

II-1 Introduction

La simplicité de commander le moteur à courant continu (MCC.) a permis à ce dernier d'être par excellence le meilleur variateur de vitesse. Toutefois sa structure et la présence du collecteur mécanique nécessite une maintenance souvent trop coûteuse pour les performances requises. Par conséquent les recherches ont été orientées vers la commande des machines à courant alternatif alimentées par des convertisseurs statique à fréquence variable.

La difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait que son modèle mathématique dans la configuration de Park est non-linéaire, multivariable et fortement couplé, c.à.d qu'il existe un couplage complexe entre les deux armatures : stator et rotor. Les commandes qui consistent à contrôler le couple électromagnétique par la pulsation rotorique et le flux par le rapport (tension/fréquence) n'ont pas pu répondre aux exigences des cahiers de charge et donnent donc des performances dynamiques appréciables. Ce n'est que vers les années 70 que des solutions aux problèmes cités au-dessus ont vu le jour grâce à BLACSHKE et HUASSE qui ont réalisé la première commande découplée de la machine asynchrone pour obtenir une situation équivalente à celle d'un moteur à courant continue .

Dans ce chapitre, il sera sujet d'étudier la commande vectorielle par orientation du flux rotorique d'une machine asynchrone alimentée en tension et de présenter les résultats de simulation de cette commande avec des régulateurs classiques.[6]

II.2. Introduction à la commande vectorielle

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone expression (I.18) montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes en quadrature, des flux rotoriques et des courants statoriques. qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine. Le référentiel de travail pour la commande est celui lié au champ tournant afin que l'axe «d» coïncide avec la direction désirée du flux, qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ainsi, il est possible d'orienter les différents flux de la machine comme suit :

- Flux rotorique : $\Phi_{rd} = \Phi_r$; $\Phi_{rq} = 0$ (II.1)

- Flux statorique : $\Phi_{sd} = \Phi_s$; $\Phi_{sq} = 0$ (II.2)

La figure (2.1) représente l'orientation le flux rotorique Φ_r , le flux statorique Φ_s

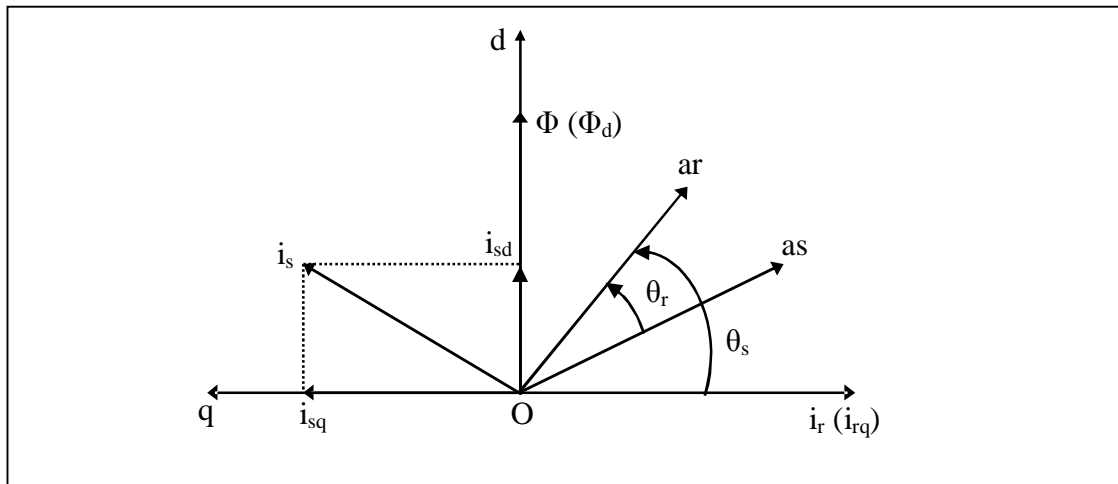


Figure (II.1) : Orientation du flux (rotorique, statorique ou d'entrefer)

II.2.1 Principe de base de la commande vectorielle

La commande par orientation du flux, consiste à régler le flux par une composante du courant statorique et le couple par l'autre composante de ce même courant. Pour cela, il faut choisir un système d'axes (d, q) et une loi de commande assurant ce découplage.[5]

