

Chapitre 4

Commande vectorielle de la machine asynchrone

- Vector Control of Induction Machine -

Contenu

- 1- Contexte général
 - 2- Principe de la commande vectorielle
 - 3- Méthodes de calcul de θ_s
 - 4- Classification des structures de la commande vectorielle
 - 5- Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en courant
 - 6- Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en tension
 - 7- Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en courant
 - 8- Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en tension
-

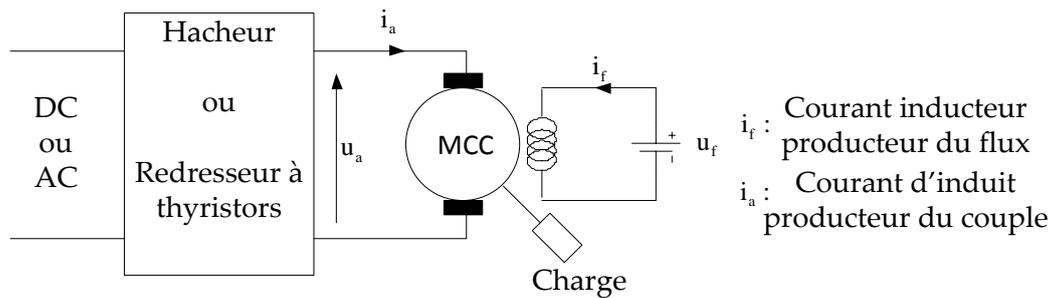
1- Contexte général

Avant l'apparition de la commande vectorielle, les deux variateurs les plus sollicités étaient :

- Le variateur à base de moteur asynchrone contrôlé par la commande scalaire. Toutefois, ce variateur est connu par son insuffisance en régimes transitoires.
- Le variateur à base de machine à courant continu (MCC). Ce variateur est connu par ses hautes performances dynamiques.

Machine à courant continu à excitation séparée comme référence

Le schéma du variateur à base d'une MCC est le suivant :



Le couple développé par la MCC est :

$$C_{em} = k\phi i_a$$

- Les points forts de la MCC à excitation séparée

a) Le flux est fixé par le courant d'excitation ;

b) Le couple est contrôlé par action sur le courant d'induit par l'intermédiaire de la tension d'alimentation ajustée par un convertisseur de puissance.

Conséquence : Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment.

- Les points faibles de la MCC à excitation séparée

La présence du système balais-collecteur conduit à :

- limiter la puissance et la vitesse de la machine ;

- exiger une maintenance périodique ;

- limiter l'utilisation de la machine dans des milieux hostiles.

- Points forts d'une MAS à cage

a) Simplicité de construction ;

b) Robustesse.

- Points faibles d'une MAS à cage

Le couple et le flux sont fortement couplés.

Question : Y-a-t-il une possibilité de concevoir une technique de commande pour une MAS similaire à celle d'une MCC à excitation séparée ?

