

TP3

Commande vectorielle en courant et en tension par orientation du flux rotorique d'une machine asynchrone

Comme le modèle de la machine asynchrone correspond à un système multivariables, un contrôle performant de la vitesse ou de la position de ce moteur et donc de son couple, demande le contrôle simultané de plusieurs variables. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser artificiellement un découplage entre le flux et le couple. Parmi les différentes approches développées en vue de réaliser ce découplage, la technique de contrôle vectoriel est celle qui donne de meilleures performances.

La commande vectorielle proposée par **Hasse en 1969 et Blaschke en 1972** qui est basé sur le contrôle des grandeurs en amplitude et en phase. Cette commande permet de réaliser l'entraînement électrique des machines à courants alternatifs et permet aussi d'avoir un contrôle découplé du couple et de flux pour rendre sa commande aisée (c-à-d d'assimiler le comportement de la machine à courants alternatif à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée où le découplage naturelle entre le réglage du couple et celui du flux) avec un conséquent de la dynamique du couple est très rapide. Depuis, cette technique de commande est à l'origine de plusieurs réalisations industrielles dans les différents domaines comme la robotique, les machines outils, la traction électrique....

Nombreuses variantes de commande vectorielle ont été présentées dans la littérature technique que l'on peut classer de la façon suivante:

- **Type d'alimentation**
 - Commande en tension (MLI d'un onduleur de tension) ;
 - Commande en courant (Hystérésis d'un onduleur de tension ou de courant).
- **Détection de la position du flux (Méthode de calcul de θ_s)**
 - **Détection directe** nécessite la mesure directe du flux par des capteurs de flux dans l'entrefer pour mesurer directement les composantes $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$ ($\theta_s = \arctg(\frac{\phi_{r\beta}^{\max}}{\phi_{r\alpha}^{\max}})$), ou par l'estimation (observation) de deux composantes $\hat{\phi}_{r\alpha}$ et $\hat{\phi}_{r\beta}$ ($\theta_s = \arctg(\frac{\hat{\phi}_{r\beta}}{\hat{\phi}_{r\alpha}})$);
 - **Détection indirecte** nécessite le contrôle de la fréquence de glissement (la pulsation rotorique ω_r) et l'utilisation de la loi d'autopilotage $\omega_s = \omega_{ref} + \omega \Rightarrow \theta_s = \theta_r + \theta$ par un capteur de vitesse ou de la position $\theta_s = \theta_r + \theta$.
- **Orientation du flux**
 - Fondée sur un modèle du rotor (orientation du flux rotorique) (découplage par orientation du flux rotorique);
 - Fondée sur un modèle du stator (orientation du flux statorique) (découplage par orientation du flux statorique);
 - Fondée sur l'entrefer (orientation du flux d'entrefer) (découplage par orientation du flux d'entrefer).

Pour sélectionner la commande vectorielle qui permet de donner les meilleures performances on a les avantages et les inconvénients de chaque variante.

- La commande vectorielle en tension contrôlée en courant permet d'avoir une dynamique proche de celle des entraînements à courant continu.
- Le contrôle du flux statorique ou du flux d'entrefer n'assure pas un découplage total entre le couple et celui du flux.

On va étudier ici le principe de la commande vectorielle indirect à flux rotorique orienté avec l'orientation de l'axe 'd' suivant l'axe du flux rotorique. Cette variante de la commande vectorielle en tension contrôlée en courant présente de meilleures performances par rapport aux autres techniques d'orientation.

Cette technique de commande est basée sur le modèle transitoire de la MAS dans le repère dq, plus précise et rapide et aussi permet le contrôle du couple à l'arrêt.

Objectifs de TP:

Le but de ce TP est la présentation du principe de base de la commande vectorielle indirect par orientation de flux rotorique d'une machine asynchrone. D'autre part, nous rappelons d'une manière brève les méthodes de commande en courant et en tension et nous terminons par des simulations suivies par des interprétations des résultats.

Partie 1 : Principe générale de la commande vectorielle en courant et en tension par orientation du flux rotorique d'une machine asynchrone

Le principe de la commande vectorielle est de ramène (d'assimiler) le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée figure 1 (c.-à-d. de réaliser le découplage entre le couple électromagnétique de la machine asynchrone et son flux rotorique). Cette commande est réalisée lorsque la MAS est modélisé dans le repère dq. L'avantage d'utiliser ce repère est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