Le référentiel lié au flux rotorique est choisi pour obtenir fonctionnements de la machine asynchrone comparables à celui de la machine à courant continu. Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

le couple est donné par :

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (II.4)$$

Si l'axe d, est aligné systématiquement sur le vecteur flux rotorique tel que ($\Phi_{rd} = \Phi_{mr}$ et $\Phi_{rq} = 0$), dans le repère lié au champ tournant, le couple devient:

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_r} \Phi_r i_{sq} \quad (II.5)$$

Ou encore moyennant une constante $K_2 = \frac{3}{2} p \frac{M^2}{L_r}$ prés, le couple devient :

$$C_e = K_2 \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} \quad (II.6)$$

La présente expression est analogue à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée donnée par :

$$C_e = K_t \cdot i_a \cdot i_f \quad (II.7)$$

L'analogie est donc telle que le courant i_{sd} correspond à i_f (courant inducteur) et i_{sq} correspond à i_a (courant induit).comme le montre la figure (II.02) Le contrôle du couple devient parfaitement linéaire, si l'une des deux composantes du courant statorique est fixée. Généralement, à flux constant c'est i_{sd} qui est égale à une constante après extinction des transitoires.

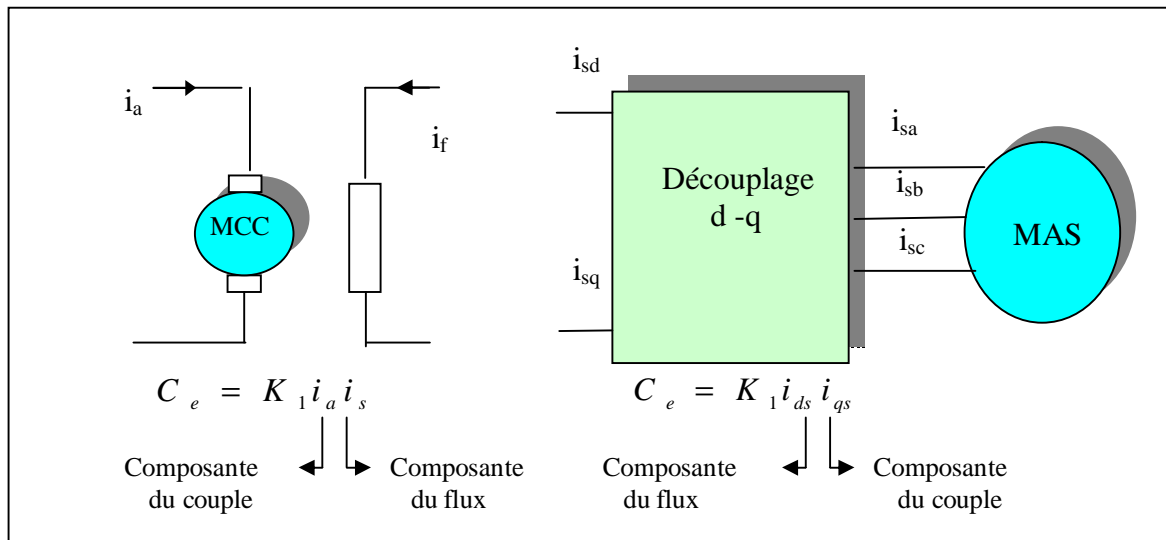


Figure (II-02): Equivalence entre la commande d'une d'un MCC et la commande vectorielle MAS

Cette commande est basée sur le passage du système d'axes triphasé (A, B, C) au système biphasé (d ,q) doit se faire de façon à aligner le flux rotorique sur l'axe d, ce qui permet

d'obtenir une expression du couple proportionnel aux deux composantes orthogonales i_{sd} et i_{sq}

