

III.1-INTRODUCTION :

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de la recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande robustes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs. Numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus Industriels de hautes performances. Nous pouvons citer à titre d'exemple la commande Floue, la commande adaptative, la commande par mode de glissement...etc. L'intérêt récent accordé à cette dernière est du essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants [10]

Le mode de glissement est un mode de fonctionnements particulier des systèmes à structure Variable.

La commande par mode de glissement est une méthode de réglage dans laquelle la structure est commutée de manière à ce que le vecteur d'état X suive une trajectoire $S(X)=0$ Dans l'espace d'état. [10]

Cette technique de commande s'adapte aux variations des paramètres du procédé. à commandes.

III.2-THÉORIE DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSEMENT :

III.2-1- Système à structure variable :

Un système à structure variable en anglais –saxon variable system VSS- est système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

Dans la commande des système à structure variable par mode de glissement, La trajectoire d'état est amenée vers une surface. puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement

III.2-2- Objectif de la commande par mode glissant :

L'objectif de la commande par mode glissant 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.

III.3- CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT :

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importantes et multiples : tel que la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité d'implantation, l'invariance ...etc. et ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis.

Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique de système durant le mode de glissement, et une autre discontinue représentant la dynamique de système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :

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- CONFIGURATION DE BASE POUR LES SYSTEMES A STRUCTURE VARIABLE (SSV)

On peut distinguer deux configurations de base pour les systèmes à structure variable. Une première configuration permettant un changement de la structure par commutation d'une contre-réaction d'état variable avec deux retours d'état différents. figure (III.1).

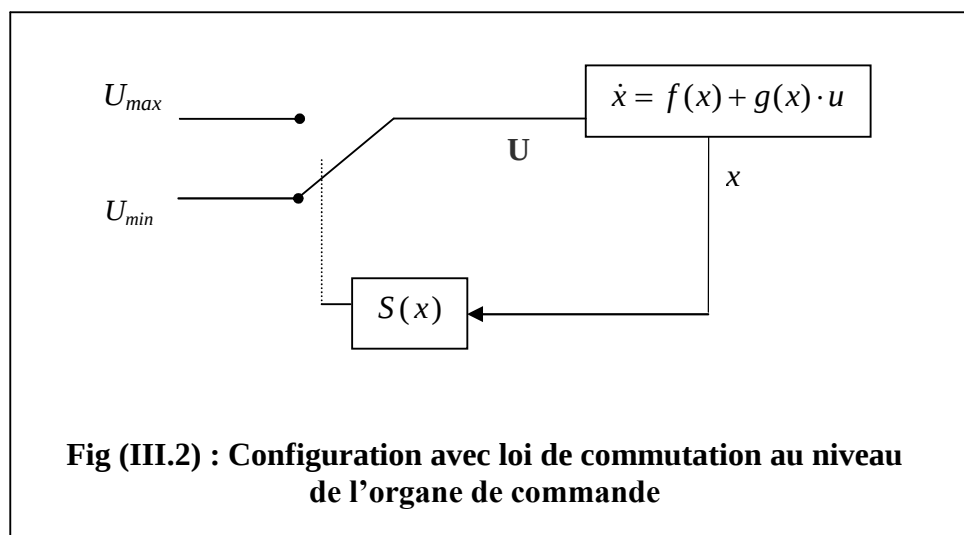
U

Suivant que $S(x)$ est positif ou négatif, la commande U est donnée par :

$$\begin{cases} U = -K_1(x) & \text{si } S(x) > 0 \\ U = -K_2(x) & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.1})$$

En mode glissant, le système évolue sur la surface de glissement, par conséquent $S(x) = 0$.

Une autre configuration permet la variation de la structure du système par simple commutation au niveau de l'organe de commande qui doit être conçu de sorte que la grandeur de commande U ne prenne que deux valeurs constantes U_{max} et U_{min} . Figure (III.2).



Cette configuration nécessite un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation rapide d'une position à l'autre. La commutation entre ces deux valeurs est imposée par la loi de commutation selon:

$$u = \begin{cases} U_{\max} & \text{si } S(x) > 0 \\ U_{\min} & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{III.2})$$

III.5- CONDITIONS D'EXISTENCE DU MODE GLISSANT :

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système dans le plan de phase de converger vers la surface de glissement.

Le mode glissant existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre $U_{\max}$ et $U_{\min}$, ce phénomène est illustré dans la figure.(III-3), pour le cas d'un système de réglage du deuxième ordre avec les deux grandeurs d'état x_{S1} et x_{S2} [7].

On admet d'abord une hystérèse sur la loi de commutation $s(x_S) = 0$ (droite en trait mixte) les droites décalées parallèlement de $\pm \Delta s'_h$. Une trajectoire avec $U = U_{\max}$ touche au point «a» le seuil de basculement inférieur. Si avec $U = U_{\min}$ la trajectoire est orientée vers l'intérieure de la zone de l'hystérésis, elle touche au point «b» le seuil de basculement supérieure au à lieu une commutation sur $U = U_{\max}$. Si la trajectoire est de nouveau orientée vers l'intérieure, elle touche au point «c» le seuil de basculement inférieure et ainsi de suite. Il y'a donc un mouvement continu à l'intérieure la zone de l'hystérésis.

Ce mouvement s'approche du régime stationnaire dans une certaine zone où des commutations continues existent. Dans ce cas la fréquence de commutation est très élevée

La surface de glissement est définie par :

$$s(x_S) = -k_S^T x_S + w k_w = 0. \dots\dots\dots(\text{III.3})$$

Par conséquent le vecteur d'état x_S suit une trajectoire qui respecte cette condition, la fréquence est alors infiniment élevée.

