the order by this new approach followed by a structure of the optimal ordering of the adjustment with the law of commutation on the other hand reaction of state with integrator.
The second stage is devoted to the development of an order to variable structure, which allowed the elimination of the overloads which can result to a destruction of the system in regulating. We have the results of simulation of the evolution of the real sizes of the *P.M.S.M*, as well as dynamic characteristics of the total system, during the starting of the *P.M.S.M*. Lastly; the results of simulation prove that the system to be regulated is robust for the unknown disturbances.

Keywords : *Synchronous machine, permanent magnet, slipping-mode, slip surface, decoupling, simulation, integrator, system, Variable structure.*

1. Introduction

Les algorithmes de la commande classique utilisant les régulateurs à action proportionnelle, intégrale et dérivée permettent de commander avec précision des processus linéaires non perturbés et à paramètres constants. Lorsque la partie commandée est soumise à des perturbations et à des variations de paramètres du système, une solution auto adaptative, qui par réajustement des paramètres des régulateurs, permet de conserver des performances fixées à l'avance en présence de perturbations et de variations de paramètres. Cette solution présente l'inconvénient de nécessiter une mise en œuvre souvent complexe.

Ainsi, il est possible d'enregistrer une autre solution plus simple, faisant appel à une classe particulière de systèmes de commande, appelés « systèmes à structures variables» Ces systèmes ont fait l'objet depuis longtemps de travaux importants au Japon par *H. Harachima* [1,2], aux Etat Unis par *J J Slotine* et en ex-Soviétique par *V. Ukin* et ceci à partir des travaux théoriques du mathématicien soviétique *A. F. Filipov*. L'intérêt récent accordé à cette technique de commande est dû essentiellement à la disponibilité des composants électroniques plus performants et de microprocesseurs très développés [3].

2. Loi de commutation par retour d'état

Un système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande peut être représenté par la ***Figure 1***.

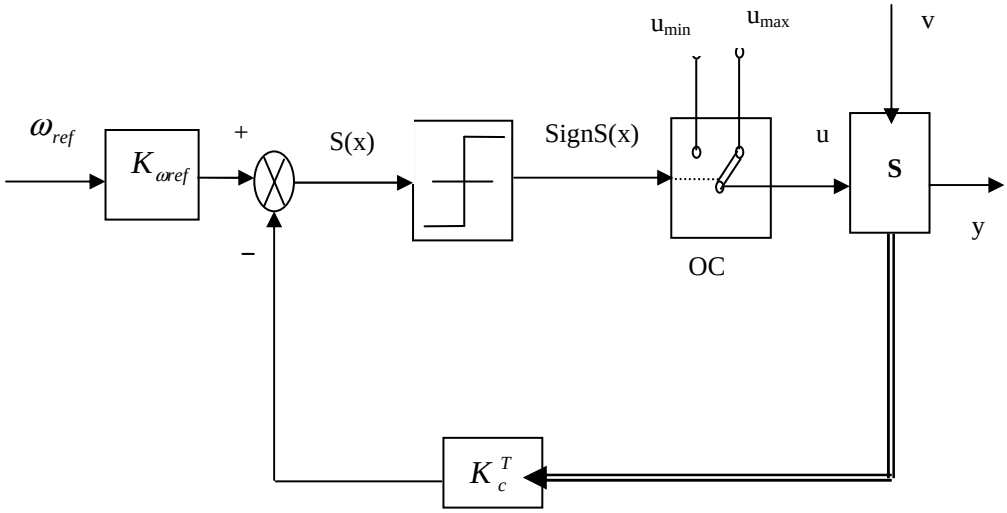

Figure 1 : *Schéma bloc du réglage par mode glissant*

L'application du réglage par mode de glissement selon la configuration représentée nécessite, un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation très rapide d'une position à une autre. Le système à régler est décrit par les *équations d'états* suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s x_s + b_s u + b_{sv} v \\ y &= C_s^T x_s \end{aligned} \qquad (1)$$

où :

u : Représente la grandeur de commande laquelle est déterminée selon le signe de la surface S(x_s).

v : Représente la grandeur de perturbation sur le système à régler.

La loi de commutation est donnée par la relation suivante :

$$S(x_s) = -K_s^T x_s + K_{\omega ref}\, \omega_{ref} \qquad (2)$$

Ce cas nécessite que l'organe de commande *(OC)* doive être conçu de telle manière que la grandeur de commande (u) ne prenne que les deux valeurs extrêmes constantes u_{max} ou u_{min}.

La commutation entre les deux valeurs est imposée par la loi de commutation selon la stratégie suivante [4] :

$u = u_{max}$ pour $S(x_s) > 0$

$u = u_{min}$ pour $S(x_s) < 0$

Dans ce cas aussi, il est possible que la commutation ait lieu à une fréquence très élevée (quelques centaines de KHz) de telle manière que le système de réglage travaille en mode de glissement.
Afin que le comportement dynamique du système existe, alors il faut également que : $S(x_s) = 0$
Cette configuration correspond en principe à un réglage à deux positions, cependant avec une loi de commutation plus performante.

2-1. La condition d'existence du mode glissant

Le mode de glissement existe lorsque les commutations ont lieu d'une façon continue entre les deux grandeurs $u_{max.}$ et $u_{min.}$. Pour un système du deuxième ordre avec les grandeurs d'état x_{s1} et x_{s2} ce phénomène est démontré à l'aide de la ***Figure 2***.

