

Commande par mode glissant de la MSAP pour l'asservissement en vitesse ou en position

IV.1 Introduction

Après avoir présenté la théorie de la commande à structure variable (CSV) avec les différentes structures de la commande non linéaire, nous allons analyser dans cette partie l'application de la commande par mode de glissement à la régulation de la vitesse ou de la position du moteur synchrone à aimants permanents afin de valider l'approche présentée par des résultats de simulation.

Les lois de commande pour l'asservissement de vitesse ou de position ont pour objectifs :

- d'assurer la rapidité et la précision de la réponse des grandeurs régulées,
- d'assurer la robustesse du système vis-à-vis des perturbations et des variations des paramètres de la charge mécanique sur l'arbre du moteur.

IV.2 Application de la CSV à la machine synchrone à aimants permanents

Nous rappelons également les équations d'ordre électrique, ainsi que celles d'ordre mécanique représentant la dynamique de la machine (voir chapitre I).

$$\begin{cases} \overset{x}{I_d} = \frac{-R_s}{L_d} \cdot I_d + \frac{p \cdot \Omega}{L_d} \cdot I_q + \frac{V_d}{L_d} \\ \overset{x}{I_q} = \frac{-p \cdot \Omega \cdot L_d}{L_q} \cdot I_q - \frac{R_s}{L_q} \cdot I_q - \frac{p \cdot \phi_{sf}}{L_q} \cdot \Omega + \frac{V_q}{L_q} \\ \overset{x}{\theta} = \Omega \\ \overset{x}{J} \cdot \Omega = C_e - C_r - f \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.1 L'asservissement de vitesse

§ Stratégie de réglage à trois surfaces

Le réglage de la vitesse de la MSAP nécessite le contrôle du courant absorbé par la machine. Une solution classique consiste à utiliser le principe de la méthode de réglage en cascade (structure de trois surfaces) la boucle interne permet de contrôler les courants, tandis que la boucle externe permet de contrôler la vitesse. La figure 4.1 représente la structure

cascade de régulation de vitesse par mode de glissement de la MSAP alimentée par un onduleur de tension.

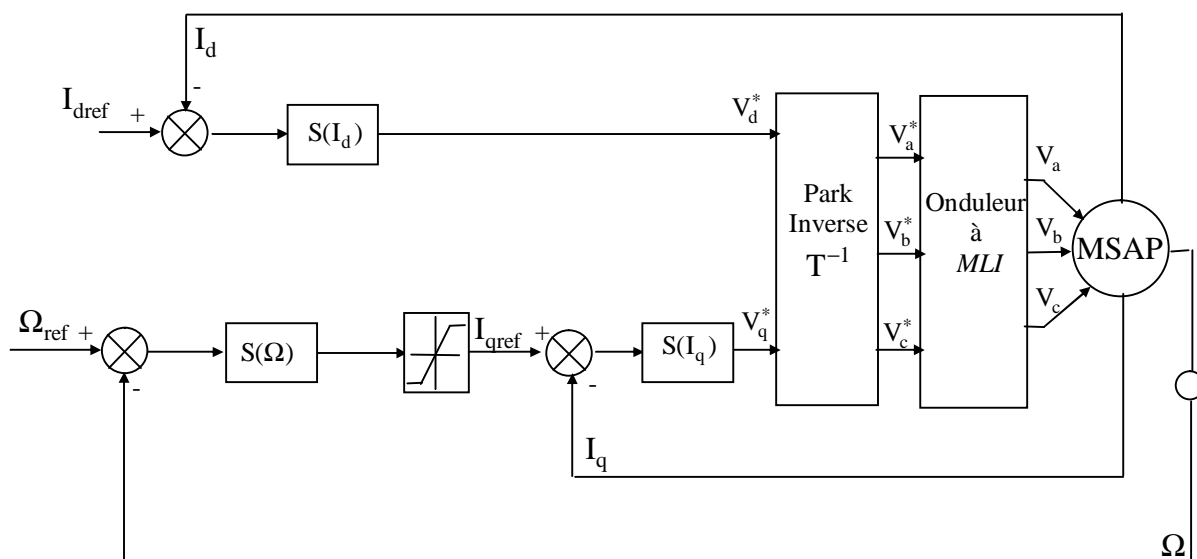


Figure 4.1: Structure de commande de la vitesse pour la MSAP.

Nous définissons les trois surfaces par :

- La première surface, celle de la vitesse, est d'écrite par :

$$S(\Omega) = \Omega_{\text{ref}} - \Omega \quad (\text{IV.2})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, nous avons :

$$S(\Omega) = 0 \quad \text{et} \quad \dot{S}(\Omega) = 0 \quad (\text{IV.3})$$

D'où nous déduisons :

$$I_{\text{qn}} = 0$$

$$\dot{S}(\Omega) = 0 \Rightarrow I_{\text{qeq}} = \frac{f \cdot \Omega + C_r}{p \cdot [\phi_{\text{sf}} - (L_d - L_q)I_d]} \quad (\text{IV.4})$$

Durant le mode de glissement, le produit de la surface par sa dérivée doit être inférieur à zéro. Cela exige de vérifier la condition de Lyapunov suivant :

$$\lim_{s \rightarrow 0} S(\Omega) \cdot \dot{S}(\Omega) < 0 \quad (\text{IV.5})$$