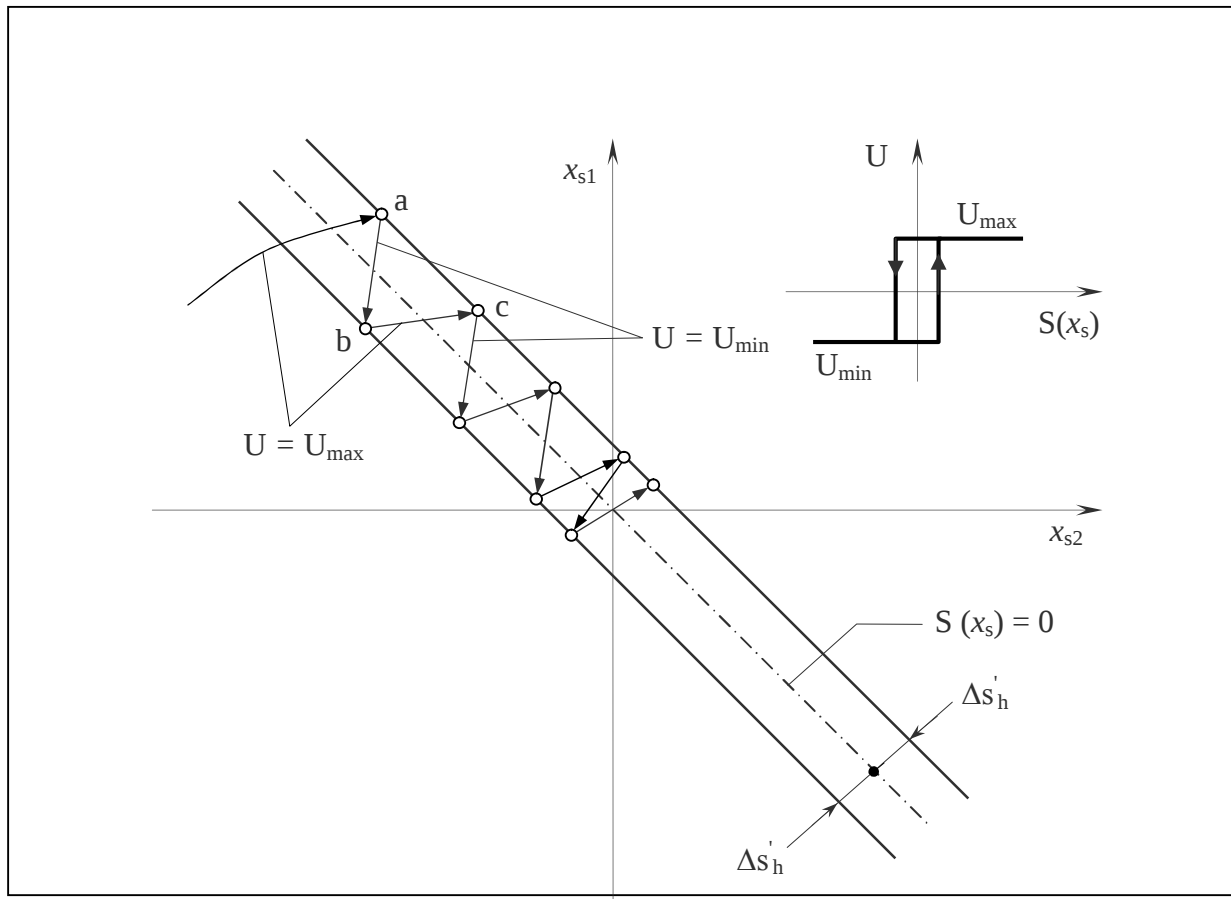


Fig (III-3) Démonstration du mode de glissement.

III.6- CHOIX DE 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], [5] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x,t) + g(x,t)u(t) \end{cases} \dots\dots\dots(III-04)$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi la surface $S(X)$ représente le comportement dynamique désiré du système. Nous trouvons dans la littérature des différences formes de la surface de glissement, et chaque surface présente de meilleures performances pour une application donnée.[10]

. **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 :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad \dots\dots\dots \text{(III-5)}$$

Avec :

$e(x)$: L'écart de la variable à 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 faut 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 ".

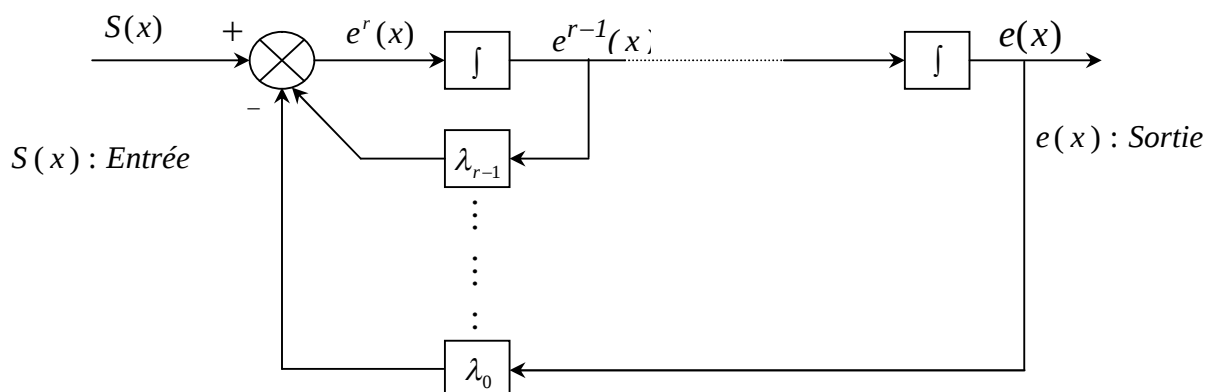


Fig (III- 5) : Linéarisation exacte de l'écart.