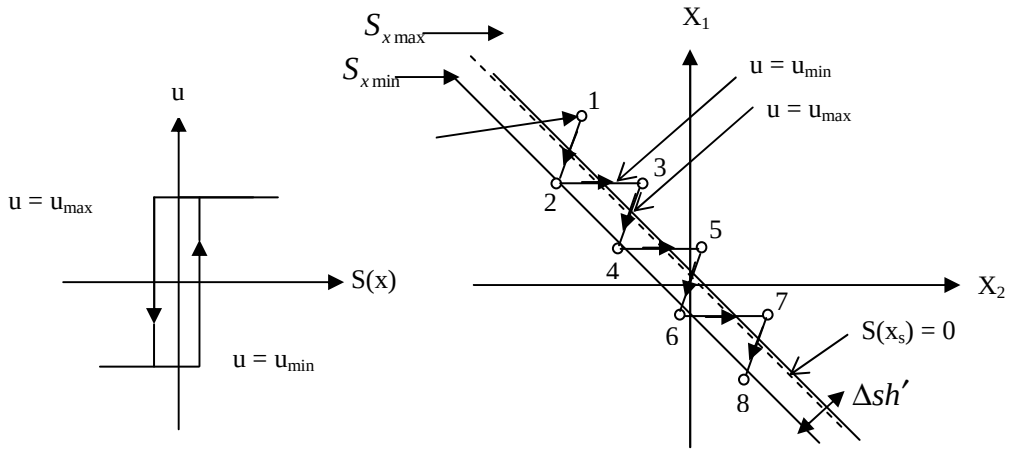

Figure 2 : *Mode de glissement réel.*

On admet d'abord une hystérèse sur la loi de commutation S(x)= 0 (trait mixte). Par conséquent, les commutations ont lieu sur les deux droites décalées parallèlement de $\pm \Delta Sh$.
Dans un tel cas, la loi de commutation fait un mouvement infiniment petit autour de :

$$S(x_s) = -K_s^T x_s + K_{\omega ref}\,\omega_{ref} = 0 \qquad (3)$$

Et par suite l'hyperplan de la commutation est :

$$S(x_s) = -K_s^T x_s + K_{\omega ref}\,\omega_{ref} \qquad (4)$$

$$\dot{S}(x_s) = -K_s^T \dot{x}_s + K_{\omega ref}\,\dot{\omega}_{ref} \qquad (5)$$

2-2. Loi de commutation par contre réaction d'état et régulateur intégrateur

Pour assurer une erreur statique nulle on introduit une action intégrale de la contre-réaction d'état, la configuration précédente est modifiée selon la configuration de la ***Figure 3***.

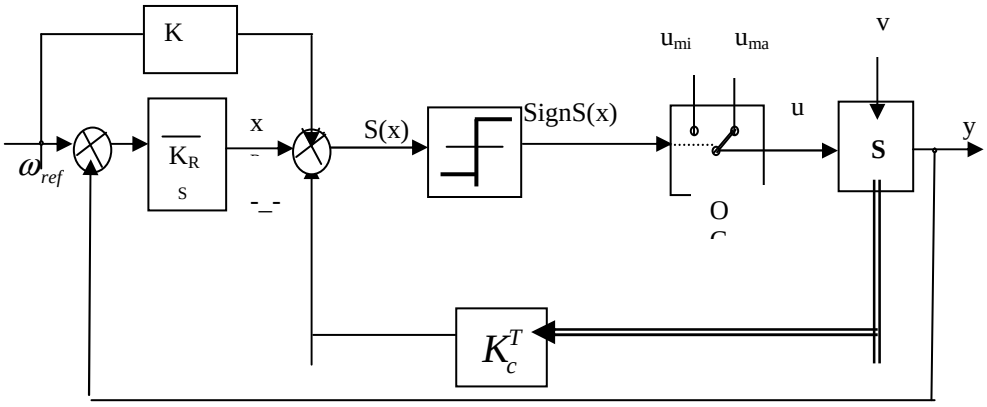

Figure 3 : *Configuration avec la loi de commutation par contre-réaction d'état et régulateur et intégrateur.*

Le nouveau système sera régit par les équations d'états nouvelles suivantes :

$$\dot{x} = Ax(t) + bu + b_v v + b_w \omega_{ref} \tag{6}$$

où :

$$x(t) = [x_s \quad x_R]^T \text{ et } C^T = [C_s^T \quad 0] \tag{7}$$

avec :

$$\frac{dx_R}{dt} = \frac{1}{T_i}(\omega_{ref} - y) \tag{8}$$

La matrice A et les vecteurs juxtaposés b, b_v et b_w seront comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} A_s & 0 \\ -\frac{1}{T_i}C_s^T & 0 \end{bmatrix} ; b = \begin{bmatrix} b_s \\ 0 \end{bmatrix} ; b_v = \begin{bmatrix} bv_s \\ 0 \end{bmatrix} ; b_w = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_i} \end{bmatrix}$$

La loi de commutation peut alors être exprimée par :

$$S(x,t) = -K^T x(t) + K_{\omega ref}\omega_{ref} \tag{9}$$

avec : $K^T = [K_s^T \quad -K_R]$

2-3. La grandeur de commande équivalente

Lorsque le système de réglage à structure variable fonctionne en mode glissant, la loi de commutation vérifie la condition suivante [4] :

$$S(x_s) = 0 \tag{10}$$

$$\dot{S}(x_s) = 0 \;\Rightarrow -K^T \dot{x} + K_{\omega ref}\,\dot{\omega} = 0 \tag{11}$$

$$\Rightarrow -K^T\left(Ax + bu + b_v v + b_w \omega_{ref}\right) + K_{\omega ref}\,\dot{\omega}_{ref} = 0 \tag{12}$$

d'où :

$$u_{eq} = -\frac{1}{K^T b} K^T \left(Ax + bu + b_v v + b_w \omega_{ref}\right) + \frac{1}{K^T b} K_{\omega ref}\,\dot{\omega}_{ref} \tag{13}$$

Afin que u_{eq} prenne une valeur, une première condition pour l'existence du mode de glissement est donnée par la condition suivante : $K^T b \neq 0$.