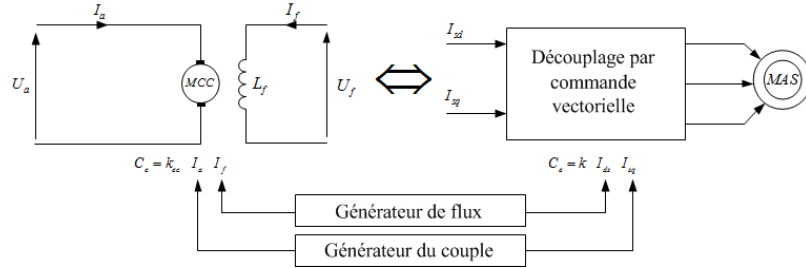


Fig.1. Analogie entre la MAS et la machine à courant continu

Pour réaliser cette principe on rend l'expression du couple de la MAS dans le repère (dq) (Eq 1) identique à celle d'une MCC à excitation séparée par l'annulation de la composante quadrature 'q' du flux rotorique (c.-à-d le flux rotorique égale le flux rotorique de la composante directe), alors le couple ressemblerait fort à celui d'une MCC à excitation séparée (Eq 2).

$$C_{em} = k' p \frac{M}{L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) \quad (1)$$

Où k' est une constante qui peut prendre la valeur 2/3 pour la transformation de **Clarke** avec conservation des amplitudes ou la valeur 1 pour la transformation **Concordia** avec conservation de puissance et du couple.

Le couple de la MAS dans le repère (dq) est donné par.

$$C_{em} = k' \frac{pM}{L_r} \phi_{rd} I_{sq}, \quad \phi_{rd} = \phi_r \quad \text{et} \quad \phi_{rq} = 0 \quad (2)$$

Afin de maintenir le flux ϕ_{rq} nul, il faut imposer $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$. En introduisant la vitesse angulaire de glissement ω_r , nous avons la relation suivante:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_{rq} &= \left(\frac{-R_r}{L_r} \phi_{rq} + \frac{R_r M}{L_r} \cdot I_{sq} \right) - (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r = \omega_s - \omega = \frac{M}{\phi_{rd} T_r} I_{sq} \end{aligned} \quad (3)$$

Le flux ϕ_r peut être estimé à partir du courant I_{sd} par la mesure des courants réels statoriques sous réserve de la réalisation de la transformation de PARK. Le flux rotorique de la MAS dans le repère (dq) est donné par.

$$\phi_r = \phi_{rd} = \frac{M}{1 + \frac{d}{dt} T_r} I_{sd} = M I_{sd} \quad (4)$$

$$\omega_r^* = \frac{1}{T_r} \frac{I_{sq}}{I_{sd}}$$

T_r Représente la constante de temps rotorique de la machine $T_r = \frac{L_r}{R_r}$.

Pour effectué cette principe, on oriente le repère dq de telle sorte que le flux rotorique est coïncide avec l'axe 'd'. Cette orientation ce fait par l'agissant sur l'angle de transformation de Park comme indique la figure 2.

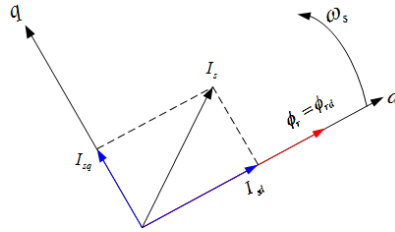


Fig. 2. Orientation du flux rotorique

La figure 2 montre le flux rotorique orienté sur l'axe 'd'.

A partir de cette orientation et si le flux rotorique maintenu constant, le couple de la MAS est contrôlé seulement par la composante quadrature du courant statorique I_{sq} (Eq 2) et le flux rotorique est contrôlé seulement par la composante directe du courant statorique I_{sd} (Eq 4). Donc le couplage entre le flux est le couple est éliminé.

Partie 2 : Commande Vectorielle Indirecte par Orientation du Flux rotorique d'une machine asynchrone (CVIOFR/IRFOVC)

Le schéma bloc de la figure 3 présente la commande vectorielle **indirecte** en **courant** par orientation du flux **rotorique** d'une machine asynchrone alimenté en tension par un onduleur de tension.

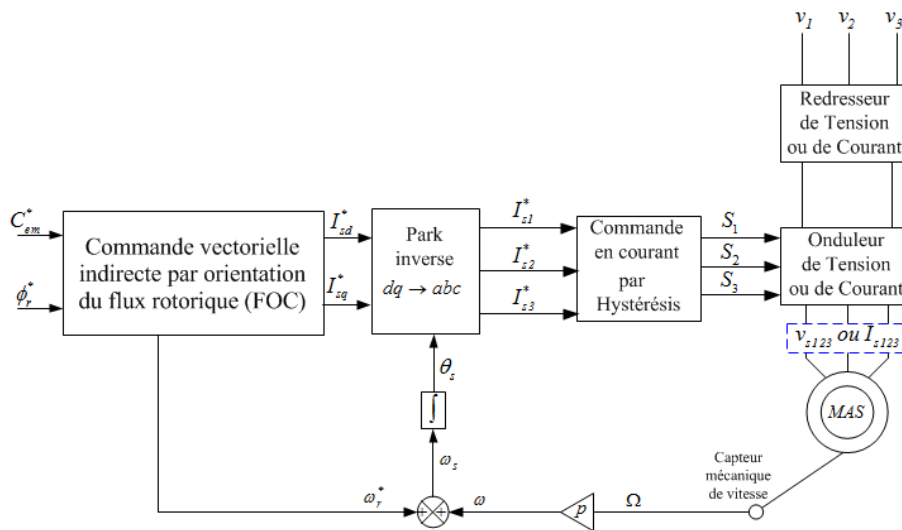


Fig. 3. Schéma de la commande vectorielle indirecte en courant par orientation du flux rotorique d'une machine asynchrone.

