

Chapitre III

Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases

III.1. Introduction

Le développement de nouvelles technologies des semi-conducteurs et des convertisseurs statiques a permis une augmentation des fréquences de commutation et, par conséquent, une meilleure maîtrise de la conversion d'énergie. Parallèlement, les moyens de calcul ont considérablement évolué. Tous ces progrès ont permis l'application de nouveaux algorithmes de commande assurant un découplage du flux et du couple dans les machines à courant alternatif, en régime transitoire et permanent [9].

Le contrôle vectoriel porte en général sur des machines alimentées en tension et commandées en courant sur les axes d et q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans le contrôle du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant [9].

Afin de contrôler le couple d'une machine synchrone à aimants permanents, il est nécessaire de contrôler le vecteur courant. Ceci est possible en contrôlant instantanément ces composantes directe et en quadrature.

Il existe deux méthodes distinctes pour contrôler le vecteur courant [10]:

- L'une ne nécessite pas la connaissance au préalable du modèle électrique de la machine et consiste à imposer directement les courants de phase dans une bande autour des courants de référence : c'est la méthode de contrôle par régulateurs à hystérésis ;
- L'autre méthode exige la connaissance du modèle de la machine et permet, en fonction de l'erreur des courants de phase par rapport à leurs références, de déterminer les références des tensions qui seront imposées aux bornes de la machine grâce à un onduleur de tension commandé en modulation de largeur d'impulsion.

Dans ce chapitre les deux approches de la commande vectorielle susmentionnées seront appliquées sur la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases.

III.2. Principe de la commande vectorielle

Le flux de la machine n'a pas besoin d'être produit par le courant statorique puisque celui-ci est généré à partir des aimants permanents.

La composante directe i_{ds} est alors imposée à zéro ce qui élimine le couple réactant pour les machines à pôles saillants. C'est le régulateur qui forcera cette composante à zéro.

En posant i_{ds} à zéro dans l'équation du couple (I.18), on obtient la relation suivante:

$$C_{em} = \frac{5p}{2} \phi_m i_{qs} \quad (\text{III.1})$$

Il ne reste qu'à isoler la variable i_{qs} dans l'équation (III.1) ce qui mène à (III.2):

$$i_{qs} = \frac{2}{5p\phi_m} C_{em} \quad (\text{III.2})$$

Les autres courants sont imposés comme suit :

$$i_{ds} = i_{Ds} = i_{Qs} = 0 \quad (\text{III.3})$$

III.2.1. Commande vectorielle de la MSAP5PH alimentée en courant

Dans certaines applications, la préférence est donnée à une commande en courant. Cette commande peut être réalisée en utilisant un commutateur de courant ou un onduleur de tension régulé en courant ou moyen d'un régulateur à hystérésis [11].

La figure (III.1) schématise le principe de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases alimentée par un onduleur de tension contrôlé en courant.