Sans oublier la condition qui doit être respecté : $u_{\min} \leq u_{eq} \leq u_{\max}$.

On peut interpréter la grandeur équivalente comme la valeur moyenne que prend la grandeur de commande lors de la commutation très rapide entre $u_{\min}$ et $u_{\max}$.

2-4. Synthèse de la loi de commutation

Pour faire la loi de la commutation on peut appliquer la théorie de l'hyper stabilité de Popov pour la synthèse des systèmes à structures variables [5], ou bien le principe d'optimisation de Pontriagin ou comme dans notre cas la méthode de *Lyapunov* .Cette dernière est base sur une fonction dite « *fonction de Lyapunov* » possédant la forme suivante : $v = \Delta x^T P \Delta x$

Cette fonction scalaire est définie positive, selon l'exigence du théorème de la stabilité de *Lyapunov*, à condition que la matrice (P) soit une matrice symétrique et définie elle aussi positive.

Equation de Lyapunov :

Selon le théorème de la stabilité de cette théorie on aura :

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt} < 0 \tag{14}$$

$$\dot{v} = \Delta\dot{x}^T P \Delta x + \Delta x^T P \Delta\dot{x} \tag{15}$$

où : $\Delta\dot{x} = A\Delta x + b\Delta u$

$$\dot{v} = \left(\Delta x^T A^T + b^T \Delta u\right) P \Delta x + \Delta x^T P \left(A\Delta x + b\Delta u\right)$$

$$\dot{v} = \Delta x^T \left(A^T P + PA\right)\Delta x + \left(b^T P\Delta x + \Delta x^T Pb\right)\Delta u \qquad (16)$$

Puisque $b^T P\Delta x$ est un scalaire et (P) une matrice symétrique, alors ont peut faire les transformations suivantes :

$b^T P\Delta x = \Delta x^T P^T b = \Delta x^T Pb$

Afin d'abréger on pose : $A^T P + PA = -Q$

Cette équation est dite « *Equation de Lyapunov* », et par suite la *relation (16)* peut être exprimée de la manière suivante :

$$\dot{v} = \left(-\Delta x^T Q\Delta x + 2\Delta x^T Pb\Delta u\right) < 0 \qquad (17)$$

On remarque que, pour avoir $(\dot{v})$ négative. Il faut que :

$$\Delta x^T Pb\Delta u < 0 \qquad (18)$$

3. Détermination des coefficients de la contre réaction d'état

Ainsi, en utilisant la théorie précédente, la loi de la commutation peut être écrite de la manière suivante :

$$\text{si } \Delta x^T Pb > 0 \text{ alors } \Delta u = \Delta u_{\min} < 0 \qquad (19)$$

$$\text{si } \Delta x^T Pb < 0 \text{ alors } \Delta u = \Delta u_{\max} > 0 \qquad (20)$$

d'où : $S(x) = -\Delta x^T Pb = -b^T P\Delta x = -K^T \Delta x$

avec : $K^T = b^T P$

Pour déterminer les coefficients de la contre-réaction d'état on utilise la méthode de placement des pôles [6]. Cette méthode permet la synthèse de la surface de glissement et par suite le contrôle de la dynamique de notre système.

Du fait que la matrice (A) est singulière, il est nécessaire alors d'imposer un pôle à l'origine. Les autres pôles peuvent être choisis librement. Souvent, il est judicieux de choisir des pôles complexes conjugués pour avoir un amortissement optimal [7].

En ce qui concerne le coefficient de l'intervention directe de la grandeur de consigne K_w, lorsqu'on utilise un régulateur intégrateur, le régime stationnaire ne donne aucune indication pour sa détermination. Il faut, donc, faire appel à d'autres critères [8]. On peut citer par exemple le critère de stabilité, le critère d'imposition des pôles.

Puisque ce coefficient n'a pas d'influence sur les conditions limites du mode glissant, ont peut alors l'annuler ($K_w = 0$). Malheureusement, ce choix n'est pas toujours judicieux.

En effet pour un tel choix, une variation de la grandeur de consigne doit se propager par

le régulateur. Dans ce cas, il est alors possible que le nouveau régime stationnaire soit atteint par le mode glissement de manière relativement lente.
Si par contre, on choisit ($K_w \neq 0$), lors d'une variation brusque de la grandeur de consigne, la grandeur de commande équivalente (u_{eq}) sort du domaine admissible. Le mode de glissement est interrompu et par suite on aura un déplacement rapide avec $u_{\max}$ ou $u_{\min}$ avant d'atteindre de nouveau le mode de glissement. Dans ce cas les relations doivent être étudiées cas par cas afin d'obtenir un comportement optimal en cas de variation de la grandeur de consigne.