III.7-CONDITION DE CONVERGENCE :

Les conditions d'existences et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence :

III.7-1- Fonction discret 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 :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0$$

III.7-2-Fonction de LYAPUNOV :

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive pour les variables d'état du système. L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence.

Nous définissons la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \dots\dots\dots(III.6)$$

La dérive de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \dots\dots\dots(III.7)$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. D'où la condition de convergence exprimée par $S(x).\dot{S}(x) < 0$ [11].....(III.8)

III.8-Application de la commande par mode de glissement à la MAS

Dans notre cas le technique de mode glissant est associée à la commande vectorielle en pour la commande de la machine asynchrone au lieu régulateur PI

III.8-1- Réglage en cascade de la vitesse par mode de glissement :

Maintenant , nous allons reprendre le système de la machine asynchrone de premier chapitre dont les variables d'état sont les courants statorique et le flux rotorique et la vitesse de rotation mécanique.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sd}}{dt} = -\left(\frac{1}{T_s\sigma} + \frac{1}{T_r} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma}\right)i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{MT_r} \Phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} \cdot V_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_s i_{sd} - \left(\frac{1}{T_s\sigma} + \frac{1}{T_r} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma}\right)i_{sq} - \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M} \omega_s \cdot \Phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} \cdot V_{sq} \\ \frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Phi_r \\ C_e = p \cdot \frac{M}{T_r} \cdot \Phi_r \cdot i_{sd} \\ \omega_r = \frac{M}{T_r} \cdot \frac{i_{sq}}{\Phi_r} \\ J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega \end{array} \right.$$

III.8-1-1-Surface de régulation de la vitesse :

$$S(\omega_r) = \omega_{rref} - \omega_r \quad \dots\dots\dots (III-9)$$

La dérivée de la surface est :

$$S(\dot{\omega}_r) = \dot{\omega}_{rref} - \dot{\omega}_r \quad \dots\dots\dots (III-10)$$

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

$$S(\dot{\omega}_r) = \dot{\omega}_{rref} - p \cdot \frac{M}{J \cdot I_r} \Phi_{rd} \cdot i_{sq} + \frac{f}{J} \omega_r + \frac{C_r}{J} \quad \dots\dots\dots (III-11)$$

Avec:

$$i_{sq} = i_{sqeq} + i_{sq} \quad \dots\dots\dots (III-12)$$

Durant le régime de mode glissant ;

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

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

$$i_{sqeq} = \frac{J.l_r}{p.M.\Phi_{rd}} \left[\dot{\omega}_{rref} + \frac{f}{J} \omega_{rref} + \frac{C_r}{J} \right] \dots\dots\dots (III-13)$$

Et

$$i_{sqn} = K_1 \cdot \frac{S(\omega_r)}{|S(\omega_r)| + \mu_1} \dots\dots\dots (III-14)$$

III.8-2-2- Surface de régulation du courant i_{sq} :

$$S(i_{sq}) = i_{sqref} - i_{sq} \dots\dots\dots (III-15)$$

Durant le régime de mode glissant

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

A travers l'expression (II-07) on obtient :

$$V_{sqeq} = \sigma.L_s \left[\dot{i}_{sq} + \left(\frac{1}{\sigma.T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{T_r} \right) i_{sq}^* + \omega_s i_{sd} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M.sr} \cdot \omega_r \cdot \Phi_{rd} \right] \dots\dots (III-16)$$

Et

$$V_{sqn} = K_2 \cdot \frac{S(i_{sq})}{|S(i_{sq})| + \mu_2} \dots\dots\dots (III-17)$$

Avec :

$$V_{sq} = V_{sqeq} + V_{sqn} \dots\dots\dots (III-18)$$

III.8.2-3- Surface de régulation du courant i_{sd} :

$$S(i_{sd}) = i_{sdref} - i_{sd} \dots\dots\dots (III-19)$$

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

$$V_{sdeq} = \sigma.l_s \left[\dot{i}_{sdref} + \left(\frac{1}{\sigma.T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{T_r} \right) i_{sdref} - \omega_s i_{sq} - \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M.T_r} \cdot \Phi_{rd} \right] \dots\dots\dots (III-20)$$

Et

$$V_{sdn} = K_3 \cdot \frac{S(i_{sd})}{|S(i_{sd})| + \mu_3} \dots\dots\dots (III-21)$$

Avec :

$$V_{sq} = V_{sqeq} + V_{sqn} \dots\dots\dots (III-22)$$

III.8-2-4- Surface de régulation du flux rotorique :

En prenant la même surface que celle de la vitesse

$$S(\Phi_r) = \Phi_{r.ref} - \Phi_r \dots\dots\dots (III-23)$$

donc

$$S(\dot{\Phi}_r) = \dot{\Phi}_{r.ref} - \dot{\Phi}_r$$

$$S(\dot{\Phi}_r) = \dot{\Phi}_{r.ref} + (1/Tr)\Phi_{rd} - (M/Lr)I_{sd}$$

Durant le mode glissement, on obtient :

$$I_{sdeq} = \frac{Lr}{M} \left[\dot{\Phi}_{r.ref} + (1/Tr)\Phi_{r.ref} \right]$$

Avec la composante non linéaire est :

$$I_{sdn} = K_4 \cdot \frac{S(\Phi_r)}{|S(\Phi_r)| + \mu_4}$$

Le choix des gains (K_1 , K_2 , K_3 et k_4) se fera de façon à imposer la valeur désirée à la sortie du régulateur.