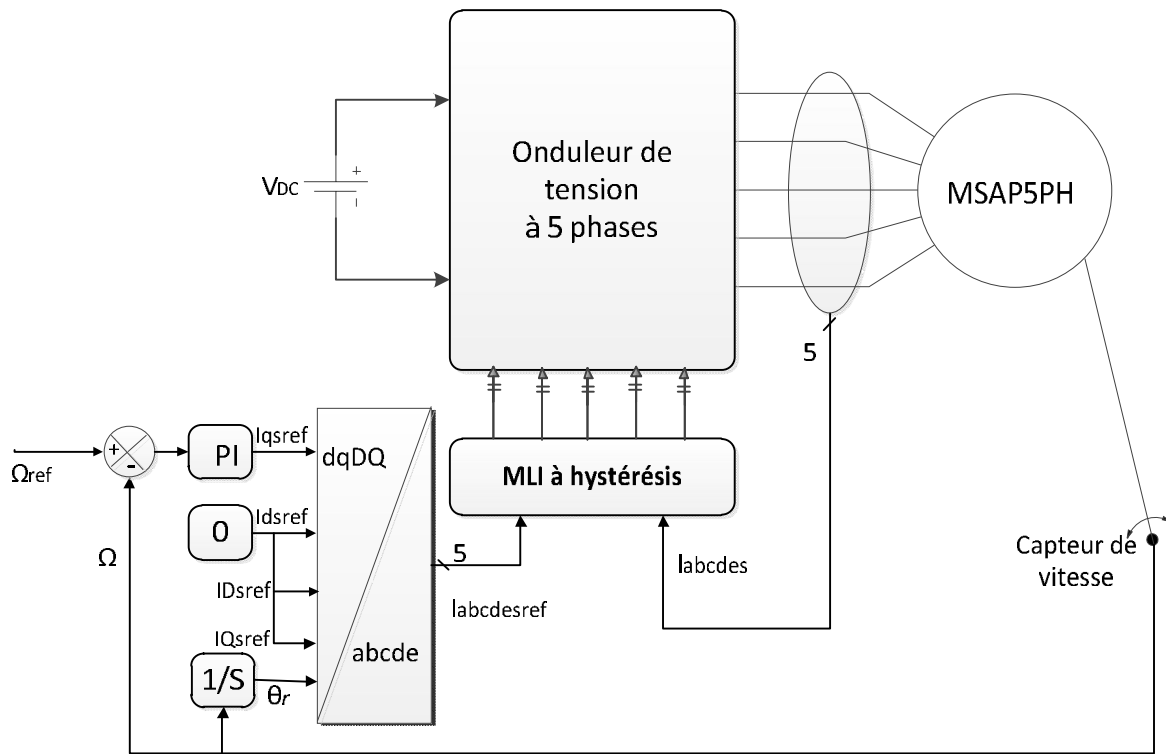


Figure (III. 1) : Schéma de principe de la commande vectorielle de la MSAP5PH alimentée en courant

III.2.1.a. Réglage de vitesse

Le réglage de vitesse peut être envisagé suivant le schéma fonctionnel de la figure (III.2) où le régulateur adopté est un régulateur PI.

A partir de l'équation mécanique la vitesse est donnée par :

$$\Omega(s) = \frac{1}{JS + f} [C_{em}(s) - C_r(s)] \quad (III.4)$$

A partir de l'équation (III.2), le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em}(s) = \frac{5p\phi_m}{2} i_{qs}(s) \quad (III.5)$$

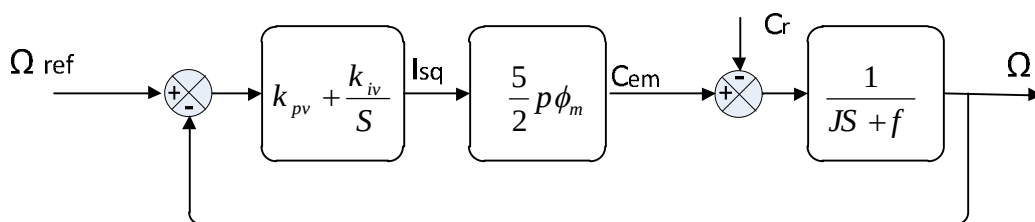


Figure (III. 2) : Schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse

Avec:

k_{pv} et k_{iv} : Coefficients du régulateur PI.

En considérant le couple de charge comme une perturbation, on dispose d'une fonction de transfert en boucle fermée par rapport à la consigne sous la forme :

$$F_{bf}(s) = \frac{\frac{k_{pv}}{J}s + \frac{k_{iv}}{J}}{s^2 + \frac{k_{pv} + f}{J}s + \frac{k_{iv}}{J}} \quad (\text{III.6})$$

Par identification avec l'équation caractéristique d'un système de deuxième ordre on obtient :

$$\begin{aligned} k_{pv} &= 2\xi_v \omega_{0v} J - f \\ k_{iv} &= J \omega_{0v}^2 \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

Où ξ_v est le coefficient d'amortissement

ω_0 : Pulsation du système.

III.2.1.b. Résultats de simulation

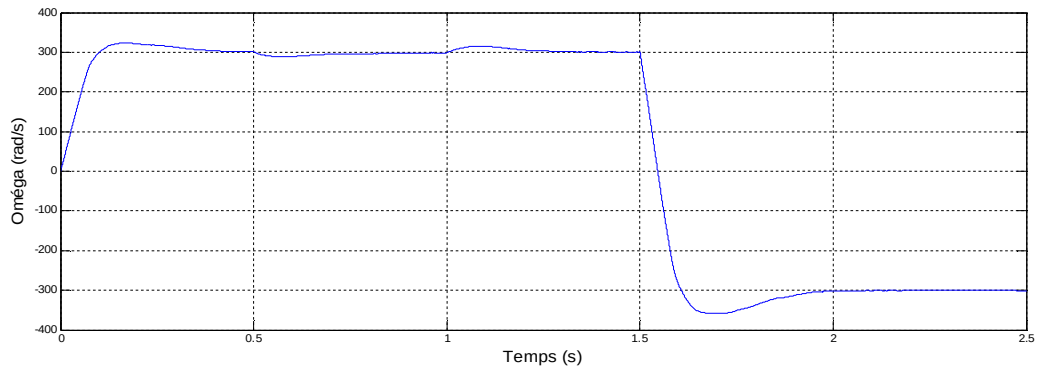
Nous avons simulé la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases dont les paramètres sont regroupés dans le tableau (III.1).