En substituant l'expression de la commande équivalente (IV.3) dans (IV.4), la dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(\Omega) = -\frac{p}{J} [\phi_{\text{sf}} - (L_d - L_q)I_d] I_{\text{qn}} \quad (\text{IV.6})$$

avec:
$$I_{qn} = K_v \cdot \text{sign}(S(\Omega)) \quad (\text{IV.7})$$

Ainsi, la commande I_{qref} représente la somme des grandeurs I_{qeq} et I_{qn} :

$$I_{qref} = I_{qeq} + I_{qn} \quad (\text{IV.8})$$

- La deuxième surface de la boucle interne, responsable du contrôle du courant I_q , est décrite par :

$$S(I_q) = I_{qref} - I_q \quad (\text{IV.9})$$

la dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(I_q) = \frac{L_d \cdot \Omega \cdot p}{L_q} I_d + \frac{R_s}{L_q} \cdot I_q + \frac{p \cdot \Omega \cdot \phi_{sf}}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \quad (\text{IV.10})$$

Étant donné que : $V_q = V_{qeq} + V_{qn}$

on obtient:

$$\dot{S}(I_q) = \frac{L_d \cdot p \cdot \Omega}{L_q} I_d + \frac{R_s}{L_q} \cdot I_q + \frac{p \cdot \Omega \cdot \phi_{sf}}{L_q} + \frac{V_{qeq}}{L_q} + \frac{V_{qn}}{L_q}$$

Durant le mode de glissement en régime permanent, nous avons :

$$S(I_q) = 0 \text{ alors } \dot{S}(I_q) = 0 \quad (\text{IV.11})$$

avec:
$$V_{qn} = 0$$

on obtient :
$$V_{qeq} = R_s \cdot I_q + p \cdot \Omega [\phi_{sf} + L_d \cdot I_d] \quad (\text{IV.12})$$

et

$$V_{qn} = K_q \cdot \text{sign}(S(I_q)) \quad (\text{IV.13})$$

D'où l'expression de V_{qc} :
$$V_{qc} = V_{qeq} + V_{qn} \quad (\text{IV.14})$$

- La troisième surface est celle du contrôle du courant I_d . Elle est décrite par :

$$S(I_d) = I_{dref} - I_d \quad (\text{IV.15})$$

Dans ce cas nous donnons juste les expressions de :

$$V_{deq} = R_s \cdot I_d - p \cdot L_q \cdot I_q \cdot \Omega \quad (\text{IV.16})$$

$$V_{dn} = K_d \cdot \text{sign}(S(I_d)) \quad (\text{IV.17})$$

$$V_{dc} = V_{deq} + V_{dn} \quad (\text{IV.18})$$

La stabilité du système nécessite de vérifier que le produit de la surface et sa dérivée est inférieur ou égal à zéro. Afin d'assurer cette condition, les paramètres, K_v , K_d et K_q sont toujours positifs.

Ces paramètres sont choisis de façon à :

- § assurer la rapidité de la convergence,
- § imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement,
- § limiter le courant à une valeur admissible pour un couple maximal.

Dans le régime permanent, on a :

$$\overset{x}{I}_d = 0, \quad \overset{x}{I}_q = 0, \quad \overset{x}{\Omega} = 0 \quad (\text{IV.19})$$

En remplaçant (IV.19) dans (IV.1), on obtient :

$$\begin{cases} -R_s \cdot I_d + \omega \cdot L_q \cdot I_q + V_d = 0 \\ -R_s \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d + V_q - \omega \cdot \phi_{sf} = 0 \\ C_e - C_r = f \cdot \Omega \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

Les conditions d'existence du mode de glissement sont donc :

$$\begin{aligned} K_v &\geq \left| \frac{1}{p \cdot \phi_{sf}} (-f \cdot \Omega - C_r) \right| \\ K_d &\geq \left| -R_s \cdot I_d + \omega \cdot L_q \cdot I_q \right| \\ K_q &\geq \left| -R_s \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d - \omega \cdot \phi_{sf} \right| \end{aligned} \quad (\text{IV.21})$$

IV.2.2 L'asservissement de la position

La CSV pour la position est élaborée à partir d'une variété de glissements de type une droite :

$$S(\theta) = R_1 \cdot e_\theta + R_2 \cdot \overset{x}{e}_\theta \quad (\text{IV.22})$$

avec :

$$e_\theta = \theta_{ref} - \theta$$

e_θ : l'écart entre la consigne de position θ_{ref} et la position mesurée θ .

$\overset{x}{e}_\theta$: est la dérivée de l'erreur de position.

R_1, R_2 : sont les paramètres de la variété de glissements.

On utilise un asservissement à structure variable de position qui génère le courant de référence. L'asservissement de vitesse ne figure plus sur le schéma de commande (figure 4.2). Par contre, la CSV utilise l'information sur la vitesse (un retour tachymétrique existe).

La condition nécessaire et suffisante pour l'obtention d'un régime glissant sur $S(\theta)$ est que R_1 et R_2 doivent être positifs. Le rapport R_2/R_1 détermine la constante de temps du régime glissant sur la variété et, par conséquent, la rapidité du système commandé [12].

La commande pour l'asservissement de position est composée uniquement d'une partie commande rendue continue. Ceci est vrai d'autant plus que l'addition d'une commande équivalente pour cet asservissement ne modifie pas la réponse en position [12] [18].