3-1. Limitation des grandeurs d'états

Le problème majeur rencontré dans ce type de réglage se pose lors des surcharges qui peuvent conduire à une destruction du système à régler. Pour éviter ce problème, l'une des solutions proposée consiste à limiter certaines grandeurs d'état lors de grandes variations [9]. Afin de limiter la grandeur d'état (x_i) entre $x_{i,max}$ et $x_{i,min}$, on utilise une chaîne de limiteurs comme le montre la ***Figure 4***. Chaque limiteur fournit une grandeur de consigne w_i.

$$\begin{aligned} &\omega_i = \omega_{\max} \quad \text{pour} \quad e_i > \omega_{\max} \\ &\omega_i = e_i \quad \text{pour} \quad \omega_{i,\min} \leq e_i \leq \omega_{i,\max} \\ &\omega_i = \omega_{\min} \quad \text{pour} \quad e_i < \omega_{\min} \end{aligned} \tag{21}$$

avec :

$$\begin{aligned} &i = 1,....., ns-1 \\ &e_i = \omega_{t+1} - K_{s,t+1} x_{s,t+1} \end{aligned}$$

Dans ce cas la valeur $\omega_{i,\lim}$ avec $\omega_{i,\lim} = \omega_{i,\max}$ doit être déterminée de telle manière que la grandeur d'état $x_{s,i}$ reste limitée à la valeur $x_{s,i,\lim}$. A condition que :

$$\left[K_{s,i} x_s + ...+ K_{s,t+1} x_{s,t+1}\right] \leq \left\| K_{s,t} x_{s,t} \right\|_{\lim} \tag{22}$$

On trouve la relation suivante : $\omega_i = K_{s,t} x_{s,t,\lim}$

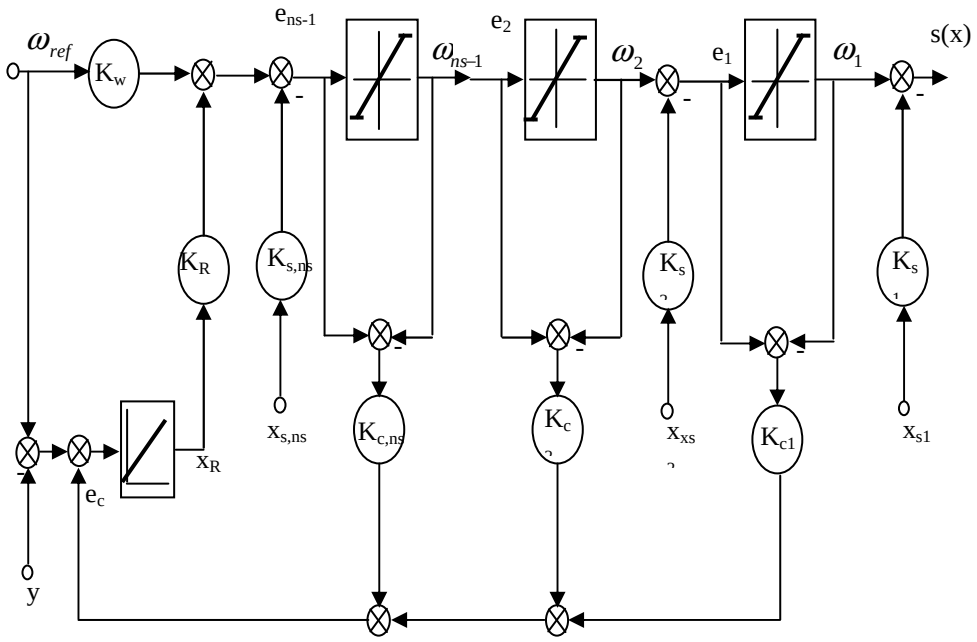

Figure 4 : *Chaîne de limiteur avec un régulateur intégrateur*

3-2. Application à la machine synchrone à aimant permanent

Lorsque $i_d = 0$, on obtient le model de la machine découplée :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\varphi_f}{L_q} \\ \frac{P^2\varphi_f}{J} & -\frac{F_c}{J} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} \\ 0 \end{bmatrix} u_q + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P}{J} \end{bmatrix} C_r \tag{23}$$

Le régulateur intégrateur est donné sous la forme suivante :

$$\frac{dx_R}{dt} = \frac{1}{T_i}\left(\omega_{ref} - \omega\right) \tag{24}$$

Le modèle de la machine devient alors :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_q \\ \omega \\ x_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\varphi_f}{L_q} & 0 \\ \frac{P^2\varphi_f}{J} & -\frac{F_c}{J} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_i} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_q \\ \omega \\ x_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_q + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{P}{J} \\ 0 \end{bmatrix} C_r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_i} \end{bmatrix} \omega_{ref} \tag{25}$$

3-3. Calcul des coefficients de la contre réaction

Une fois le régime du mode glissant est atteint, la surface de glissement devient nulle ainsi que sa dérivée. La commande devienne alors :

$$u_{eq} = \left(R_s i_q + \omega\varphi_f\right) - \frac{K_w L_q}{K_q J}\left(P^2\varphi_f i_q - F_c\omega - PC_R\right) + \frac{L_q K_R}{K_q T_i}\left(\omega_{ref} - \omega\right) \qquad (26)$$

En remplaçant, cette grandeur, dans le modèle précédent on obtient les équations d'états suivantes :

$$A^* = \begin{bmatrix} -\frac{K_w}{K_q J}P^2\varphi_f & -\frac{K_R}{K_q T_i} + \frac{K_w F_c}{JK_q} & 0 \\ \frac{P^2\varphi_f}{J} & -\frac{F_c}{J} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_i} & 0 \end{bmatrix} ; \; b_v = \begin{bmatrix} \frac{K_w}{K_q J} \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} ; \; b^*_v = \begin{bmatrix} \frac{K_R}{K_q T_i} \\ 0 \\ \frac{1}{T_i} \end{bmatrix} \qquad (27)$$