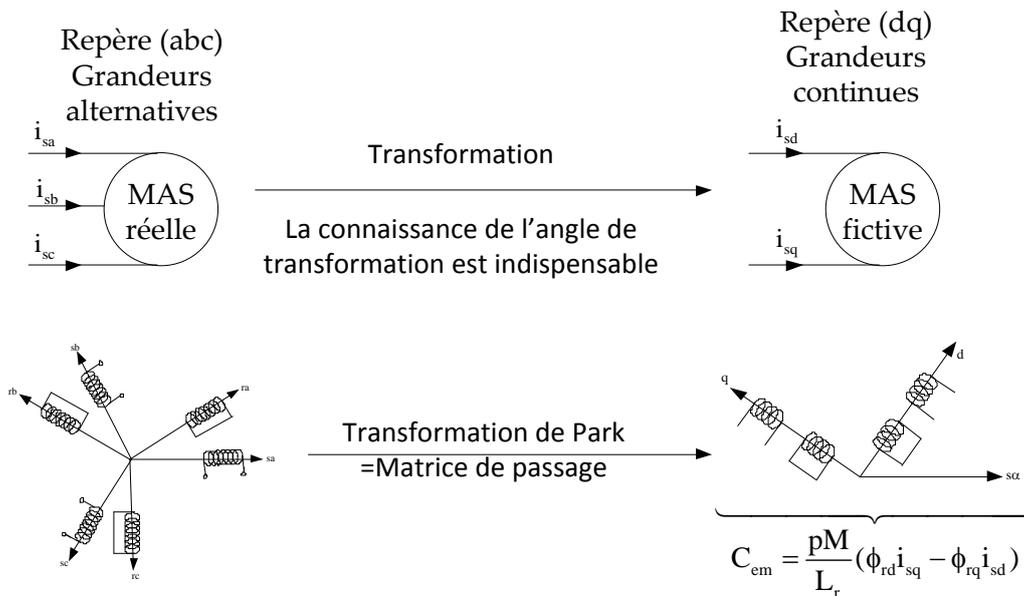
Objectif de la commande vectorielle

Rendre le fonctionnement de la MAS similaire à celui d'une MCC à excitation séparée. Autrement dit : éliminer le couplage existant entre le flux et le couple ce qui conduit à un contrôle découplé de la MAS.

2- Principe de la commande vectorielle

Comment peut-on rendre deux machines naturellement différentes identiques ?

Etape 1 : Transformer la MAS en une MCC fictive via une transformation de coordonnées convenable



Dans le repère (dq), le couple s'exprime comme un produit croisé des courants et des flux. Donc, on ne dispose pas encore de deux grandeurs indépendantes pour contrôler séparément le flux et le couple comme dans une MCC.

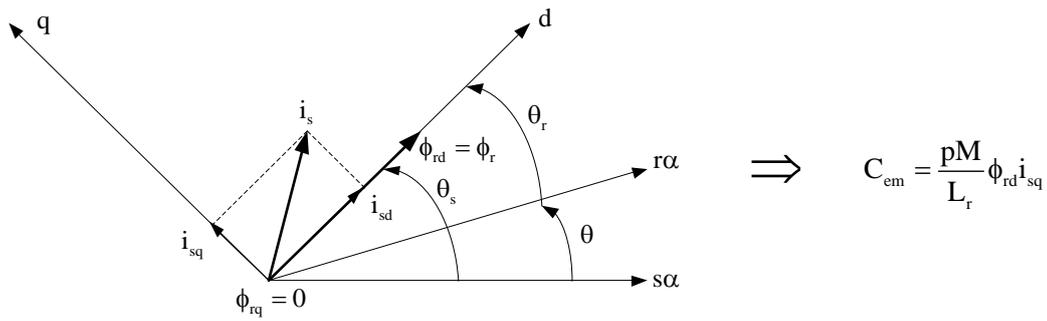
Etape 2 : Choisir la bonne machine virtuelle par un choix convenable de la position du repère (dq)

Observons l'expression du couple électromagnétique de la MAS :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\phi_{rd}i_{sq} - \phi_{rq}i_{sd})$$

Si on élimine le deuxième produit $C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\phi_{rd}i_{sq} - \cancel{\phi_{rq}i_{sd}})$, alors l'expression du couple ressemblerait fort à celui d'une MCC à excitation séparée. Pour réaliser cet objectif, il suffit d'orienter le repère (dq) de manière à annuler la composante du flux en quadrature. Ce qui en résulte :

$$\phi_{rq} = 0 \Rightarrow \phi_{rd} = \phi_r$$



Dans ce cas, l'expression du couple se simplifié à :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} \phi_{rd} i_{sq} = k' \phi_{rd} i_{sq}$$

C'est une relation semblable à celle d'une MCC à excitation séparée.