Lorsque le couple C_{em}^* et le flux ϕ_r^* sont considérants comme grandeurs de commande et à partir des équations 2, 3 et 4, nous obtenons les équations de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique suivantes :

$$\begin{cases} I_{sq}^* = \frac{L_r}{k' p M \phi_r^*} C_{em}^* \\ I_{sd}^* = \frac{\phi_r^*}{M} \left(T_r \frac{d}{dt} + 1 \right) = \frac{\phi_r^*}{M} \\ \omega_r^* = \frac{M}{T_r \phi_r^*} I_{sq}^* = \frac{1}{T_r} \frac{I_{sq}^*}{I_{sd}^*} \end{cases}$$

$$C_{em}^* = k' p \frac{M}{L_r} \phi_{rd} I_{sq}^*, \quad \phi_{rd} = \phi_r \quad \text{et} \quad \phi_{rq} = 0 \quad (5)$$

Cela suppose donc de maîtriser également l'angle θ_s . L'angle θ sera lui, donné par un capteur de position (codeur incrémental).

Partie 3 : Simulation de la commande vectorielle indirecte en courant par orientation du flux rotorique d'une machine asynchrone alimentée en tension

1^{ère} Cas : machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension commandé en courant par hystérésis

Le schéma bloc de la figure 4 présente la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique d'une machine asynchrone alimentée en tension par un onduleur de tension commandé en courant par hystérésis.

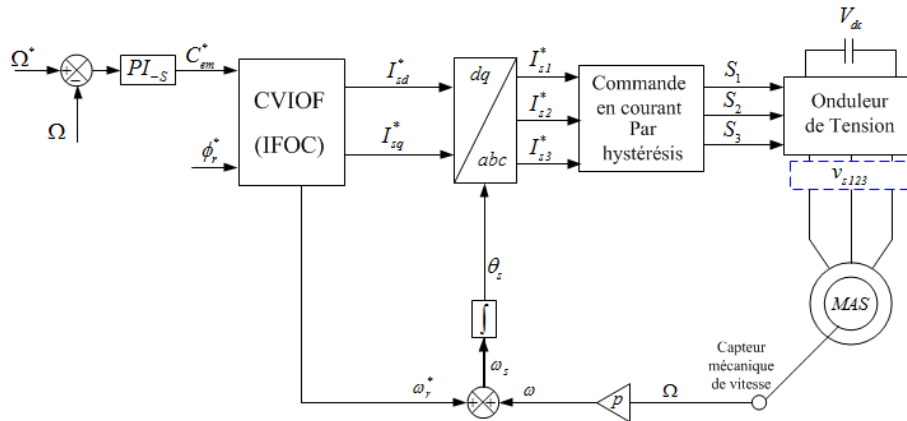


Fig. 4. Schéma de la commande vectorielle indirecte en courant par orientation du flux rotorique d'une MAS.

Le circuit de commande de ce schéma de simulation comporte trois parties essentielles, la régulation de la vitesse, la loi de commande vectorielle et la technique hystérésis.

Régulation de la vitesse

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale *PI* sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action du régulateur proportionnelle *P* assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent.

La chaîne de régulation de vitesse peut être représentée par le schéma fonctionnel suivant :

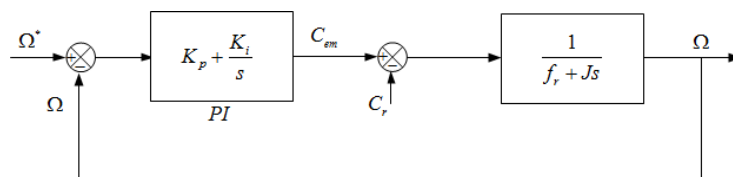


Fig. 5. Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

Le flux ϕ_r^* est un constant est égal le flux nominal, et le couple C_{em}^* est déterminé par la régulation de la vitesse comme indique la figure 6.

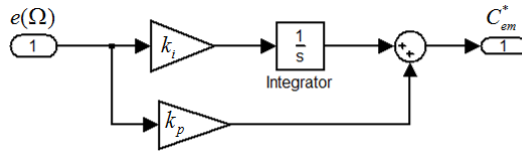


Fig. 6. Schéma de simulation du régulateur PI de vitesse

La régulation de la vitesse du moteur asynchrone, est utilisée pour la détermination du couple de la machine. Si la machine est chargée, la vitesse décroît, le régulateur va fournir plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre.