L'équation caractéristique de notre système est donnée par :

$$P(s) = \det\left(sI - A^*\right) = s\left[s^2 + \left(\frac{P^2\varphi_f K_w}{JK_q} + \frac{F_c}{J}\right)s + \frac{P^2\varphi_f K}{JK_q}\frac{K_R}{T_i}\right] \qquad (28)$$

La matrice (A) est singulière, donc on peut choisir un pôle à l'origine et les deux autres conjuguées $(-\rho + j\rho \quad et \quad -\rho - j\rho)$ [10], on trouve alors :

$$\frac{K_w}{K_q} = \frac{2\rho J - F_c}{P^2\varphi_f} \quad \text{et} \quad \frac{K_R}{T_i} = \frac{2\rho^2 JK_q}{P^2\varphi_f} \qquad (29)$$

Si on choisit $K_q = T_i = 1$, les coefficients précédents deviennent comme suit :

$$K_w = \frac{2\rho J - F_c}{P^2\varphi_f} \quad \text{et} \quad K_R = \frac{2\rho^2 J}{P^2\varphi_f} \qquad (30)$$

Il est à noter que le mode glissant n'existe pas dans tout l'hyperplan de la commutation, mais seulement dans un certain domaine. Ce dernier est limité par deux plans dans l'espace (i_q , w , x_R) ou par deux droites dans le plan (i_q, w). Ces deux plans ou deux droites sont déterminés pour $u_{\lim}$ avec $u_{\lim} = u_{\max}$ ou bien $u_{\lim} = u_{\min}$.

Par conséquent, la limitation du courant (i_q) est nécessaire pour la protection du système à régler. On utilise un limiteur équipé d'une action d'anti-saturation (Anti-Windup). La surface de glissement avec le limiteur est donné par :

$$S(x,t)=\begin{cases}-K_s^T x_s + K_R x_R + K_w w & \text{si } \left|i_q\right| < i_{q,\max} \\ -K_q i_q + K_q Sgn(i_q) i_{q,\max} & \left|i_q\right| > i_{q,\max}\end{cases} \quad (31)$$

La grandeur de commande équivalente devient :

$$u_{eq}=\begin{cases} u_{eq} & \left|i_q\right| < i_{q,\max} \\ R_s i_{q,\max} + P\varphi_f \Omega & \text{si } \left|i_q\right| > i_{q,\max} \\ -R_q i_{q,\max} + P\varphi_f \Omega & i_q < -i_{q,\max}\end{cases} \quad (32)$$

Le schéma global de cette commande est donné par la ***Figure 5.*** On note que la commande est imposée par le bloc de découplage (F.O.C.).

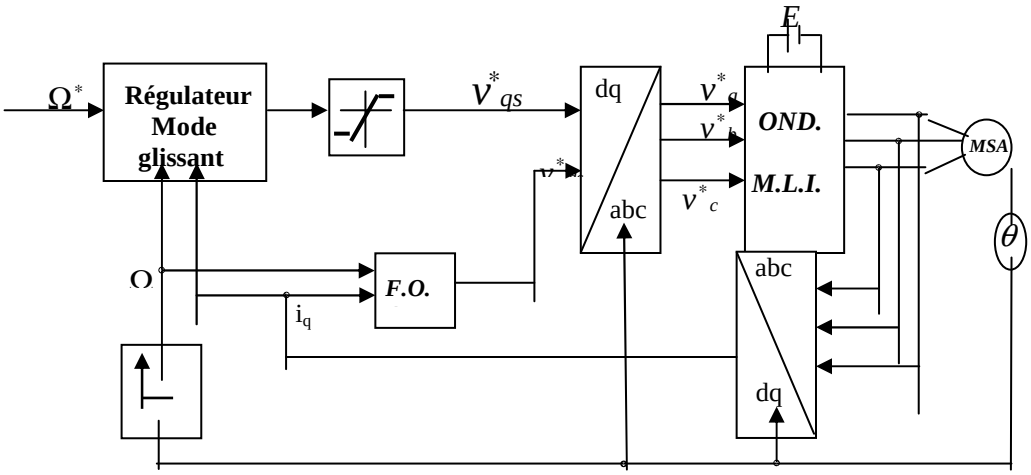

Figure 5 : *Schéma global du réglage de vitesse par mode*

4. Résultats et discussion

Pour la validation de la structure de la commande par mode glissant proposée, c'est-à-dire 'approche linéaire'. On fait des simulations à l'aide du logiciel MATLAB. On est obligé de faire varier les paramètres électriques de la machine à savoir :

- les inductances L_q et L_d ; le flux magnétique ϕ_f ; La résistance statorique.

On fait également varier les paramètres mécaniques à savoir :

- Le moment d'inertie J .

Les différentes simulations faites nous permettent de constater :

- Le rejet de perturbation est très rapide ;
- Un temps de réponse très faible ;

- Une erreur statique pratiquement nulle ;
- Un découplage réalisé avec succès par le maintient de i_d nul ;
- De fortes oscillations des tensions de commande "Chattering".

D'après les courbes de la ***Figure 6,*** la vitesse suit sa référence dans les deux sens de rotation. Le courant statorique demeure dans un intervalle admissible.
Pour faire apparaître le phénomène de broutement «Chatering» on a présenté à la ***Figure 7,*** les grandeurs de commande.

A ***la Figure 7-a,*** la position du rotor en fonction de l'erreur de la vitesse est décrite d'une façon graphique, la position varie de (-750 [rad]) jusqu'à (0 [rad]). Quant à la vitesse elle passe de (150 [rad/s]) à (0 [rad/s]).
A la ***Figure 7-b,*** la surface passe d'environ (1700 [u]) à (0 [u]) dans un temps très rapide, environ (0.15 [s]). Pour une évaluation des performances, de notre machine, par la technique de la commande par mode glissant proposée, on a fait des testes de la robustesse de ce réglage vis-à-vis des paramètres de la machine.