Tableau (III. 1) : Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases

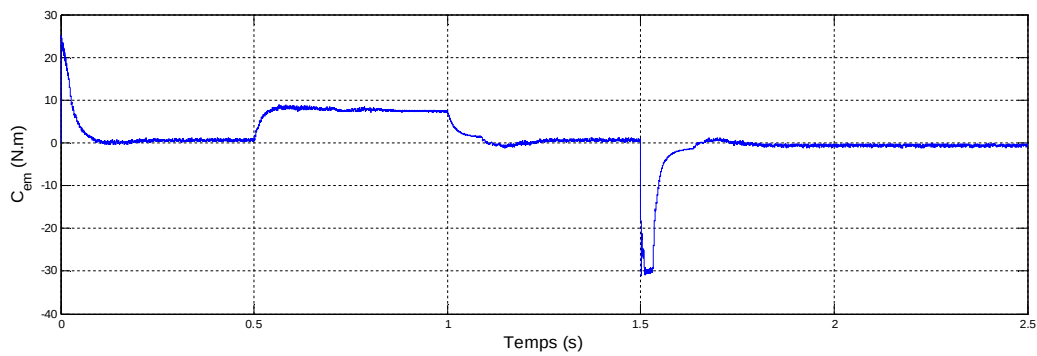
Symbol	Désignation	Valeur
P	Puissance nominale	4 kW
r_s	Résistance statorique	0.12Ω
L_d	Inductance directe	135 mH
L_q	Inductance en quadrature	135 mH
ϕ_m	Flux des permanents	0.05 Wb
J	Inertie du rotor	0.002 kgm ²
f	Coefficient de frottement	0.002 Ns/rad
p	Nombre de paires de pôles	4

Les gains du régulateur de vitesse sont calculés en choisissant les paramètres suivants :

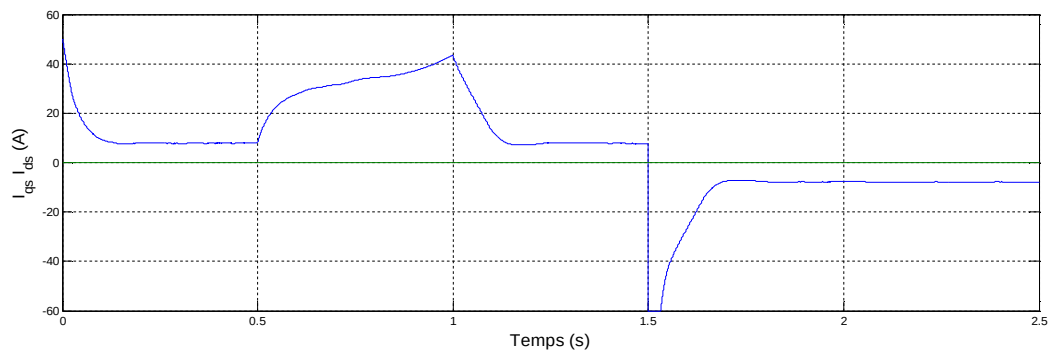
$\xi_v = 0.707$ et $\omega_{0v} = 30$. La figure (III.3) représente les résultats de simulation décrivant les phases de fonctionnement à vide, en charge et lors de l'inversion du sens de rotation.



a) Vitesse de rotation



b) Couple électromagnétique



c) Courants statorique

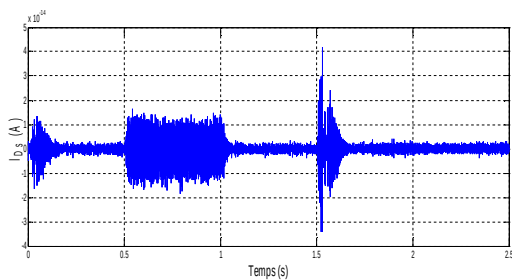
d) Courants i_{Ds} et i_{Qs}

Figure (III. 3) : Résultats de simulation de la commande vectorielle de la MSAP5PH alimentée en courant