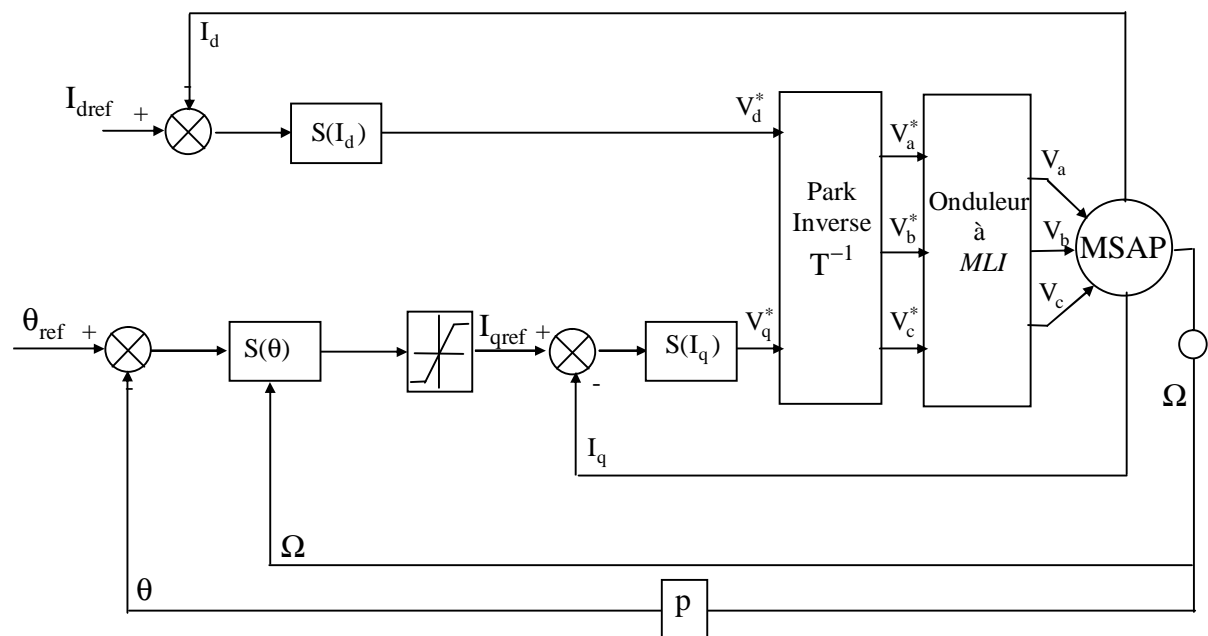


Figure 4.2 :Schéma global du réglage de la position par mode de glissement d'une MSAP.

IV.3 Résultats de simulation

Nous avons testé en simulation (logiciel MTLAB simulink) la loi de commande par mode de glissement de la vitesse et de la position sur la MSAP.

IV.3.1 Elimination du phénomène de chattering

Le phénomène de chattering est provoqué par une commutation rapide de la commande quand les modes techniques des modes glissants sont utilisés [25].

Dans la but de réduire les broutements (phénomène de chattering haute fréquence), nous pouvons imposer une variation de la valeur de la commande u_n en fonction de la distance entre la variable d'état et la surface de glissement.

IV.3.1.1 L'asservissement de vitesse

a. Commande de type relais

La fonction « relais » est définie par : $u_n = K \cdot \text{sign}(S(x))$. Si le gain K est très petit, le temps de réponse sera long. Si K est très grand, le temps de réponse sera rapide, mais des oscillations indésirables risquent d'apparaître sur les réponses en régime permanent. Le modèle de la MSAP, présenté au premier chapitre a été testé en charge (figure 4.3).

La figure 4.3 représente les résultats de l'essai à vide pour une référence de (200 rad/s), avec l'application de charge de 5 Nm à l'instant $t = 0.2$ s. La réponse de la vitesse obtenue avec la CSV est très rapide et sans aucune déformation. La réponse du couple est pratiquement instantanée.