La ***Figure 8a*** illustre : - Une augmentation de la résistance R, de 150 % puis 200 % ;
- Une diminution de 50 % des paramètres J L_d, et L_q ;
- Une diminution de 40 % des paramètres J L_d, et L_q ;

Dans la ***Figure 8b,*** on a fait seulement une comparaison entre les graphes de deux valeurs de la résistance. La couleur noir correspond à la valeur R et la couleur rouge correspond à la valeur de 1.5* R.
Dans la ***Figure 8c,*** on a fait seulement une comparaison entre les graphes de deux valeurs de la résistance. La couleur noir correspond à la valeur R et la couleur verte ge correspond à la valeur de 200* R.

On constate que la vitesse de notre machine demeure pratiquement insensible aux variations causées par les perturbations, externes, faites ce qui confirme la robustesse du réglage par la commande par mode glissant (Approche linéaire).
Par le biais de ces simulations, on peut affirmer que le système de réglage est peu sensible aux variations des paramètres électriques et mécaniques de la machine.
Le présent travail est comparé avec les différents travaux présentés par nos collègues chercheurs. Les résultats obtenus sont satisfaisants par rapport aux résultats présentés. La majeure amélioration est présentée à la ***Figure 7***, où les oscillations du 'Chattering' sont nettement inférieures, comparé à celles obtenus par d'autres chercheurs. On ajoute aussi que le temps d'annulation de la surface de glissement est un temps recors, il est entre (0.1 [s] et 0.15 [s]).
On présente un autre travail de la commande par mode glissant mais avec une nouvelle approche (Approche non linéaire).

5. Résultats de simulation

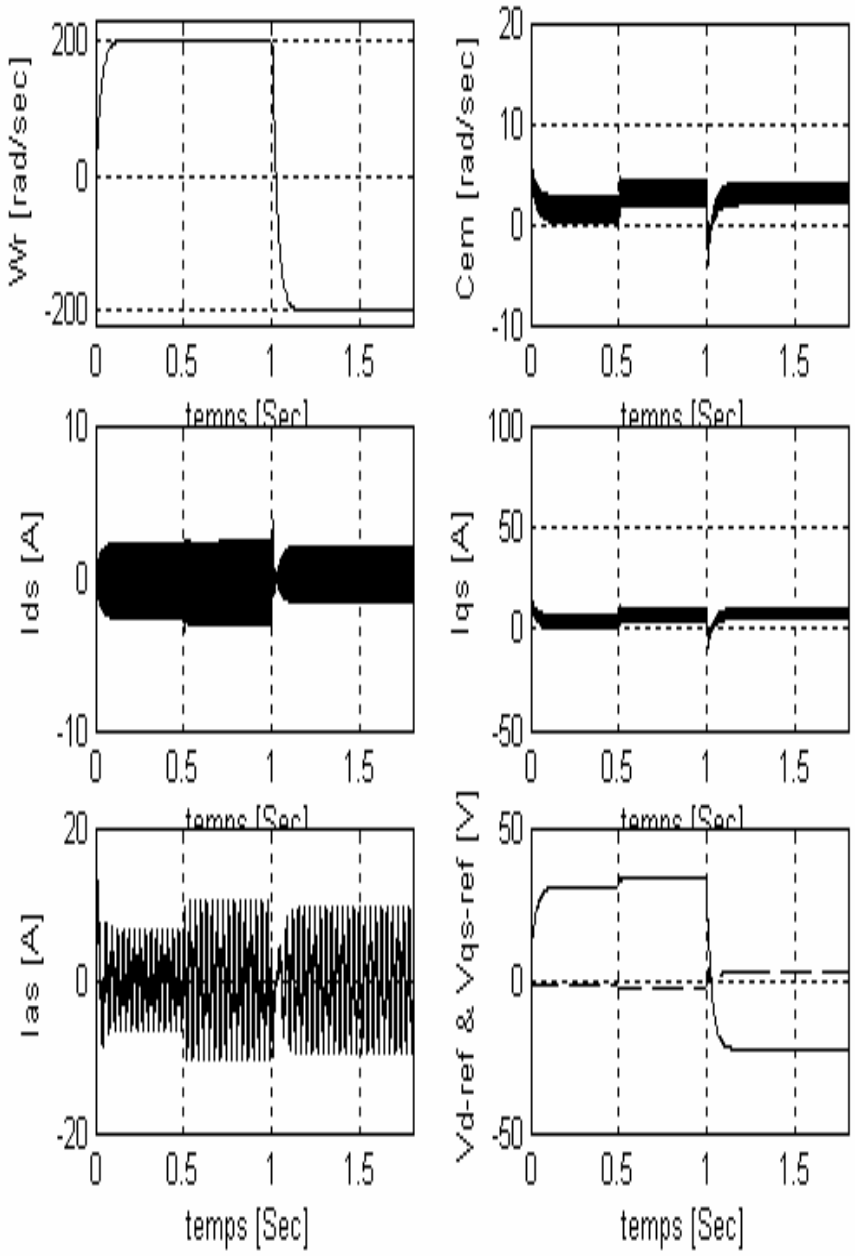

Figure 6 : *Comportement de la machine pour une consigne de 200[rad/s] avec application de la charge nominale et inversion du sens de rotation*