- 1- Donner l'expression du couple en fonction de la vitesse du moteur et donner la fonction de transfert de régulation de la vitesse du moteur en boucle fermée.
- 2- Calculer les paramètres du régulateur PI (k_p et k_i) par la méthode de placement des pôles avec un coefficient d'amortissement $\xi = 0.707$ et une pulsation propre $\omega_c = 30rad / s$.
- 3- Si l'on utilise un PI anti-windup pour éviter l'effet de l'emballement de l'action intégrale dans le PI classique. Donner le Schéma de simulation de ce régulateur et expliquer son principe.

Commande en courant de l'onduleur par hystérésis

Le principe de la génération des signaux de contrôle par hystérésis est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande enveloppant les courants de référence. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références.

Comme l'onduleur à deux niveaux ne possède que deux états de commande possibles pour un bras j , alors nous utilisons un régulateur à hystérésis à une position comme il est indiqué sur la figure 7.

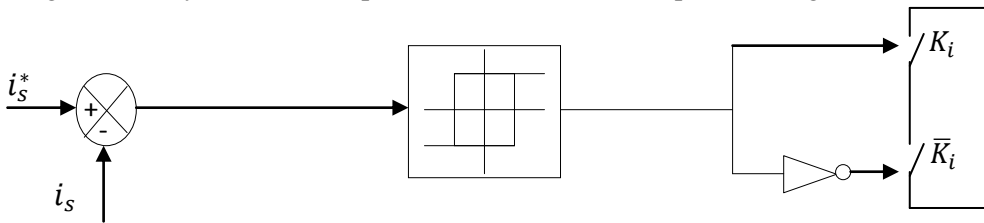


Fig. 7. Principe de contrôle du courant par hystérésis

Algorithme

Nous désignons par ε_i l'écart entre le courant de référence i_s^* et le courant réel i_s tel que :

$$\varepsilon_i = i_s^* - i_s \quad (6)$$

L'algorithme de cette stratégie est donné comme suit :

$$\begin{cases} \text{si } \varepsilon_i \geq \varepsilon_i \implies S = 1 \\ \text{si } \varepsilon_i < -\varepsilon_i \implies S = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Δi : Largeur de la bande d'hystérésis

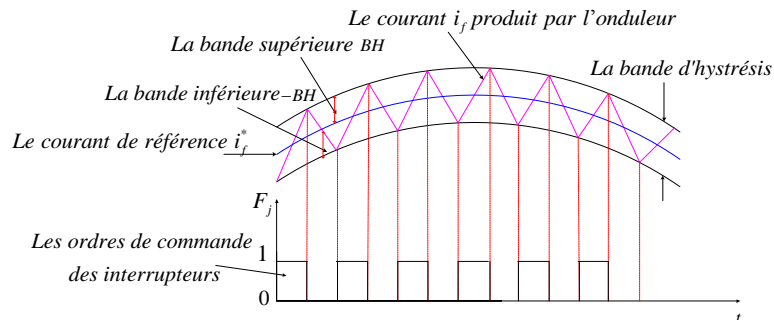


Fig. 8. Commande des interrupteurs par hystérésis à bande fixe.

Travail demandé:

Réaliser la simulation de la figure 4 sur un temps de simulation de 5s avec pas fixe de 10^{-4} s dans les trois cas suivants.

- Marche à vide avec consigne de vitesse égale 120rad/s.
- Insertion d'une charge à l'instant $t=2$ s.
- Variation de sens de rotation à l'instant $t=3.5$ s avec consigne de vitesse égale -120rad/s

- 1- Visualiser et relever la forme de la vitesse, du couple et de flux rotorique du moteur asynchrone dans les trois cas.
- 2- Visualiser et relever la forme du courant statorique i_{s1} lors de démarrage et en régime permanent.
- 3- Visualiser et relever la forme de la vitesse dans le cas de la marche à vide pour différentes valeurs de la pulsation propre.
- 4- Afin d'éviter le dépassement au niveau de la vitesse lors de démarrage du MAS en utilisant un filtre de 1^{er} ordre pour la création de la vitesse de référence. La fonction de Transfer de ce filtre est $\frac{\Omega_{Filtre}^*}{\Omega^*} = \frac{1}{1+T_f s}$ avec T_f la constante de temps du filtre. calculer cette constante.
- 5- Commenter les résultats et justifier les différences remarquées.

2^{ème} Cas : machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension commandé en courant par hystérésis avec bloc de défluxage

Pour assurer à tout instant un couple maximal, le flux doit être maintenu à sa valeur nominale. Un autre problème on à détecté, ce problème est lorsque la MAS fonctionne dans les régimes de grandes vitesses. Pour ce la, il faut garder un niveau énergétique constant, donc il faut réduire le flux. Dans ce cas, le flux n'étant plus constant, le découplage opéré disparaît et le contrôle du couple est difficile à assurer. Pour éviter ce problème on utilise le bloc de défluxage.