Lors de démarrage à vide de la MSAP5PH, la vitesse rejoint sa valeur de consigne (300 rad/s) avec un temps de réponse de 0.4s. Lors de l'application de couple de charge de 7 N.m durant l'intervalle $t \in [0.5, 1]$, conduit à une augmentation du couple électromagnétique développé, ainsi

que le courant statorique de la machine. La courbe de vitesse est influencée par cette variation. Toutefois, le régulateur de vitesse arrive à compenser cette perturbation et rétabli de nouveau la vitesse.

Les résultats de l'inversion de la vitesse de consigne montrent que, cette inversion s'accompagne d'un fort appel du courant statorique ce qui se traduit par un couple électromagnétique en conséquence.

III.2.2. Commande vectorielle de la MSAP5PH alimentée en tension

Les sources de tension imposent indirectement les courants requis pour produire le couple. Quatre contrôleurs supplémentaires sont requis pour contrôler les courants des axes d , q , D et Q .

III.2.2.a Description du système global

La figure (III.4) représente le schéma global de la commande vectorielle en vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents à cinq phases dans le repère (d , q).

La référence du courant direct est imposée nulle et la sortie du régulateur de vitesse constitue la consigne de la courante quadrature i_{qs} . Les références des courants i_{dsref} , i_{qsref} , i_{Dsref} et i_{Qsref} sont comparées séparément avec les courants réels de la machine i_{ds} , i_{qs} , i_{Ds} et i_{Qs} . Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de génération des tensions de références V_{dsref} , V_{qsref} , V_{Dsref} et V_{Qsref} est indispensable. Les sorties de la régulation des courants i_{ds} , i_{qs} , i_{Ds} et i_{Qs} et après passage dans le repère (a , b , c , d , e), servent de références de tensions ($V_{abcdesref}$) pour la commande de l'onduleur à MLI.

III.2.2.b Découplage

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée du modulateur MLI. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possibles des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes d et q .

La compensation a pour but de découpler les axes d - q - D - Q . Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs [13].

Les équations statoriques comprennent, en effet, des termes qui font intervenir des courants de l'autre axe. Ces équations s'écrivent:

$$\begin{cases} V_{ds} = (r_s + SL_d)i_{ds} - \omega L_q i_{qs} \\ V_{qs} = (r_s + SL_q)i_{qs} + \omega \phi_m + \omega L_d i_{ds} \\ V_{Ds} = (r_s + SL_{ls})i_{Ds} \\ V_{Qs} = (r_s + SL_{ls})i_{Qs} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

La figure (III.4) représente le schéma bloc de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents à cinq phases.