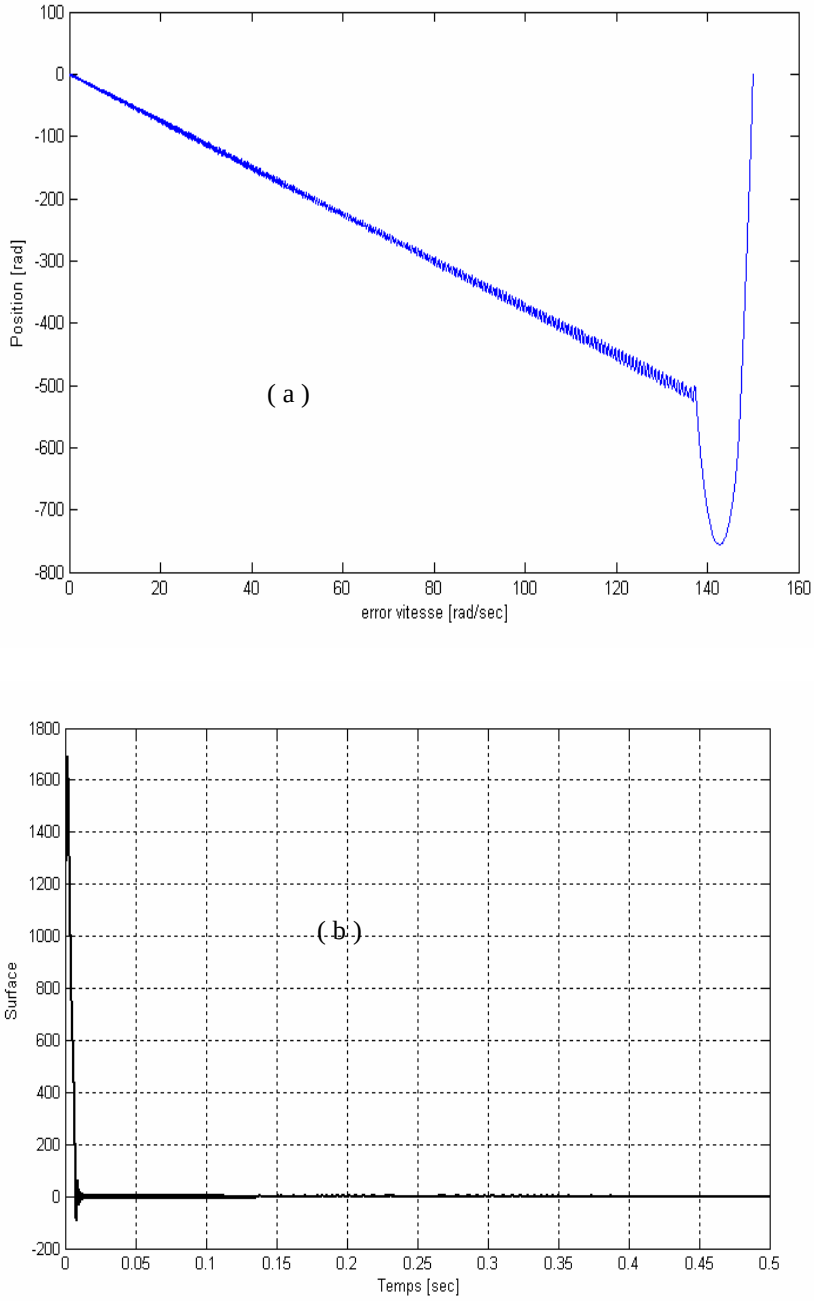

Figure 7 : *Caractéristiques de la commande du mode glissant proposé.*

a- variation de la position en fonction de l'erreur de la vitesse.

b- Variation de surface de glissement en fonction du temps.