Les résultats de la simulation est représentés par la fig(III.6). Pour illustrer les performances du réglage par mode glissement avec des surface non linéaires appliquées à la machine asynchrone, nous avons simulé un démarrage à vide avec application de charge nominale à l'instant $t=1.5s$.

III-9 DOMAINES D'APPLICATION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSEMENT :

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans les domaines d'entraînement à vitesse variable. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables: ou complètement ouvertes ou complètement fermées. Une autre application consiste à l'utilisation des onduleurs monophasés ou triphasés à pulsation pour l'alimentation des machines asynchrones ou synchrones.

Les entraînements électriques pour des machines outils ou des robots, entraînement qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage 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 de réglage par mode glissant.

III.10.1-SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Afin de tester les résultats obtenus par simulation de la commande par mode glissant de la machine asynchrone. Nous avons simulé le système dans des conditions de fonctionnement variable à savoir la variation de l'alimentation, de la vitesse(157 rad/s), de la charge($C_r = 5 \text{ N.m}$) et la variation paramétrique de la résistance rotorique ($R_r = 6.3\Omega$).

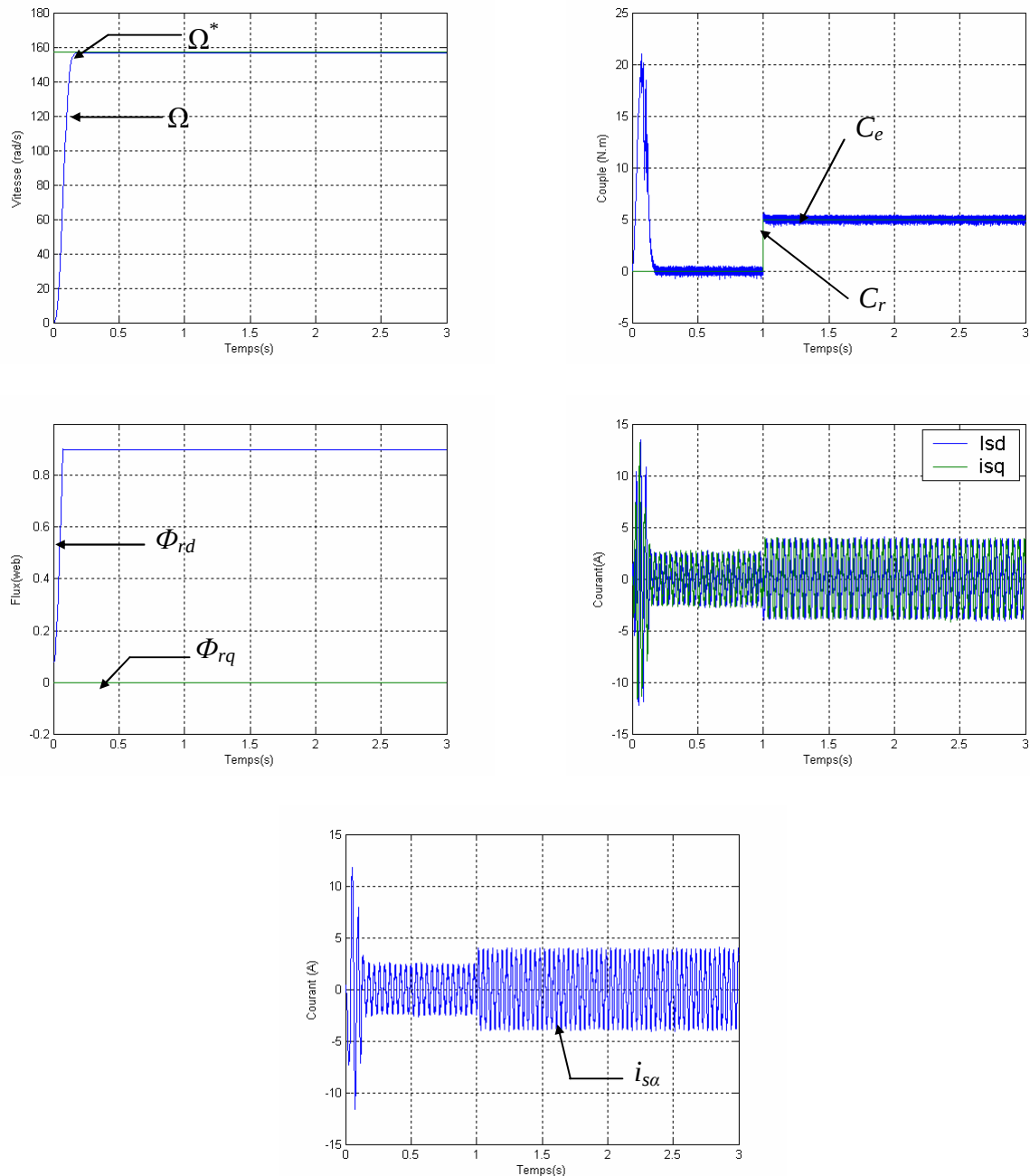


Fig. (III.6) : Simulation de la commande par mode glissant.