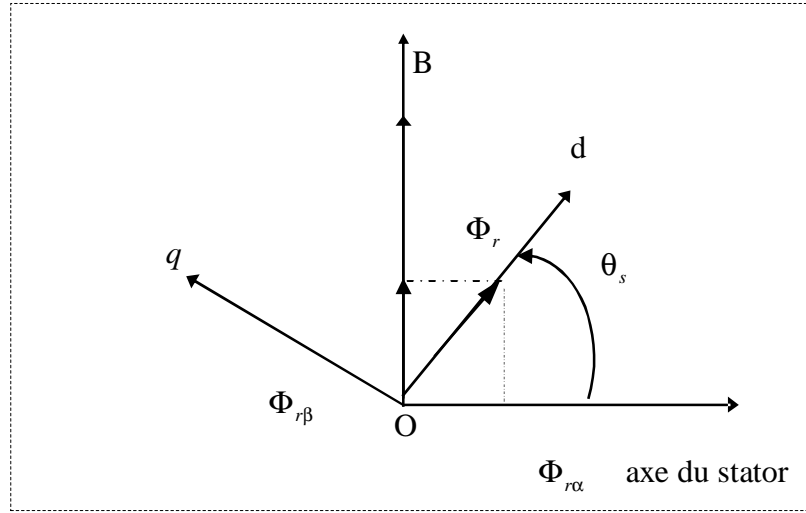


Figure (II.03) orientation de repère (d, q) sur le flux

Pour l'élaboration de la commande vectorielle on passe du repère fixe du stator (α, β) au repère (d,q) tournant à la vitesse du champ telle que la relation de passage d'un système d'axe à un autre soit vérifiée

$$\overline{X}(d, q) = \overline{X}(\alpha, \beta) e^{-j\theta}$$

$$\overline{X}(d, q) = X_d + jX_q$$

$$\overline{X}(\alpha, \beta) = X_\alpha + jX_\beta$$

on utilisant les formulations précédentes dans (I.35), (I.36) on aura :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R'_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{R_{fs}}{L_r} \Phi_r - \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{rq} \\ V_{sq} &= R'_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_r + \frac{R_{fs}}{L_r} \Phi_{rq} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \\ 0 &= (R'_{fr} - \frac{M}{T_r}) i_{sd} + (\frac{R_r + R_{fr}}{L_r}) \Phi_r - \omega_r \Phi_r + \frac{d\Phi_r}{dt} \\ 0 &= (R'_{fr} - \frac{M}{T_r}) i_{sq} + (\frac{R_r + R_{fr}}{L_r}) \Phi_{rq} + \omega_r \Phi_r + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \end{aligned} \quad (II.8).$$

$$\text{Avec: } R_{fr} = R_{fr} \frac{\sigma_r}{\sigma_r + 1} ; \quad R'_{fs} = R_s + R_{fs} \frac{\sigma_r}{1 + \sigma_r} ; \quad \sigma_r = \frac{L_r - M}{M} ; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

La commande vectorielle assurant le contrôle du flux et du couple est définie par le système d'équations (II.8). Le schéma bloc de cette structure est représenté par le montage de la figure (II.4).

II.2.2 Structure de commande vectorielle a flux oriente

Tous les travaux de recherches effectués sur la commande vectorielle utilisent deux principales méthodes:

Commande direct : Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase qui doivent être vérifiées quelque soit le régime transitoire effectué. La mesure directe permet de connaître exactement la position du flux. Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple quelque soit le point de fonctionnement. Les inconvénients majeurs de cette méthode, est La non-fiabilité de la mesure du flux, et le coût de production élevé (capteur+filtre). [5]

La Commande indirecte: Cette méthode n'utilise pas l'amplitude de flux de rotor mais seulement sa position. Elle ne nécessite pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais seulement l'utilisation d'un capteur ou d'estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée en deux groupes principaux, dans le premier groupe, le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées. Dans le deuxième groupe le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statorique et de la vitesse du rotor. L'inconvénient majeur de cette méthode, est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et à la variation de température surtout la constante de temps rotorique T_r . [5].

Le montage qu'on a illustré par la figure (II.4), explique le principe de la commande Vectorielle directe d'une machine alimentée en tension.