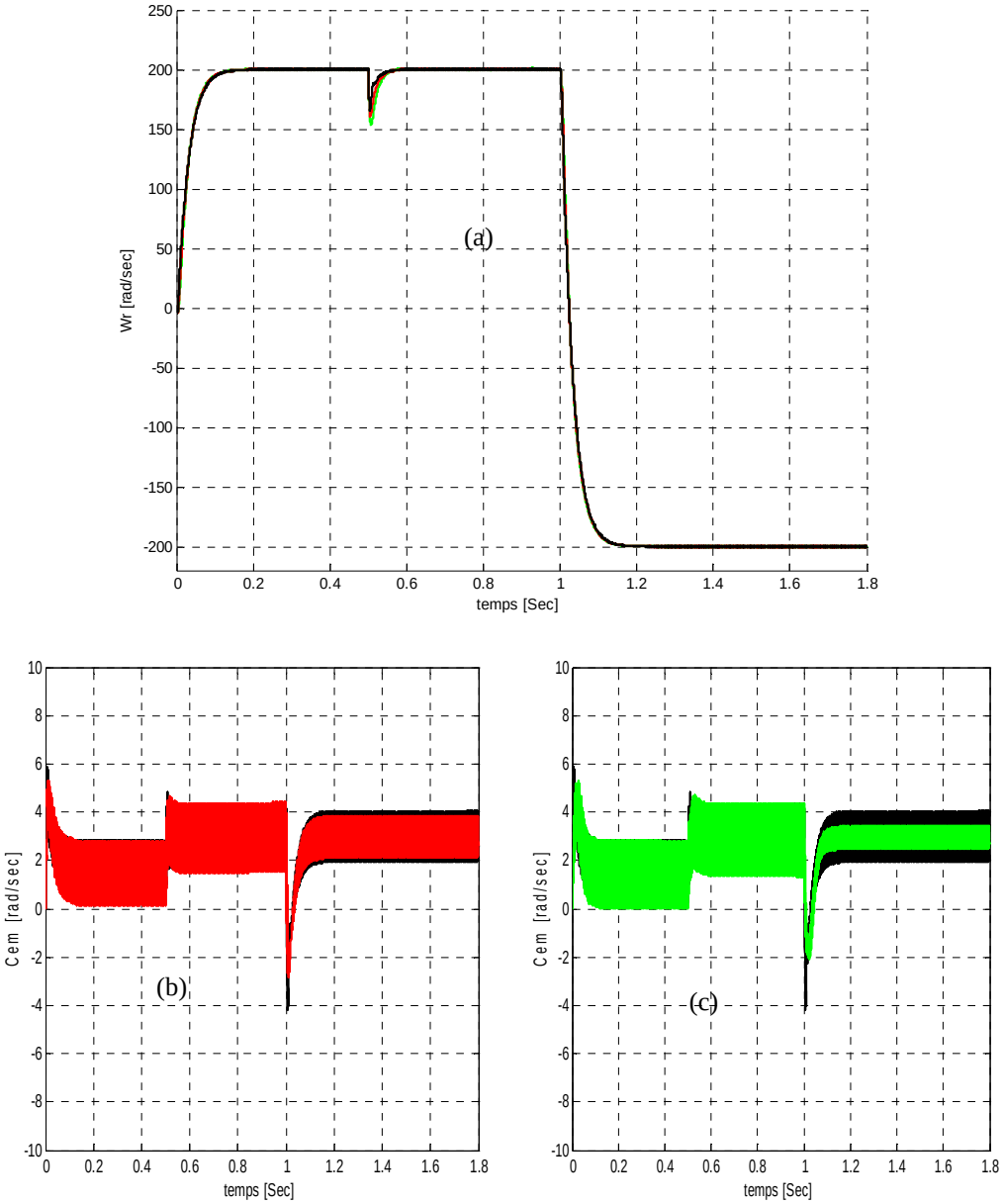

Figure 8 : *Robustesse du réglage de la commande vis-à-vis de la variation des paramètres de la machine (R, J, L_d et L_q):*

a_ 100 %, 150 % et 200 % ;
b_ 100 % et 150 % par rapport à R ;
c_ 100 % et 200 % par rapport à R .

6. Conclusion

Nous avons présenté, une méthode d'analyse et de synthèse de la loi de commande linéaire par la poursuite d'un modèle de base. La commande utilise la méthode de Lyapunov. La seconde partie a été consacrée à l'application des différents algorithmes à la commande de la machine synchrone à aimant permanent.
La commande linéaire par mode glissant linéaire montre son efficacité même dans le cas où les paramètres (mécaniques et électriques) de la machine subissent des variations. La commande ainsi développée nous permet d'assurer une très bonne poursuite de la vitesse. Les différentes simulations faites montrent que le système de régulation linéaire donne de bonnes performances.

On remarque que la poursuite de la vitesse est robuste dans le cas où le couple de charge nominale subirait des variations. Les résultats ainsi obtenus, nous permettent de conclure que notre système de régulation proposé est robuste surtout dans le cas où les perturbations sont connues. Néanmoins cette robustesse reste limitée dans le cas de très fortes oscillations qui provoquent le phénomène de "Chattering". On ajoute aussi que la régulation proposée peut être appliquée dans des domaines exigeants des hautes performances telles que le domaine de la robotique, le domaine des machines outils.

Références

[1] - V. I. Utkin "VSS with sliding mode", *IEEE Trans-automat*, Control, Vol. AC-22, N°2 (1977) 212-222.

[2] - F. Harashima, H. Hashimoto, and S. Kondo, "Mofset Converter-Fed Position System with sliding mode control", *IEEE trans. Ind. Appl.* Vol. I E-32, N°3 August, (1985) 238-244.

[3] - W. Gao and J. C. Hing, "Variable Structure Control of Nonlinear System, A new approach", *IEEE Trans, Ind. Elec.* Vol. 40 N°1, February (1993) 45-55.

[4] - H. Bûhler, "Réglage par mode de glissement", Première édition ISBN2-88074-108-4, *presse polytechniques romandes*. Lausanne, (1996) CH-1015.

[5] - H.Y. Ying "Fuzzy control and modelling", *IEEE Press*, (2000) New Jersey.

[6] - J. X. Xu, T. H. Lee and Y. J. Pan,"On the sliding mode control for DC servo mechanism in the presence of unmodeled dynamics", *Mechatronics*, Vol.13, (2003) 755-770.

[7] - K. Guesmi, N. Essounbouli, N Manamanni, A. Hamsaoui et J. Zaytouni «Commande hybride par mode glissant flou appliquée à un moteur à induction» Conférence internationale francophone d'automatique (CIFA), Douz, Tunisie, novembre (2004).

[8] Y. Wang, Z. Wang, J. Yang and R. Pei, "Speed regulation of induction motor using sliding mode control scheme", IAS meeting, *IEEE conf.* (2005) 72-76.

[9] I. Lin and J. Mon "Decoupling control by hierarchical fuzzy sliding-mode controller", *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, V.13 i4, (2005) 593-598.

[10] N. Essounbouli, A Hamzaoui and J Zaytouni "Fuzzy sliding mode control for a class of nonlinear continuous systems" *International journal of computer application in technology*, inderscience 25 (2), (2006) 174-182.

[11] N. Derbel and M. A. Alimi "Design of a sliding mode controller by fuszy logic", *Iternational Journal of Robotics and automation*, Vol. 21 N°4, (2006) 241-246.