III.10.2-Teste de robustesse :

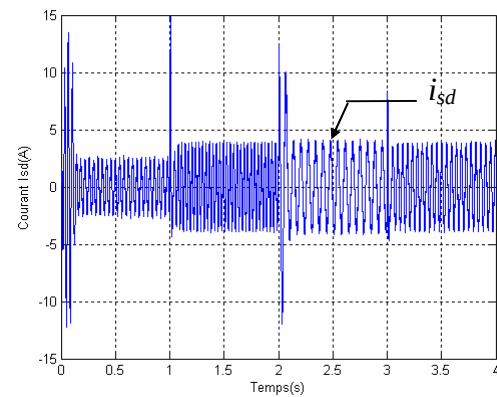
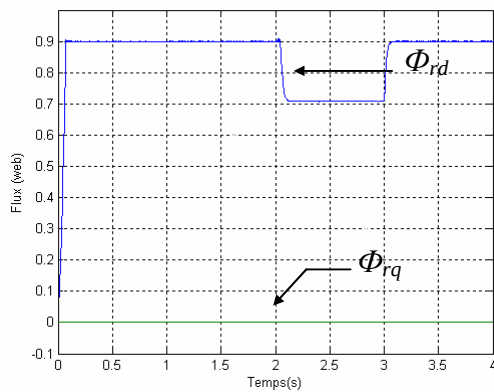
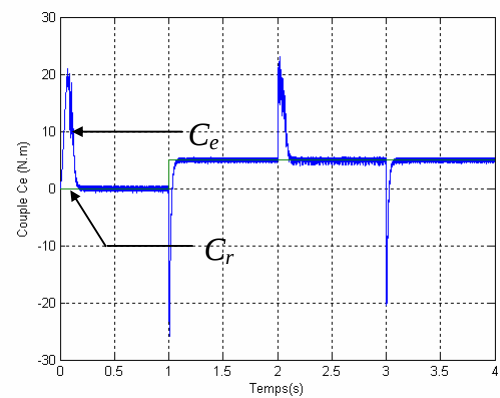
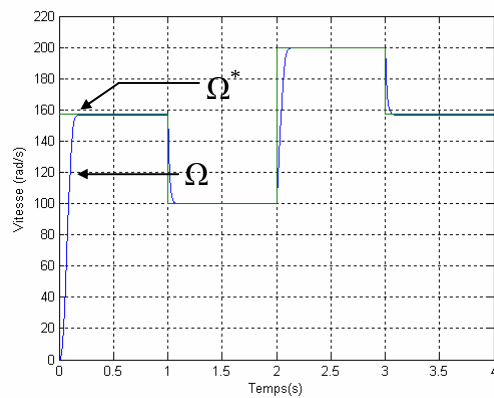
Pour mettre en évidence l'importance de la technique de la commande par mode glissant, on va effectuer des tests de robustesse à savoir la variation de la vitesse, l'inversion de la vitesse, la variation de la charge et l'influence de variation des paramètres de la machine en particulier la résistance rotorique.

III.10.2.1- Test de robustesse à la variation de la vitesse :

La figure (III-7) présente les résultats de simulation lors de la variation de la vitesse (157rad/s, 100rad/s, 200rad/s et 157rad/s). On remarque que le système répond positivement à ce test, la vitesse suit rapidement sa nouvelle référence, ce qui veut 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 de référence.

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

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



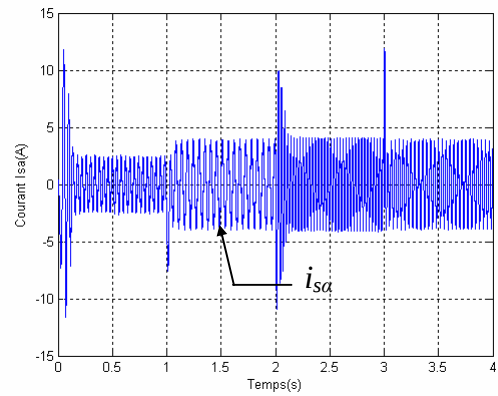
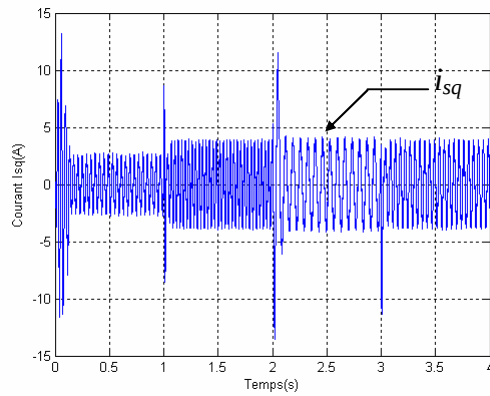
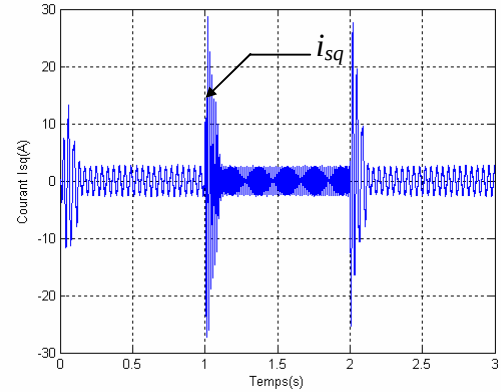
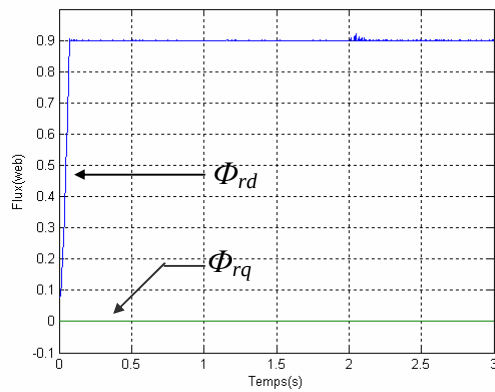
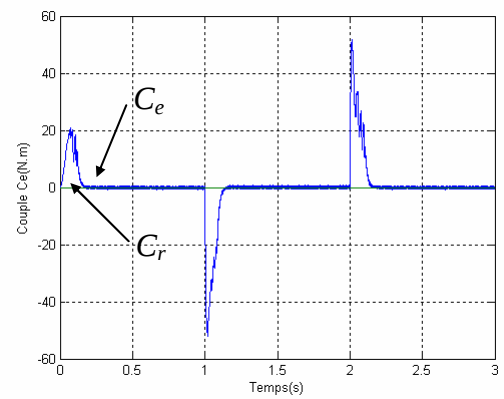
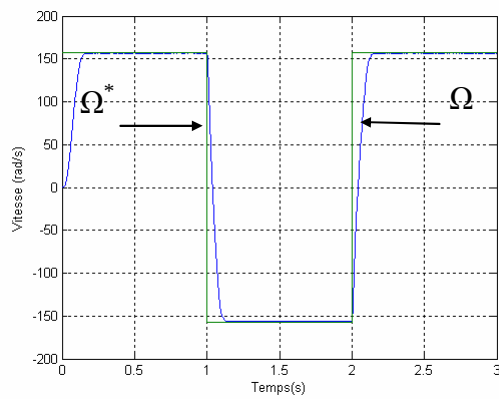