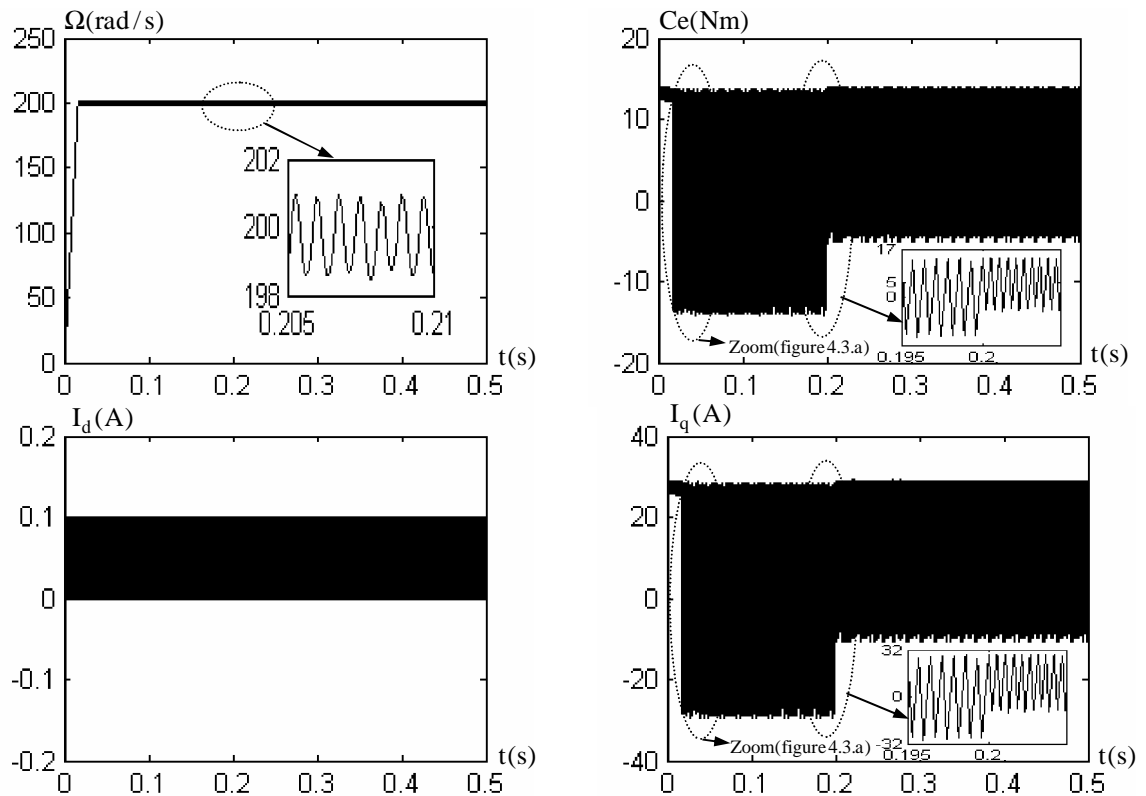


Figure 4.3: Résultats de simulation en charge pour une commande discontinue de type « relais ».

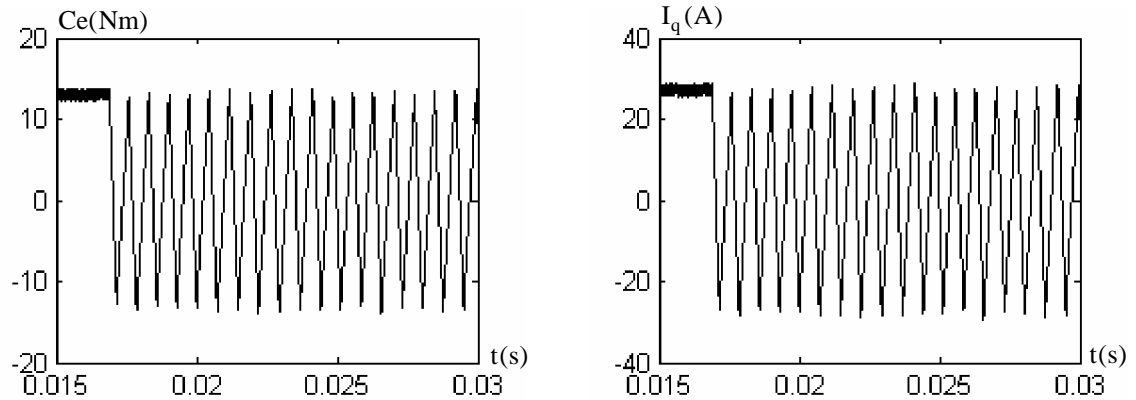


Figure 4.3.a : Agrandissement des oscillations générées par la commande « relais » au niveau de C_e et I_q .

La figure 4.3.a représente un agrandissement d'une zone de la figure 4.3. Les oscillations de haute fréquence et d'amplitude élevée que l'on remarque sur les courbes du couple et du courant sont dues à la partie discontinue de la commande qui prend des valeurs importantes. Ceci est gênant car cela peut induire des oscillations sur la réponse en vitesse. Pour palier cet inconvénient, on a recours à une autre commande dite « commande adoucie ».

b. Commande adoucie

Le résultat présenté sur la figure 4.4 est obtenu en remplaçant la fonction « relais » par une fonction adoucie.

Ce résultat représente un essai à vide suivi de l'introduction d'un couple de charge égal à 5 Nm à $t=0.2$ s. On y remarque qu'il n'y a plus d'oscillations sur les réponses du couple et des courants.

On constate que la réponse en vitesse, obtenue avec la CSV pour un démarrage à vide est rapide mais on observe une erreur statique persistante provoquée par la perturbation de la charge. Cette erreur statique reste l'inconvénient majeur de l'utilisation de cette configuration. Pour palier cet inconvénient, le recours à une autre forme de commande dite intégrale est obligatoire.

c. Commande intégrale

La figure 4.5 représente les résultats de l'essai à vide suivi d'application d'une charge de 5 Nm à l'instant $t = 0.2$ s. On remarque qu'il n'y a plus d'oscillations sur le couple et les courants. On constate que la vitesse garde toujours sa forme et l'erreur provoquée par la perturbation de la charge est compensée instantanément.