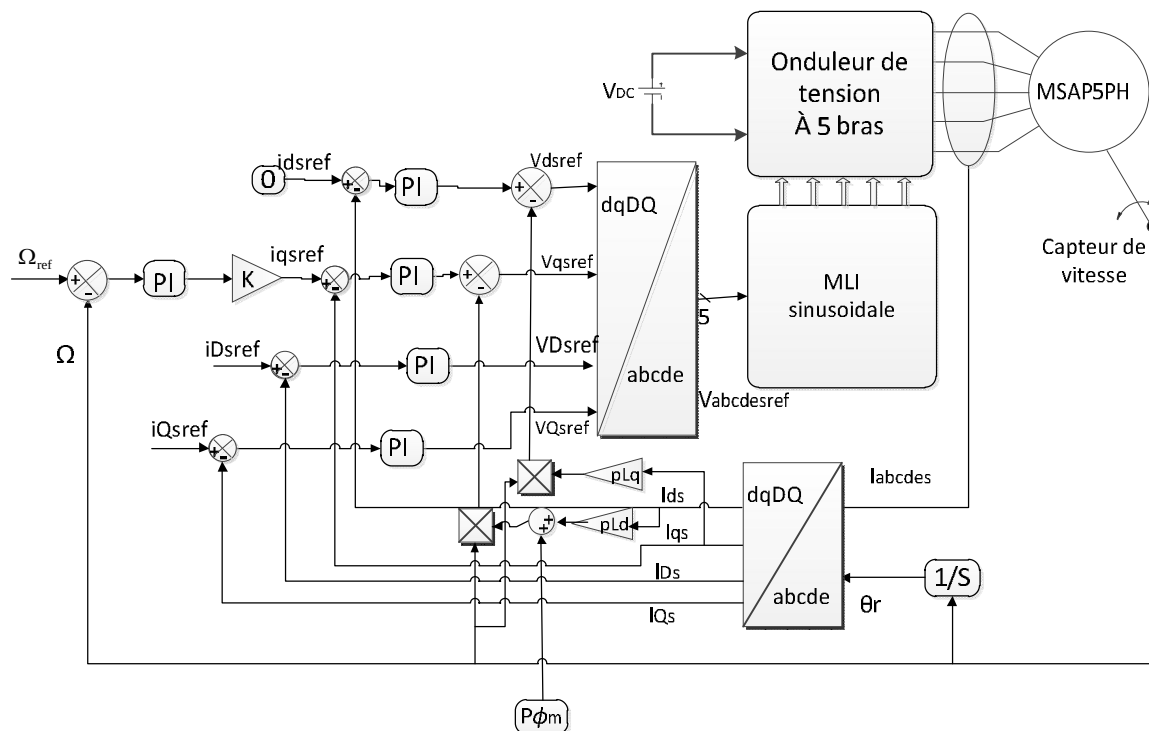


Figure (III. 4) : Principe de la commande vectorielle de laMSAP5PHalimentéeen tension

La figure (III.5) représente le couplage entre les axes d et q.

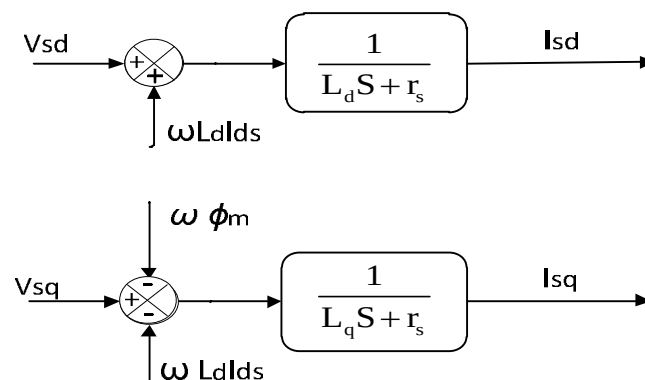


Figure (III. 5) : Couplage entre les axes d et q

Les actions sur les axes d et q sont donc découplées comme il est présenté dans la figure (III.7)

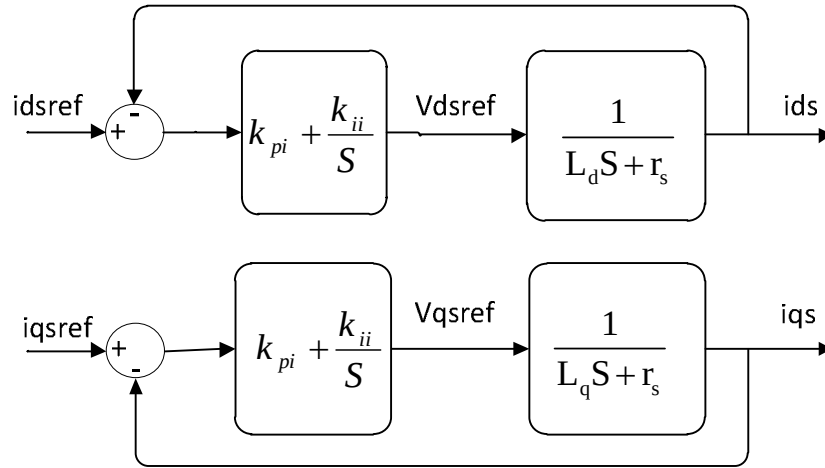


Figure (III. 7) : Commande découplée

Sur les axes D et Q le système est naturellement découplé et ne nécessite pas donc un bloc de découplage. Le schéma de réglage des courants i_{Ds} et i_{Qs} est donné par la figure (III.8).