Fig. (III-7) : Test de robustesse à la variation de la vitesse

III.10.2.2-Test de robustesse à l'inversion du sens de rotation :



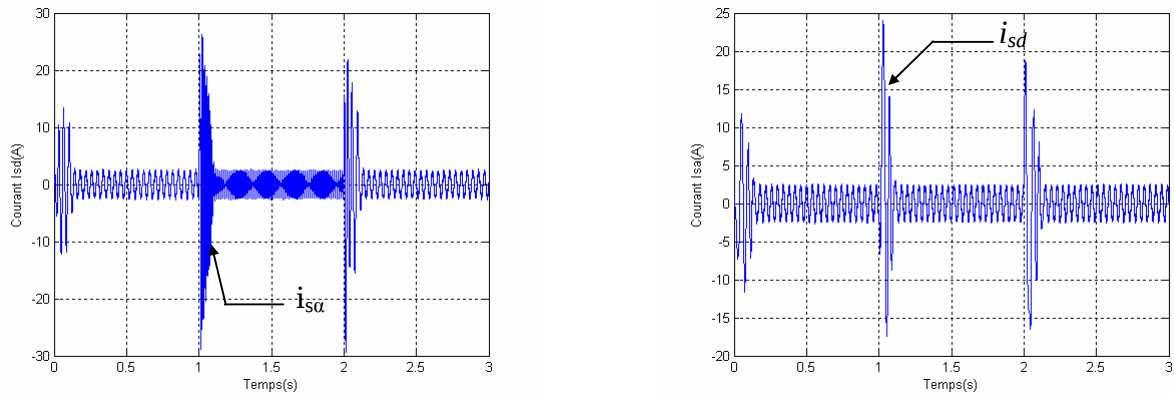


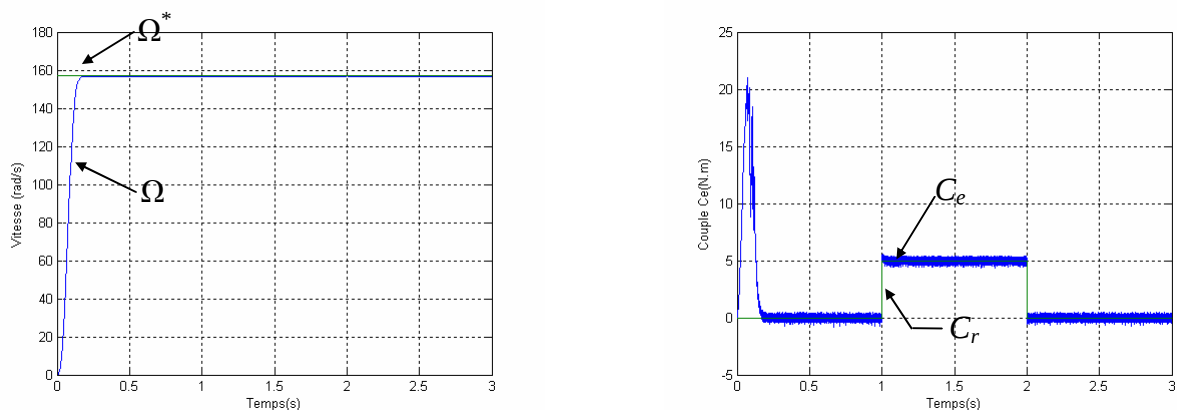
Fig. (III-8) : Test de robustesse par l'inversion de vitesse

La figure (III-8) constitue les courbes pour l'inversion de la vitesse. On remarque que la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse court. L'allure du couple électromagnétique et du courant statorique présent 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.