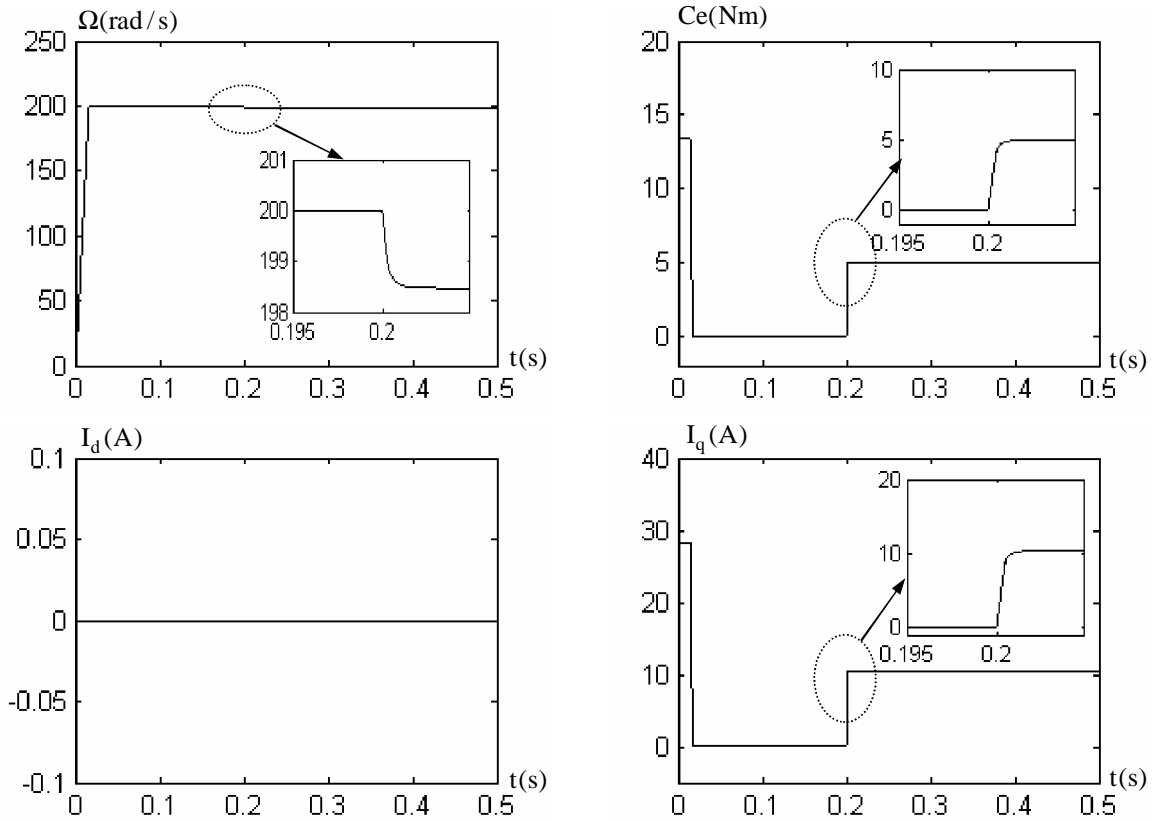


Figure 4.4: Résultats de simulation en charge pour une commande discontinue de type «adoucie».

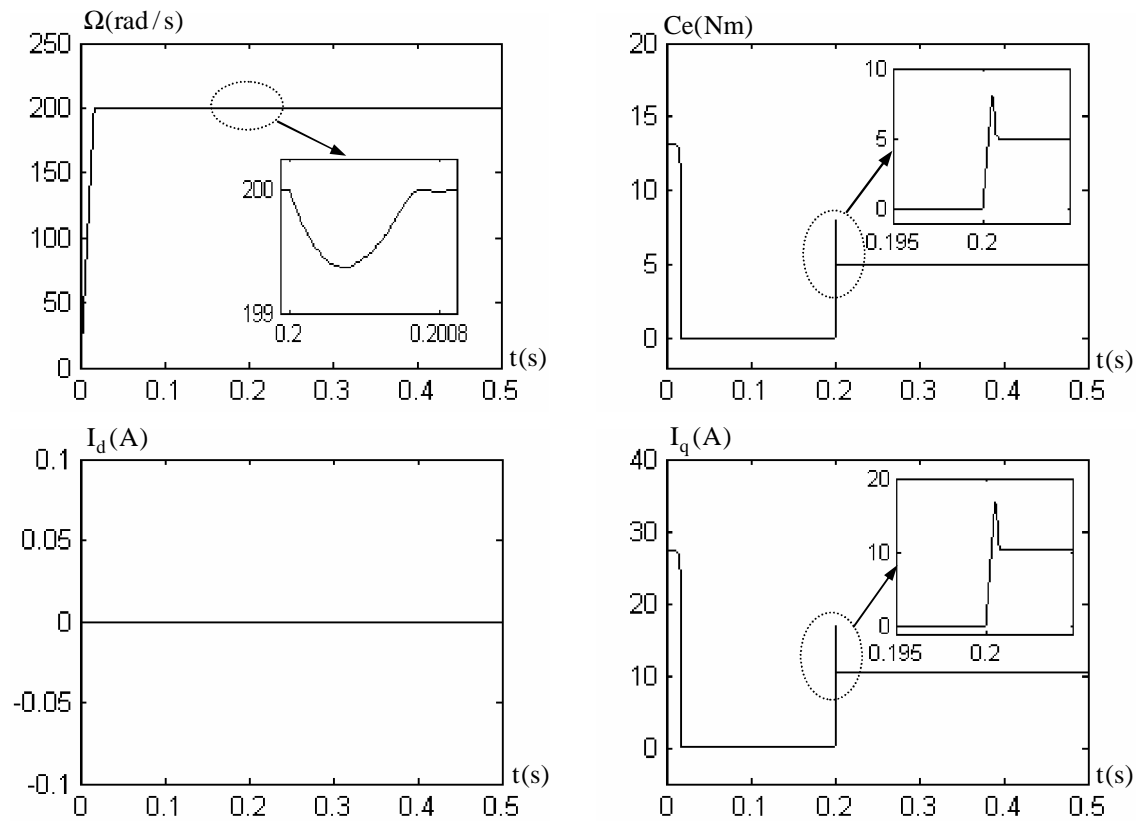


Figure 4.5: Résultats de simulation en charge pour une commande discontinue de type «intégrale».