Le schéma bloc de la figure 9 présente la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique d'une MAS alimentée en tension par un onduleur de tension commandé en courant par hystérésis avec bloc de défluxage.

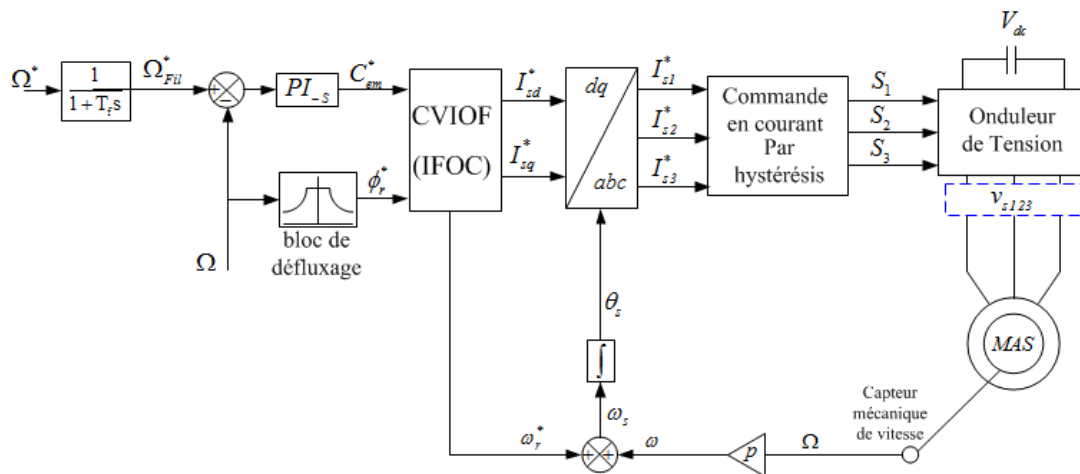


Fig. 9. Schéma de la commande vectorielle indirecte en courant par orientation du flux rotorique d'une MAS avec bloc de défluxage.

Le bloc de défluxage est défini par la fonction non linéaire suivante :

$$\phi_r^* = \begin{cases} \phi_m & \text{si } |\Omega_r| \leq |\Omega_m| \quad \text{mode normal} \\ \phi_m \frac{|\Omega_m|}{|\Omega_r|} & \text{si } |\Omega_r| > |\Omega_m| \quad \text{mode défluxage} \end{cases}$$

La figure 10 montre le bloc de défluxage.

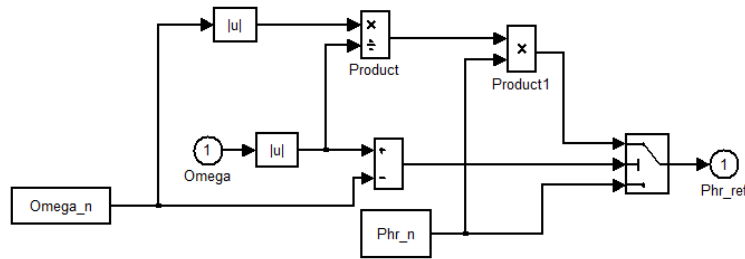


Fig. 10. Bloc de défluxage

Il assure le fonctionnement à flux constant ou couple constant pour les vitesses inférieures à la vitesse nominale et au delà de cette vitesse il permet de diminuer le couple. Dans ce cas, il assure un fonctionnement à puissance constante ou tension constante.

Travail demandé :

Si l'on utilise la MAS dans les régimes de grandes vitesses.

- 1- Visualiser et relever la forme de la vitesse et du couple du moteur asynchrone dans les trois cas.
- 2- Visualiser et relever la forme du flux rotorique.
- 3- Commenter les résultats et justifier les différences remarquées.

3^{ème} Cas : machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension commandé en tension par MLI

Les tensions statoriques de la MAS dans le repère dq sont donnés par :

$$\begin{cases} V_{sd} = L_s \sigma \lambda I_{sd} + L_s \sigma \frac{d}{dt} I_{sd} - \omega_s L_s \sigma I_{sq} - L_s \sigma \frac{K_s}{T_r} \Phi_{rd} - \omega L_s \sigma K_s \Phi_{rq} \\ V_{sq} = \omega_s L_s \sigma I_{sd} + L_s \sigma \lambda I_{sq} + L_s \sigma \frac{d}{dt} I_{sq} + L_s \sigma \omega K_s \Phi_{rd} - L_s \sigma \frac{K_s}{T_r} \Phi_{rq} \end{cases} \quad (8)$$

A partir de ces deux équations, on remarque que les deux tensions V_{sd} et V_{sq} sont couplées par les deux courants I_{sd} et I_{sq} . Ce couplage influence à la fois sur les courants I_{sd} et I_{sq} et par conséquent sur le flux et le couple, et aussi rend le dimensionnement des paramètres des régulateurs PI des courants I_{sd} et I_{sq} très difficile (difficile de commander les tensions V_{sd} et V_{sq} lorsqu'elles sont couplées par les deux courants I_{sd} et I_{sq}). Pour y remédier, nous nous intéressons de réaliser un découplage dans lesquelles les courants (les tensions) sont commandés séparément. Dans ce cas, nous utilisons le découplage par la méthode de compensation.