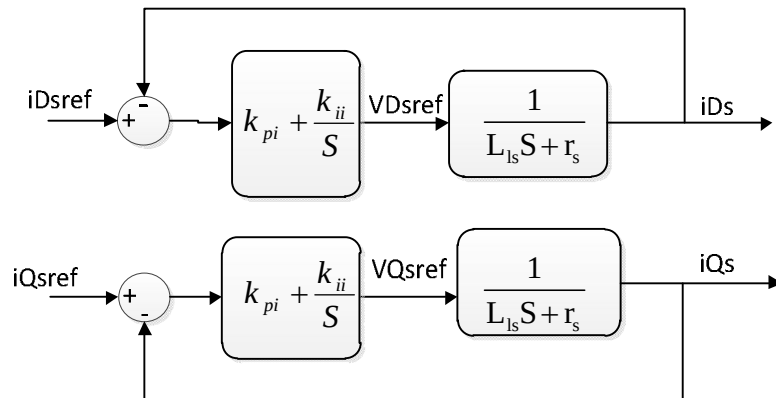


Figure (III. 8) : Commande découplée des axes D et Q

III.2.2.c Calcul des coefficients des régulateurs des courants

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$F_{bo}(s) = \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \right) \left(\frac{1}{r_s + sL_d} \right) \quad (III.14)$$

En boucle fermée, nous obtenons un système de la forme:

$$F_{bf}(s) = \frac{Sk_{pi} + k_{ii}}{S^2 + \frac{r_s + k_{pi}}{L_d}S + \frac{k_{ii}}{L_d}} \quad (III.15)$$

En identifiant l'équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée (III.5) avec un système de la forme :

$$F_{bf}(s) = \frac{\omega_{0i}}{S^2 + 2\xi_i \omega_{0i}S + \omega_{0i}^2}$$

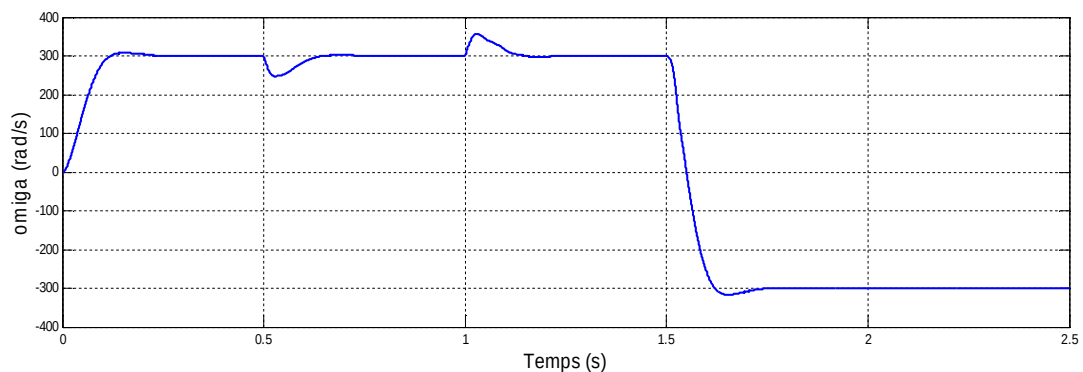
On obtient :

$$\begin{aligned} k_{pi} &= 2\xi_i \omega_{0i} L_d - r_s \\ k_{ii} &= L_d \omega_{0i}^2 \end{aligned} \quad (III.16)$$

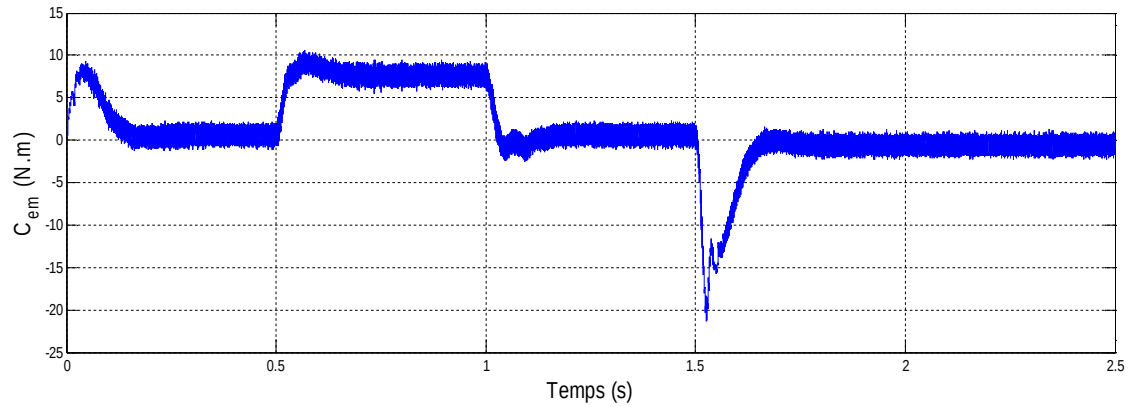
Les mêmes démarches peuvent être adoptées pour le calcul des gains des régulateurs des courants i_{qs} , i_{Ds} et i_{Qs} .