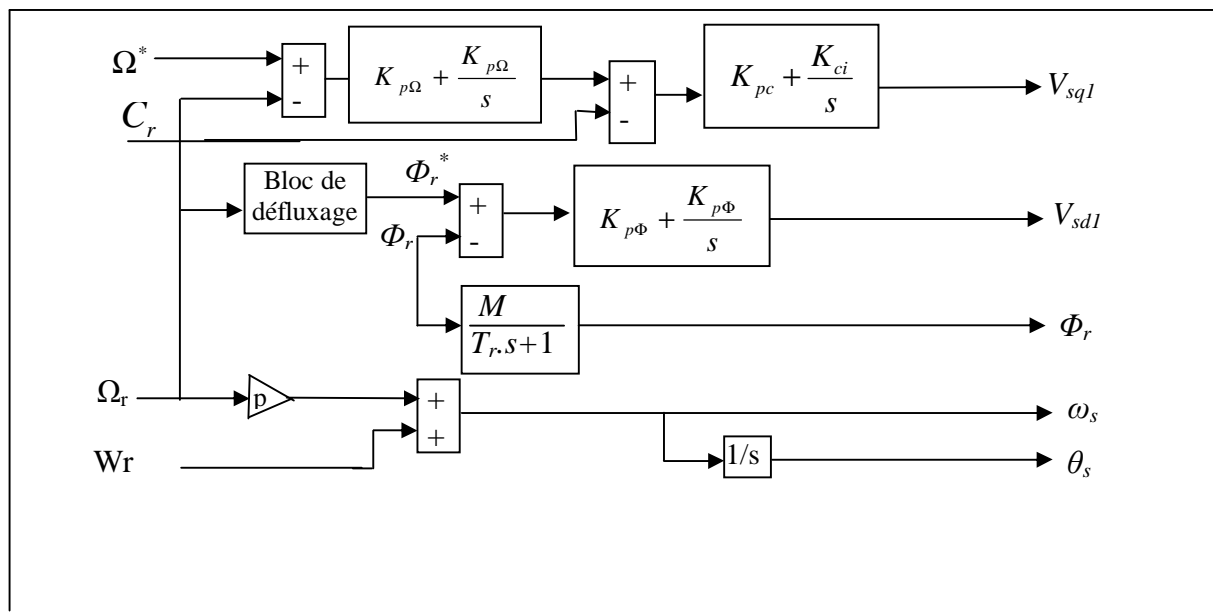


Figure (II.04) : Structure de la commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique

II.2.3 Découplage entrée-sortie

Le bloc de découplage entre les tensions (V_{sd}, V_{sq}) permet de contrôler de manière indépendante le couple par la composante (I_{sq}) et le flux rotorique par la composante (I_{sd}) .

A partir d'équation (II.8), nous avons :

$$\begin{cases} \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R'_s i_{sd} = V_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_r}{dt} - \frac{R_{fs}}{L_r} \Phi_{rd} \\ \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R'_s i_{sq} = V_{sq} - \omega_s \left[\sigma L_s i_{sd} - \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_r \right] - \frac{R_{fs}}{L_r} \Phi_{rq} \end{cases} \quad (II.9)$$

$$\Phi_r = \frac{\frac{M}{T_r} - R'_{fr}}{\frac{1}{T} + s}, \quad T = \frac{L_r}{R_r + R_{fr}} \quad (II.10)$$

$$\omega_r = \left(\frac{M}{T_r} - R'_{fr} \right) \frac{i_{sq}}{\Phi_r} \quad (II.11)$$

Les deux équations de tension du stator, (II.9) présentent des termes de couplage par interférence de l'axe d sur l'axe q et inversement. Afin de disposer d'une commande linéaire en tension ces termes n'appartenant pas à l'axe considéré doivent être compensés. A partir des deux dernières équations. Il est possible de définir deux termes de couplage qui sont considérés par la suite

comme des perturbations vis-à-vis des régulation, elle sont définies comme des f.e.m de rotation de la machine. Ces termes sont définis tels que:

$$\begin{aligned} V_{sd}^* &= V_{sd} + e_d \\ V_{sq}^* &= V_{sq} + e_q \end{aligned} \quad (II.12)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_q = \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{R_{fs}}{1 + \sigma_r} \Phi_r \\ e_d = \omega_s \left(\sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{T_r} \Phi_r \right) \end{cases} \quad (II.13)$$

La structure du bloc de découplage est représentée par la figure suivant:

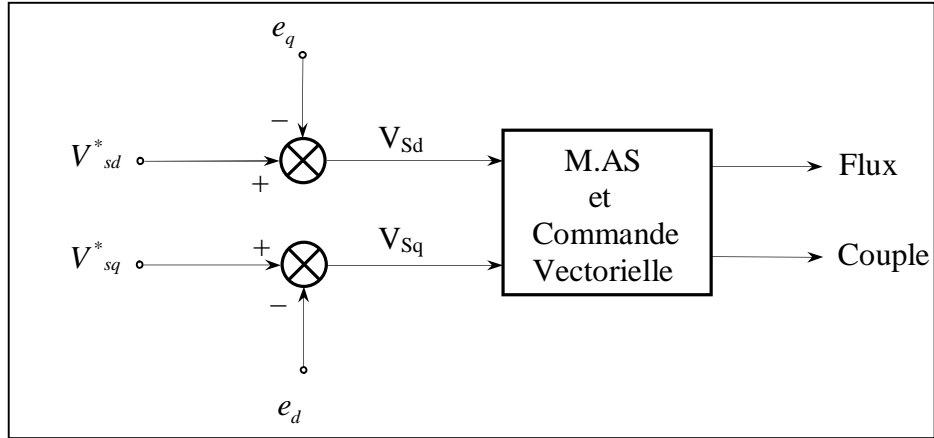


Figure (II.05) : Structure du bloc de découplage

II.2.4 Bloc de défluxage

Lors des tests en variation de sur vitesse on a donc utilisé le bloc de défluxage qui donne un flux constant pour des vitesses inférieure à la vitesse nominale, et décroît pour les vitesses supérieures à cette dernière. [5]

La fonction de défluxage qui impose la consigne de flux Φ_r suit le profil de la figure (II.5)

$$\begin{aligned} \Phi_r &= \Phi_{r\text{ nom}} & \text{si } |\Omega_r| &\leq \Omega_{r\text{ nom}} \\ \Phi_r &= 0 & \text{si } |\Omega_r| &> \Omega_{r\text{ nom}} \end{aligned}$$

$\Phi_{r\text{ nom}}$: Flux rotorique nominal.

$\Omega_{r\text{ nom}}$: Vitesse rotorique nominal.