La compensation a pour but de découpler les axes d et 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 (paramètres) des régulateurs.

Le schéma bloc de la figure 11 présente la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique d'une MAS alimentée en tension par un onduleur de tension commandé par MLI avec découplage par compensation et avec bloc de défluxage.

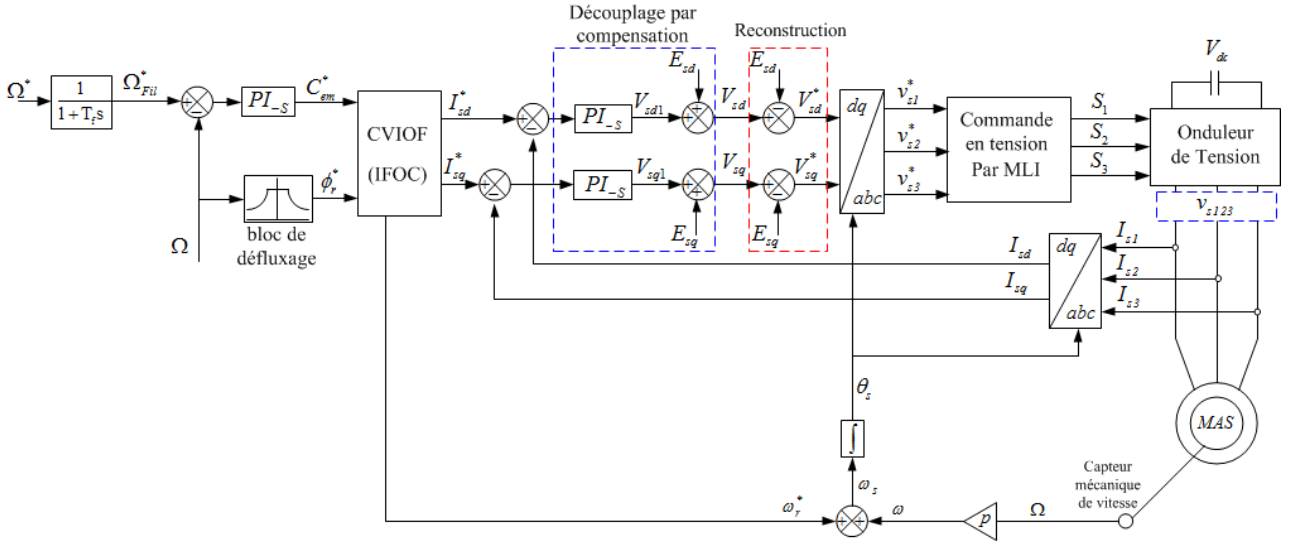


Fig. 11. Schéma de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique d'une MAS alimentée en tension par un onduleur de tension commandé par MLI avec découplage par compensation et avec bloc de défluxage.

Découplage des axes d et q ou des tensions V_{sd} et V_{sq} par compensation

Dans notre travail, on suppose que le flux rotorique ϕ_r varie lentement par rapport au courant statorique I_{sd} , ce flux est donné par :

$$\phi_r = M I_{sd}, \quad \frac{d\phi_r}{dt} = 0 \quad (9)$$

En développant le flux rotorique dans les équations des tensions statoriques on obtient.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{d}{dt} I_{sd} - \omega_s L_s \sigma I_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{d}{dt} I_{sq} + \omega_s L_s \sigma I_{sd} + L_s \sigma \omega K_s \phi_{rd} \end{cases} \quad (10)$$

En appliquant la transformation de **Laplace** on obtient:

$$\begin{cases} V_{sd} = L_s \sigma \lambda I_{sd} + L_s \sigma \mathbf{s} I_{sd} - \omega_s L_s \sigma I_{sq} - L_s \sigma \frac{K_s}{T_r} M I_{sd} \\ V_{sq} = \omega_s L_s \sigma I_{sd} + L_s \sigma \lambda I_{sq} + L_s \sigma \mathbf{s} I_{sq} + L_s \sigma \omega K_s \phi_{rd} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} V_{sd} = L_s \sigma (\lambda - \frac{K_s}{T_r} M + \mathbf{s}) I_{sd} - \omega_s L_s \sigma I_{sq} \\ V_{sq} = L_s \sigma (\lambda + \mathbf{s}) I_{sq} + \omega_s L_s \sigma I_{sd} + L_s \sigma \omega K_s \phi_{rd} \end{cases} \quad (12)$$