Nous avons analysé le comportement du système à structure variable (CSV) pour diverses formes de la commande discontinue dans le cas d'asservissement de en vitesse. Les résultats obtenus avec la CSV sont comparés entre eux afin de montrer la meilleure structure de commande. Les critères pris en compte sont: rapidité de réponse, erreur statique nulle, oscillations sur les réponses faibles (élimination du phénomène de chattering).

L'utilisation de la commande rendue continue (intégrale), est l'une des meilleures solutions proposées. Elle diminue considérablement l'amplitude des oscillations de hautes fréquences. Pour cette raison, on va appliquer seulement la commande intégrale pour l'asservissement de la vitesse ou de la position en tenant compte de la présence de l'onduleur.

IV.3.2 Résultats de simulation pour l'asservissement de la vitesse

Dans l'essai de la figure 4.6, nous avons simulé un démarrage à vide avec application d'une charge égale 5 Nm à $t=0.2$ s pour une vitesse de référence de 200rad/s. Pour l'essai de la figure 4.7, nous avons inversé le sens de rotation de +200 rad/s à -200 rad/s à l'instant $t = 0.3$ s.

Les résultats de simulation montrent que la réponse en vitesse est rapide et précise. L'erreur provoquée par la perturbation de la charge est compensée instantanément. L'inversion du sens de rotation permet de déduire que la commande est robuste.

Le courant I_q est l'image du couple. Les seules oscillations résiduelles observables sur le couple aux instants $t = 0.2$ s et $t = 0.21$ s correspondent à une oscillation autour de la variété de glissement qui est très rapidement atténuée, car la commande passe de la commande discontinue à la commande continue et le système entre en régime glissant de $S(\omega) = 0$.

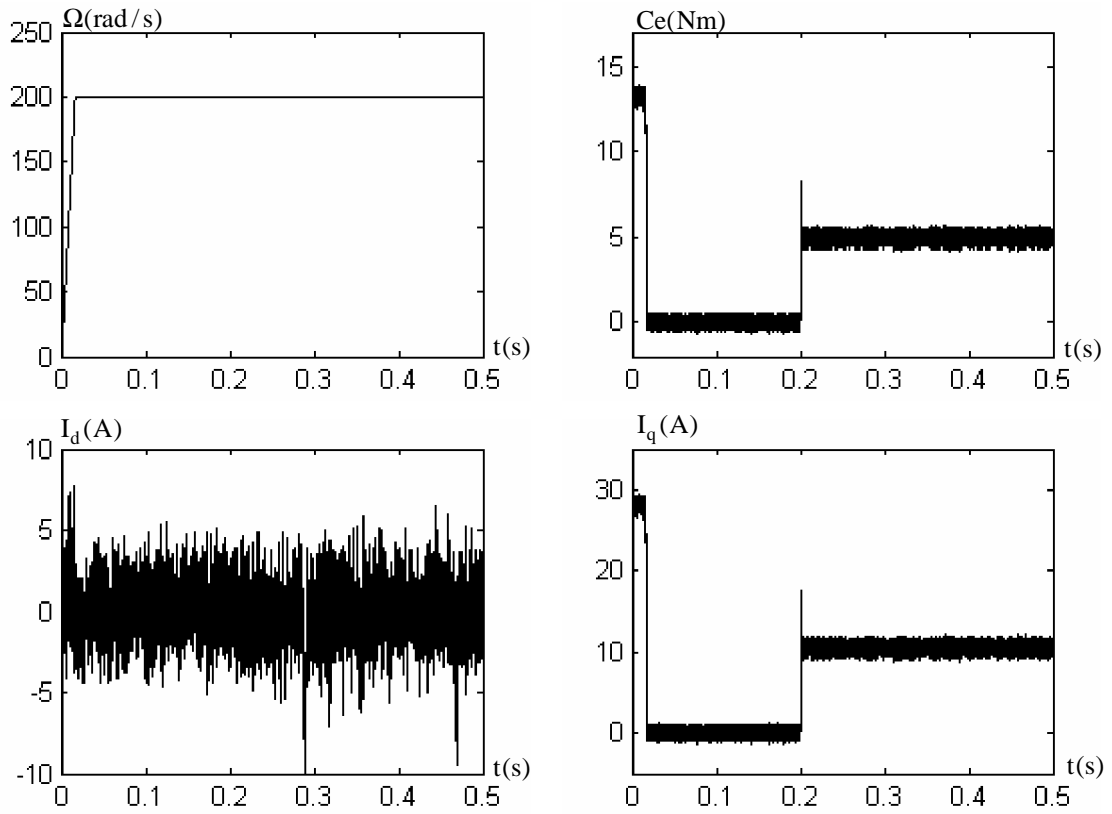


Figure 4.6: Réponses de la MSAP en charge avec ($C_r=5$ N.m à $t=0.2$ s)