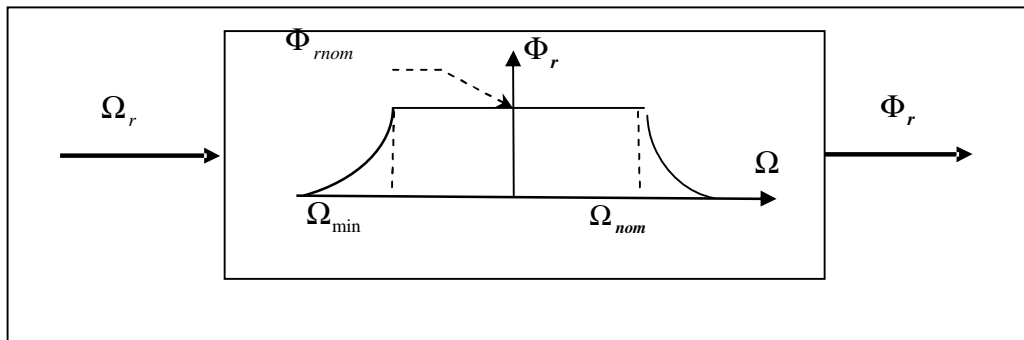


Figure (II-06) : Bloc de défluxage

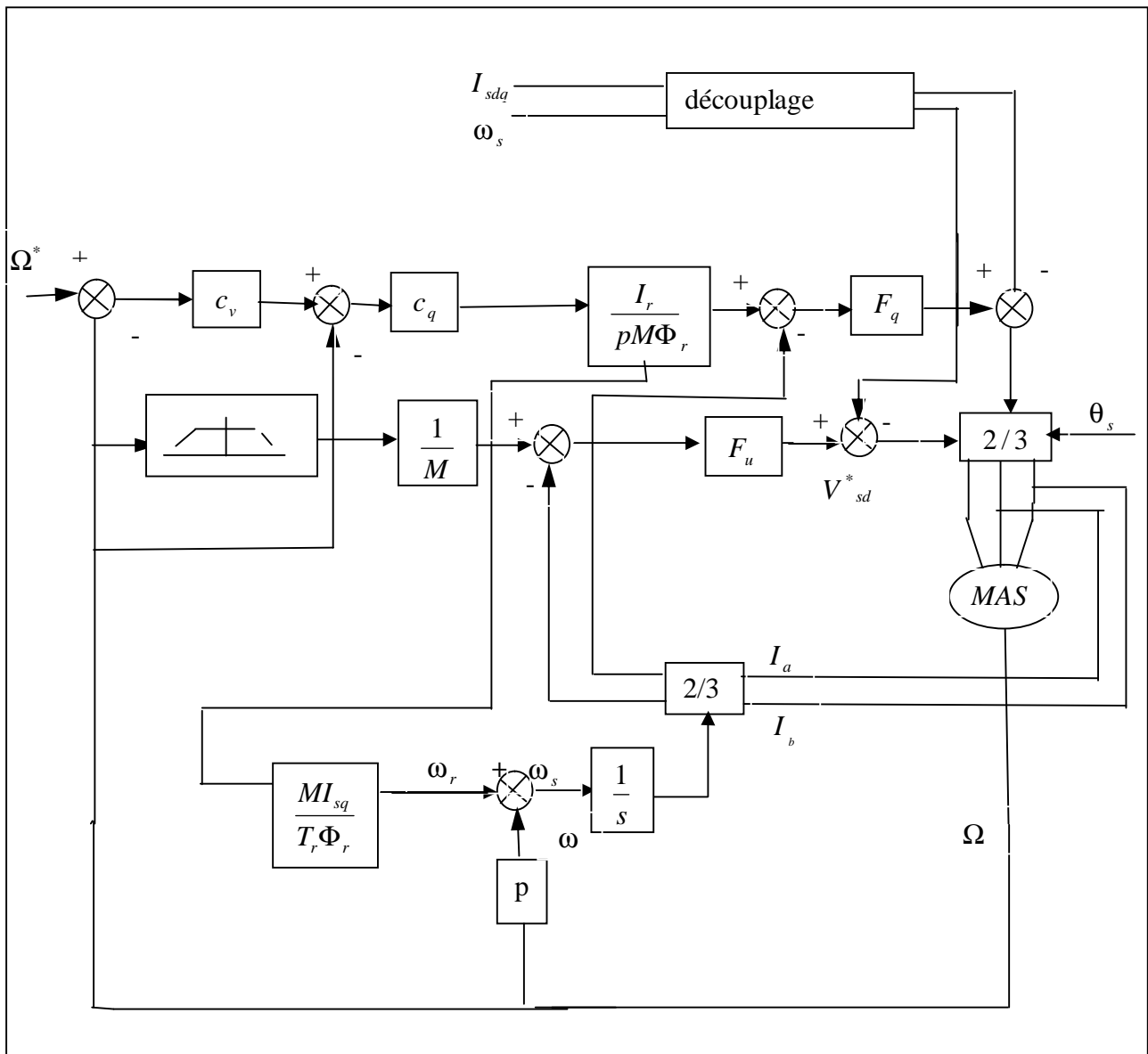


Figure (II.07) schéma de principe de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique indirecte

II.3 Régulateurs

II.3.1 Conception des régulateurs

Soit $Y^*(t)$ le signal à suivre, et $y(t)$ le signal de sortie du système à contrôler.

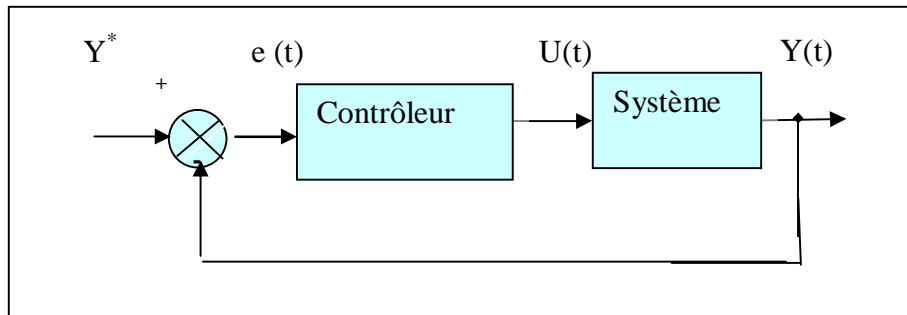


Figure (II-08) : Représentation de la commande par PI

La loi de commande est :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)$$

- **Action proportionnelle**

- Si K_p est grand, la correction est rapide .Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît

- Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

- **Action intégrale**

L'action intégrale réagit, lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule[5].

II .3.2 Caractéristiques des régulateurs

- **Stabilité**

Un système bouclé doit être stable .si seulement si les réactions du système de régulation soit énergétique sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger.

Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité [5].