III.2.2.d Résultats de simulation

Les paramètres des régulateurs des courants sont calculés en choisissant $\xi_i = 0.707$ et $\omega_{0i} = 600$. La figure (III.9) représente le démarrage à vide de la MSAP avec un échelon de consigne de 300 rad/s, suivi d'une application d'un couple de charge de 7 N.m durant l'intervalle de temps $[0.5, 1]$ s puis une inversion du sens de rotation à l'instant 1.5s.



a) Vitesse de rotation



b) Couple électromagnétique

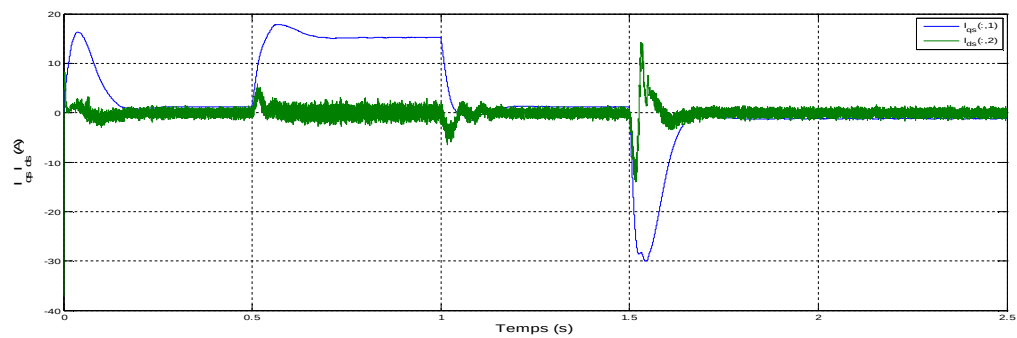
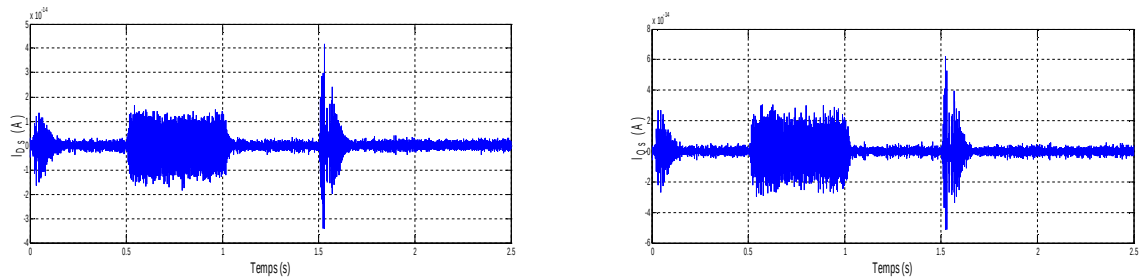
c) Courants i_{ds} et i_{qs} d) Courants i_{Ds} et i_{Qs}

Figure (III. 9) : Résultats de simulation de commande vectorielle de la MSAP5PH alimentée en tension

A partir de ces résultats, on constate que:

- L'allure de la vitesse suit sa référence avec un temps de réponse de l'ordre de 0.25s,
- Aux moments des variations du couple résistant la vitesse est légèrement affectée du fait que le régulateur réagit rapidement pour éliminer cette perturbation. D'autre part, le couple électromagnétique compense efficacement le couple de charge appliqué,
- La réponse des courants montre bien que le découplage introduit par la commande vectorielle est garanti. En effet, la composante directe du courant demeure constamment nul indépendamment de la variation du couple électromagnétique.

III.3. Conclusion

La commande vectorielle permet à partir d'un modèle non linéaire et couplé, d'obtenir un modèle simple et découplé; garantissant un contrôle simple de la vitesse du rotor. Les résultats de simulation obtenus, nous ont permis de vérifier l'efficacité de la commande vectorielle de la MSAP5PH alimentée par un onduleur de tension à cinq bras.

A partir de ces résultats, nous constatons que le réglage à base de PI n'offre pas un réglage efficace de la vitesse en régime transitoire. En effet, la courbe de vitesse présente des dépassements lors du démarrage ainsi qu'au moment d'inversion du sens de rotation.

.