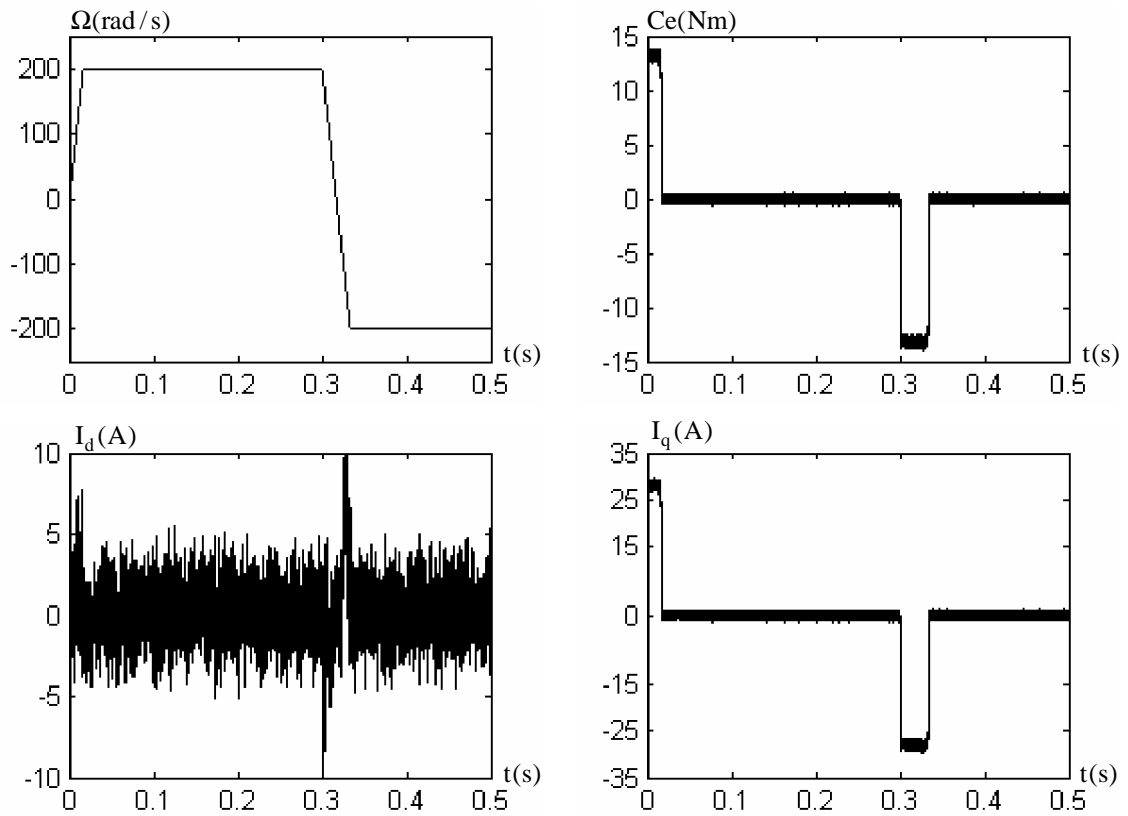


Figure 4.7: Réponses de la MSAP pour une inversion de la vitesse (200 à -200 rad/s)

IV.3.3 Résultats de simulation pour l'asservissement de la position

Les résultats de simulation d'une CSV de trois surfaces pour la commande en position, sont représentés dans les figures 4.8 et 4.9. Ces résultats sont obtenus dans les conditions suivantes:

Lors de démarrage à vide (figure 4.8), on applique un échelon de référence de position de 360° (1 tour mécanique). Une fois que nous atteignons le régime permanent, nous appliquons un échelon de couple résistant de 5 Nm quand $t=0.2$ s. Dans l'essai de la figure 4.9, on change le sens de rotation de l'arbre du moteur de 360° à -360° .

Nous constatons que l'allure de la position est obtenue sans dépassement et que l'arbre du MSAP suit l'angle de référence avec un temps de réponse acceptable. L'erreur provoquée par la perturbation de la charge est compensée instantanément. L'inversion du sens de rotation permet de déduire que la commande est robuste.

Nous constatons aussi que le courant I_q est limité à sa valeur de référence. Cela explique que le système utilise son maximum d'énergie. Le courant I_q est l'image du couple.