III.10.2.3-Test de robustesse à la variation de la charge :

Ce test est représenté par la figure (III-9) où on applique une charge entre $t_1=1s$ et $t_2=2s$. On constate également que la vitesse atteint très rapidement sa référence sans aucun dépassement. La courbe du couple électromagnétique montre le fort couple aux premiers temps de démarrage, puis suit sa consigne. Le courant de phase statorique suit parfaitement la variation de la charge. Le flux rotorique prend la valeur 0.9 et reste toujours constant quelque soit les variations appliquées.



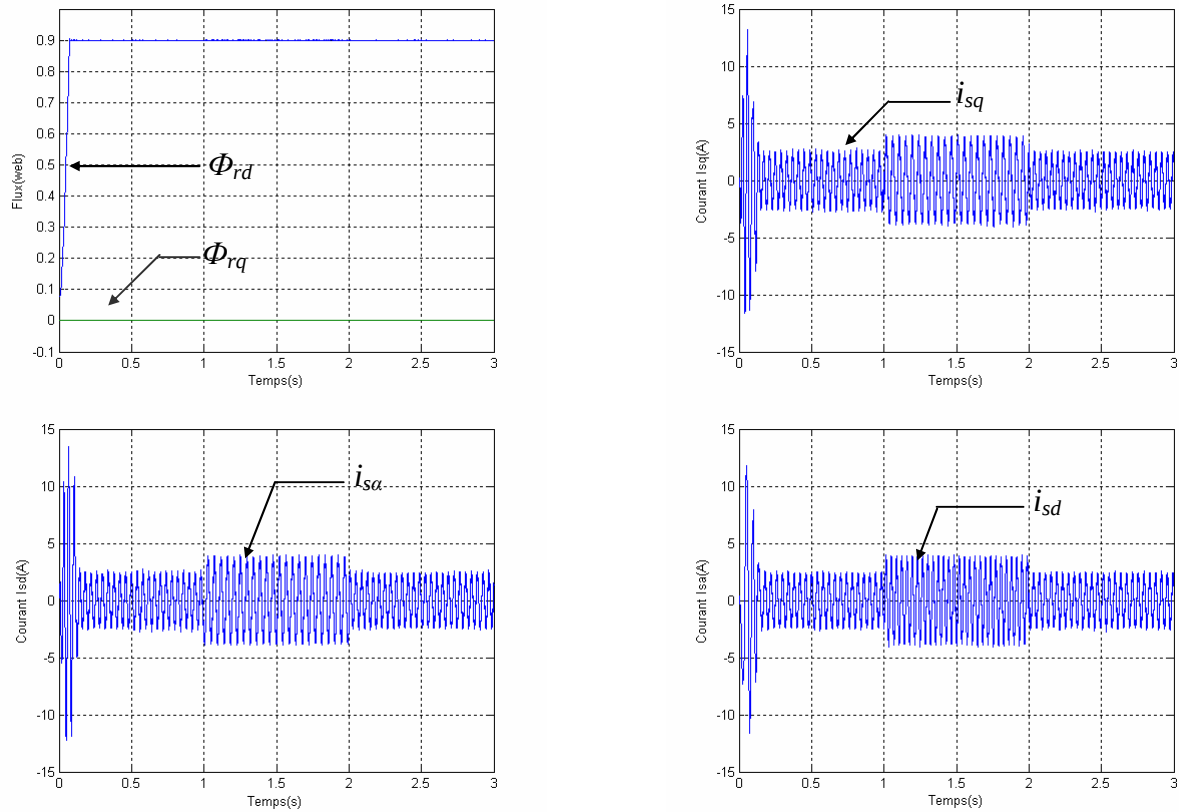
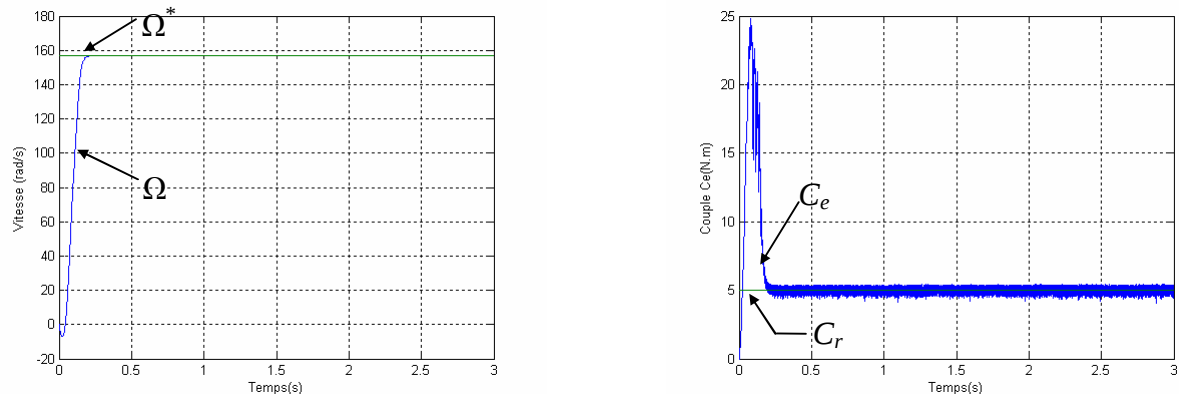


Fig. (III-9) : Test de robustesse à la variation de la charge

III.10.2.4-Test de robustesse à la variation de la résistance rotorique :

Les résultats de simulation obtenus pour le cas de variation de la résistance rotorique de $R_{r1} = 6.3 \Omega$ à $t = 0$ et $R_{r2} = 1.5 R_{r1}$ à $t = 1s$ et à $R_{r3} = 1.75R_{r1}$ à $t = 2s$ sont présentes sur la figure (III-10). On remarque que la vitesse, le couple, le flux, et le courant statorique ne changent pas. On constate aussi l'importance de cette commande sur le maintien de la constance du flux ce qui confirme la robustesse de la commande par mode glissant en présence de variation paramétrique.