Le principe de découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande V_{ds1} et V_{qs1} tel que V_{ds1} n'agit que sur I_{sd} et V_{qs1} sur I_{sq} . Pour obtenir ces deux nouvelles variables de commande on compense les deux termes de couplage comme Fem (E_{sd} , E_{sq} : Fem de compensation au termes de couplages) à la sortie des régulateurs de tel sorte que :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{ds1} + E_{sd} \\ V_{sq} = V_{qs1} + E_{sq} \end{cases} \quad (13)$$

avec E_{sd} et E_{sq} sont les termes de couplages

$$\begin{cases} E_{sd} = -\omega_s L_s \sigma I_{sq} \\ E_{sq} = \omega_s L_s \sigma I_{sd} + \omega L_s \sigma K_s \phi_{rd} \end{cases} \quad (13)$$

On obtient un nouveau système d'équations linéaire parfaitement découplé.

$$\begin{cases} V_{sd1} = L_s \sigma \left(\lambda - \frac{K_s}{T_r} M + s \right) I_{sd} \\ V_{sq1} = L_s \sigma (\lambda + s) I_{sq} \end{cases} \quad (14)$$

La composante du courant I_{qs} contrôlera le couple et celle du courant I_{ds} contrôlera le flux.

Les tensions V_{sd}^* et V_{sq}^* de références sont alors reconstituées à partir des tensions V_{sd} et V_{sq} par la compensation des deux termes E_{sd} et E_{sq} à l'entrée du bloc de transformation de Park mais de signe opposé comme le montre la figure 12:

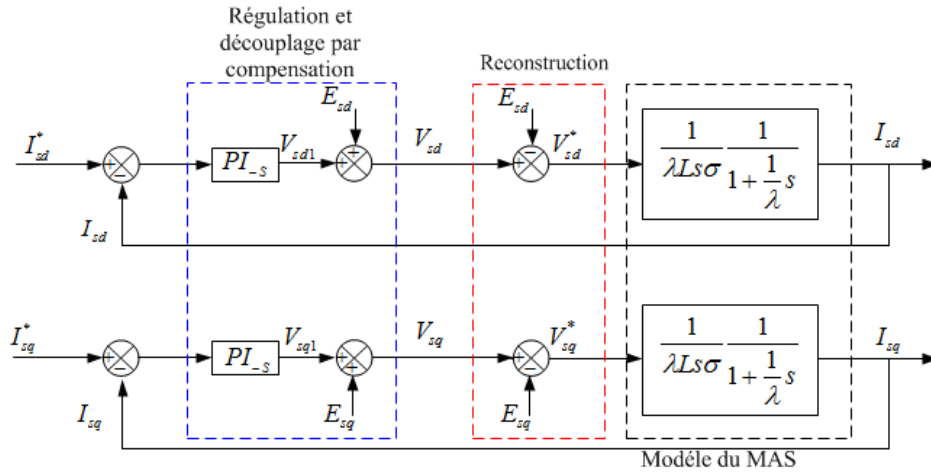


Fig. 12. Découplage par compensation

Régulation des courants

Pour chacune des boucles de courant, nous avons adopté un régulateur PI qui donne à la sortie une tension de référence. Le schéma bloc devient figure 13 (par exemple la régulation du courant I_{ds}).

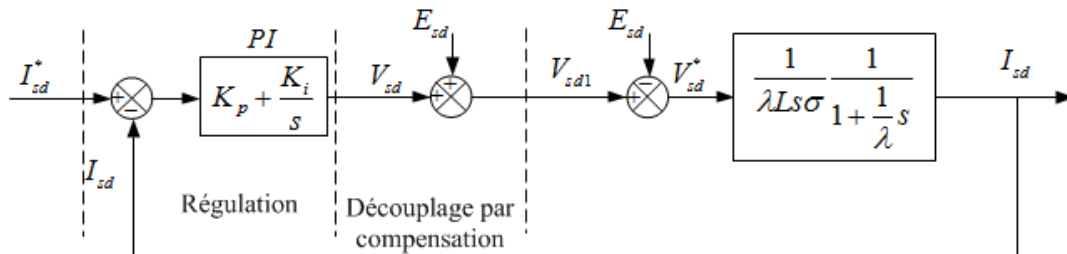


Fig. 13. Schéma fonctionnel de la régulation du courant I_{sd} .

- 1- D'après les deux figures 12 et 13, et les équations issues de découplage, calculer les paramètres du régulateur PI (k_p et k_i) par la méthode de placement de pôles avec un coefficient d'amortissement $\xi = 0.707$ et une pulsation propre $\omega_c = 1000 \text{ rad} / \text{s}$.

Travail demandé :

Réaliser la simulation de la figure 11 sur un temps de simulation de 5s avec pas fixe de 10^{-4} s dans les trois cas suivants.

- Marche à vide avec consigne de vitesse égale 120rad/s.
 - Insertion d'une charge à l'instant $t=2$ s.
 - Marche de la MAS avec grande vitesse.
- 1- Visualiser et relever la forme de la vitesse et du couple du moteur asynchrone dans les trois cas.
 - 2- Visualiser et relever la forme des courants statoriques I_{sd} et I_{sq} .
 - 4- Visualiser et relever la forme du flux rotorique dans le 3^{ème} cas.
 - 5- Commenter les résultats et justifier les différences remarquées.