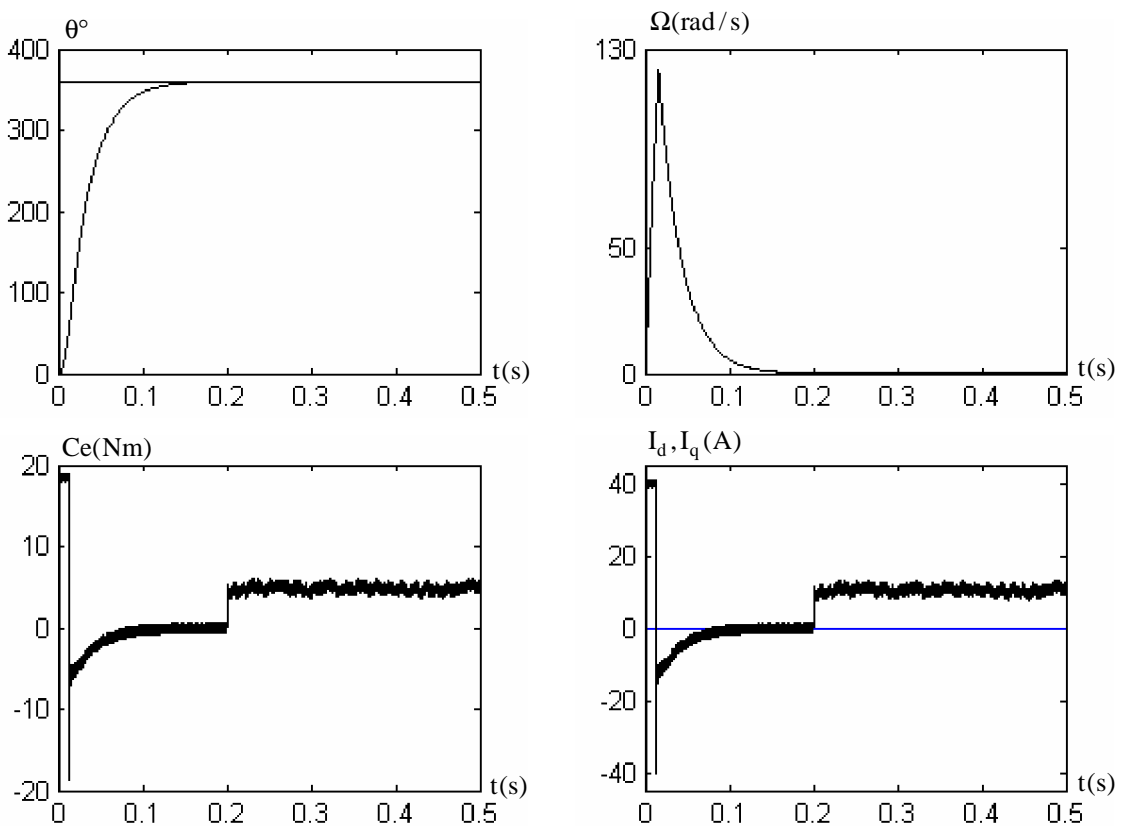


Figure 4.8: Réponses de la MSAP en charge avec ($C_r=5$ N.m)

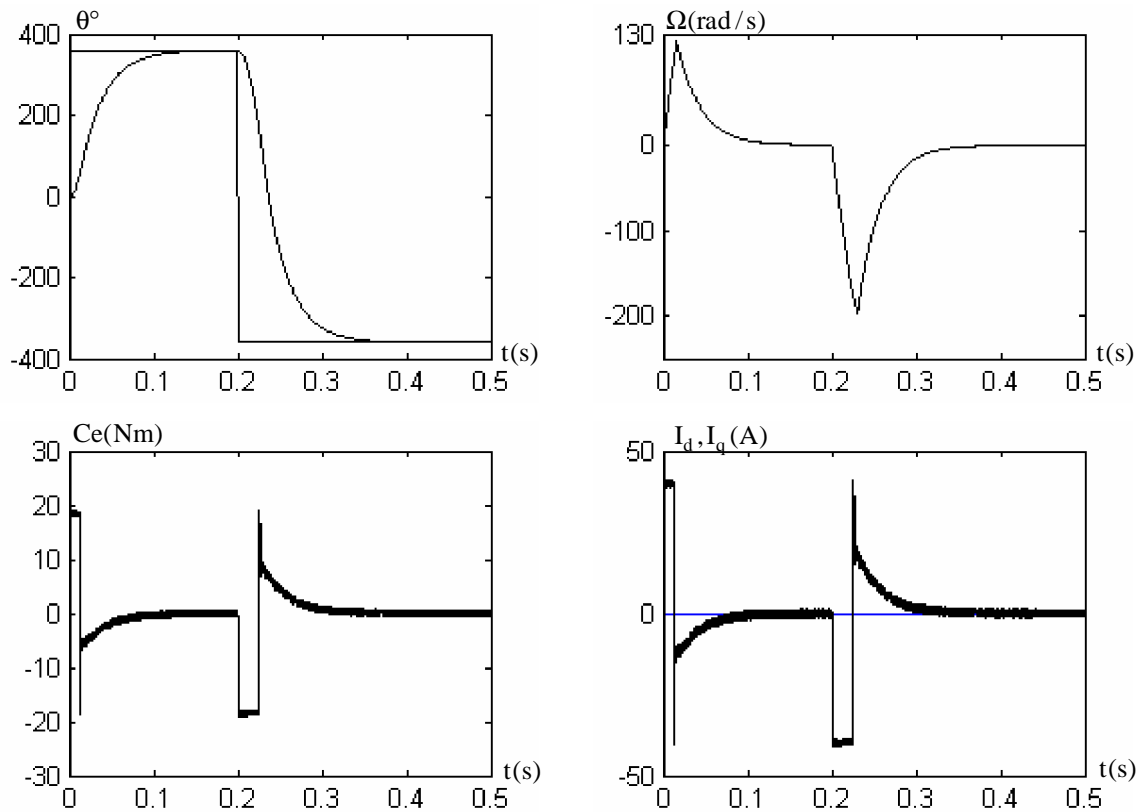


Figure 4.9: Réponses de la MSAP pour une inversion de la position (360° à -360°)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de commande à structure variable (CSV) de la MSAP suivant une structure en cascade. Nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande pour l'asservissement en vitesse ou en position.

Dans le but de réduire le phénomène de chattering, nous avons simulé trois stratégies de commande. La première consiste à considérer la fonction de la commande U_n comme un relais. Dans ce cas la fréquence de commutation est finie. La deuxième stratégie consiste à adoucir la fonction U_n . La troisième stratégie, dite commande continue avec composante intégrale, provoque les oscillations de haute fréquence qui apparaissent sur les réponses en régime glissant. Ces oscillations sont toutefois amorties.

Les résultats de simulation nous montrent que les réponses avec la CSV pour l'asservissement en vitesse ou en position sont rapides et robustes. La charge n'a pas d'influence sur la vitesse et la position.

Le chapitre suivant est consacré à une étude comparative entre la commande vectorielle à régulateur PI et la CSV de la MSAP, pour valider la robustess aux perturbations extérieures et aux variations des paramètres.