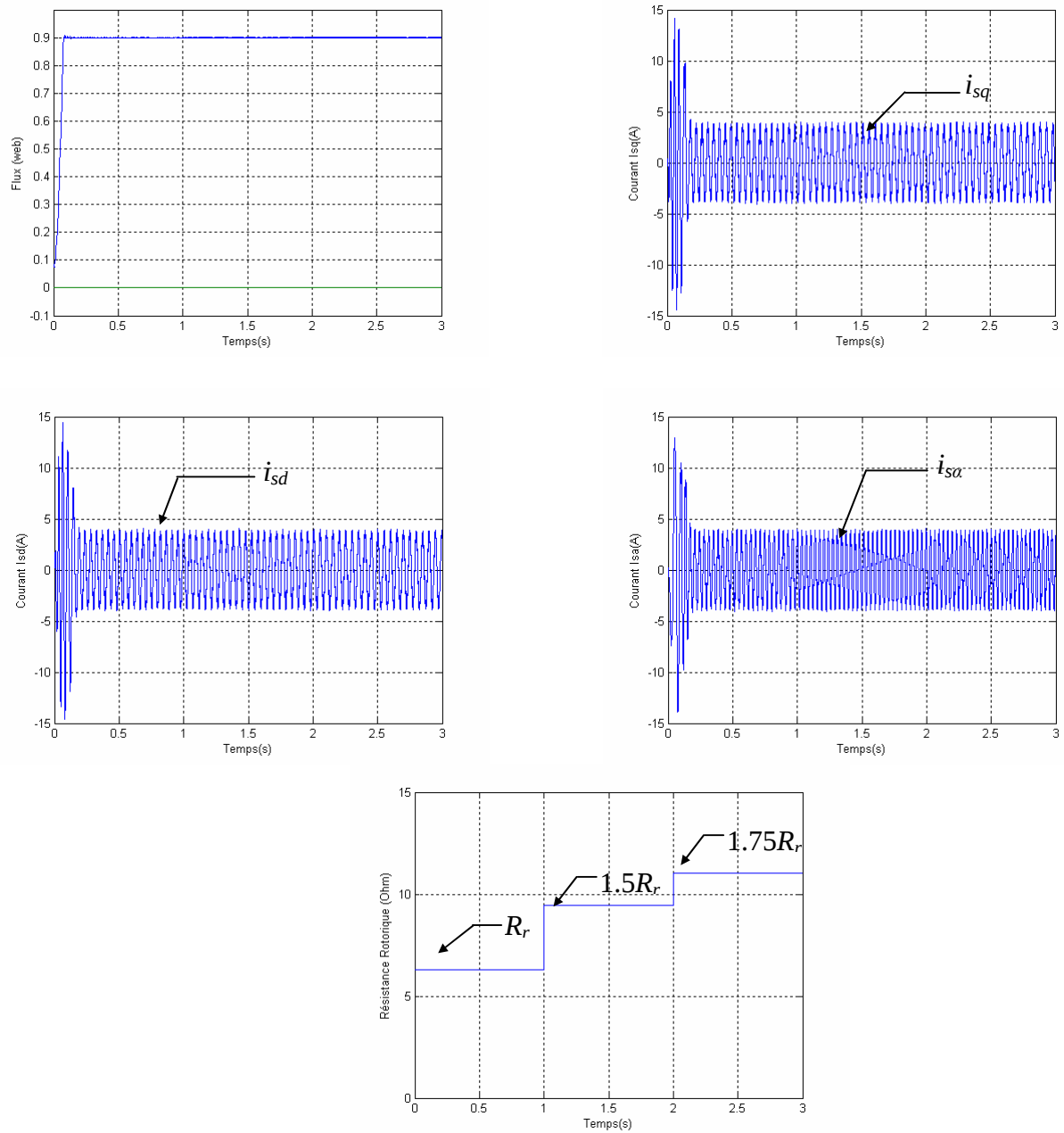


Fig. (III-10) : Test de robustesse à la variation de la résistance rotorique

III.11-CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la technique de commande par mode glissant pour la commande du moteur asynchrone. nous constatons que le choix convenable des surfaces de commutation permet d'obtenir des hautes performances suite à la nature de la commande a structure variable qui s'adapte bien aux systèmes non linéaires.

La commande par mode glissant montre que les performances sont meilleures autour de point de fonctionnement, aussi bien par rapport aux variations de la vitesse, l'inversion de vitesse, la variation de la charge et la variation paramétrique. De plus cette commande présente la facilité d'implantation en pratique.

La commande par mode glissant était adaptée dans la commande des systèmes non linéaires où les paramètres incertains et variables ne peuvent influencer la robustesse de cette technique. par ailleurs, on peut choisir plusieurs formes de la surface de glissement, de même qu'on peut travailler sur plusieurs surfaces en même temps.

Finalement on peut conclure que la caractéristique essentielle de cette technique est la capacité de robustesse, cette dernière garantie une bonne insensibilité à la variation paramétrique du système à commander.