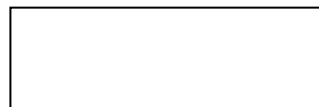
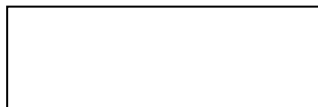
Découplage des axes d et q ou des tensions V_{sd} et V_{sq} par compensation

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \implies \begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} - M \cdot I_{sd}) \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rq} - M \cdot I_{sq}) \\ \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

En développant à partir de l'équation (2) les flux statoriques dans l'équation (1), on obtient.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} (L_s \cdot I_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} - M \cdot I_{sd})) - \omega_s (L_s \cdot I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rq} - M \cdot I_{sq})) \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} (L_s \cdot I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rq} - M \cdot I_{sq})) + \omega_s (L_s \cdot I_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} - M \cdot I_{sd})) \end{cases} \quad (3)$$



$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + L_s \cdot \frac{d}{dt} I_{sd} - \frac{M^2}{L_r} \frac{d}{dt} I_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_s L_s \cdot I_{sq} - \omega_s \frac{M^2}{L_r} I_{sq} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{rq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{sq} - \frac{M^2}{L_r} \frac{d}{dt} I_{sq} + \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - \omega_s L_s \cdot I_{sd} - \omega_s \frac{M^2}{L_r} I_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \cdot \frac{d}{dt} I_{sd} - \sigma \omega_s L_s \cdot I_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + \sigma \omega_s L_s \cdot I_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} \end{cases}$$

A partir de cette équation on réalise le découplage

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd1} + E_{sd} \\ V_{sq} = V_{sq1} + E_{sq} \end{cases}$$

avec

$$\begin{cases} E_{sd} = -\omega_s L_s \sigma I_{sq} \\ E_{sq} = \omega_s L_s \sigma I_{sd} + \omega \frac{M}{L_r} \phi_{rd} = \omega_s L_s \sigma I_{sd} + \omega_s \frac{M^2}{L_r} I_{sd} \end{cases}$$

$$E_{sq} = \omega_s L_s \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) I_{sd} + \omega \frac{M^2}{L_r} I_{sd} = \omega_s L_s I_{sd} - \omega_s \frac{M^2}{L_r} I_{sd} + \omega_s \frac{M^2}{L_r} I_{sd}$$

$$\begin{cases} E_{sd} = -\omega_s L_s \sigma I_{sq} \\ E_{sq} = \omega_s L_s I_{sd} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \cdot \frac{d}{dt} I_{sd} + E_{sd} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + E_{sq} \end{cases}$$

On obtient un nouveau système d'équations linéaire parfaitement découplé.

$$\begin{cases} V_{sd1} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \cdot \frac{d}{dt} I_{sd} \\ V_{sq1} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \cdot \frac{d}{dt} I_{sq} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{sd1} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) I_{sd} \\ V_{sq1} = (R_s + \sigma L_s \cdot s) I_{sq} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} V_{sd1} \\ I_{sq} = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s \cdot s)} V_{sq1} \end{cases}$$

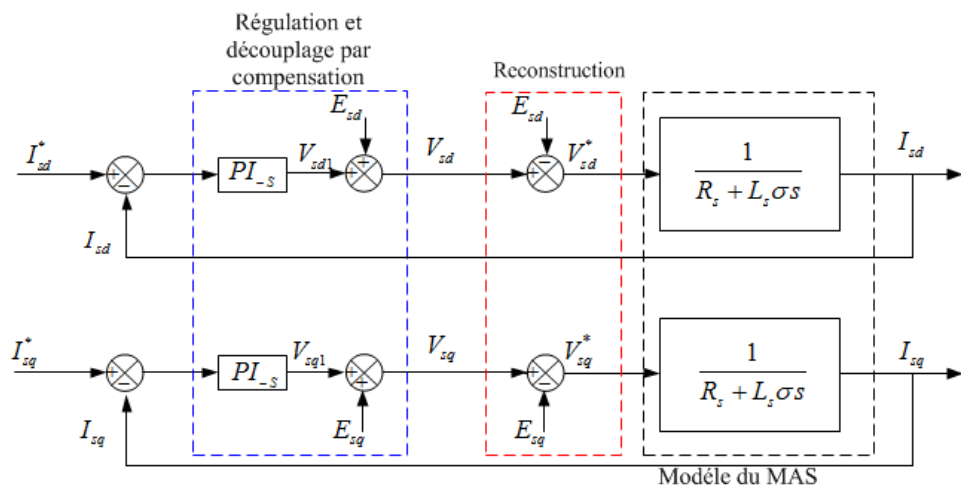


Fig. 12. Découplage par compensation