Contrôle en courant du flux et du couple

L'intérêt du contrôle du flux peut être interpréter à partir de l'expression du couple $C_{em} = \frac{pM}{L_r} \phi_{rd} i_{sq}$.

En effet, si on arrive à réguler le flux ϕ_{rd} et de le maintenir constant, alors le couple sera totalement contrôlable par action sur le courant en quadrature i_{sq} . Cherchons donc quelle est la grandeur statorique (accessible) capable de réguler le flux ϕ_{rd} .

Pour ce faire, examinant le modèle de la machine pour $\phi_{rq} = 0$:

$$v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \underbrace{\phi_{rq}}_0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt}$$

$$\phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd}$$

A partir de la deuxième équation on a :

$$i_{rd} = \frac{\phi_{rd} - M i_{sd}}{L_r}$$

En remplaçant i_{rd} dans la première équation, on obtient :

$$0 = R_r \left(\frac{\phi_{rd} - M i_{sd}}{L_r} \right) + \frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{\phi_{rd} - M i_{sd}}{T_r} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \text{ avec } T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Ce qui donne :

$$\phi_{rd} + T_r \frac{d\phi_{rd}}{dt} = M i_{sd}$$

Cette équation montre qu'il est possible de régler le flux ϕ_{rd} en agissant sur la composante i_{sd} du courant statorique.

3- Méthodes de calcul de θ_s

Pour pouvoir réaliser la transformation de Park, il est nécessaire de connaître à tout moment la position de l'axe (d) repérée par l'angle θ_s .

3.1- Méthodes indirectes

1- Cas de présence d'un capteur de position

L'angle de changement de repère des grandeurs statoriques est défini par la relation d'autopilotage suivante :

$$\theta_s = p\theta + \theta_r$$

Avec :

- L'angle θ est mesuré par un capteur de position.
- L'angle θ_r est calculé par intégration de la pulsation des grandeurs rotoriques ω_r comme suit :

$$\theta_r = \int \omega_r dt + \theta_r(0)$$

Calcul de ω_r

Le modèle de la machine à flux rotorique orienté selon l'axe (q) est:

$$v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{sq}}{dt}$$

$$\phi_{sq} = L_r i_{rq} + M i_{sq}$$

A partir de la deuxième équation on tire i_{rq} par :

$$i_{rq} = -\frac{M}{L_r} i_{sq}$$

En remplaçant i_{rq} dans la première équation, on obtient :

$$R_r \left(-\frac{M}{L_r} i_{sq}\right) + \omega_r \phi_{rd} = 0 \Rightarrow \omega_r = \frac{R_r M}{L_r \phi_{rd}} i_{sq} = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\phi_{rd}}$$

Cette équation montre que, une fois le flux rotorique ϕ_{rd} est maintenu constant, la pulsation rotorique est imposée par le courant i_{sq} .

Si le flux rotorique ϕ_{rd} est maintenu constant, nous avons : $\phi_{rd} = M i_d$ et la pulsation ω_r peut être exprimée en fonction des courants par :

$$\omega_r = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{M i_{sd}} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{sq}}{i_{sd}}$$

2- Cas de présence d'un capteur de vitesse

Dans ce cas de figure l'angle θ_s est calculé par intégration de la pulsation statorique selon la relation suivante :

$$\theta_s = \int \omega_s dt + \theta_s(0)$$

La pulsation ω_s est calculée par la relation d'autopilotage suivante :

$$\omega_s = p\Omega + \omega_r$$

Avec :

Ω est la vitesse mécanique de la machine mesurée par un capteur de vitesse.

ω_r est la pulsation rotorique calculé par $\omega_r = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\phi_{rd}} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{sq}}{i_{sd}}$.

3.2- Méthodes directes

1- Cas de présence d'un capteur de flux

L'angle θ_s est calculé en fonction des composantes du flux rotorique mesurées $\phi_{r\alpha}^m, \phi_{r\beta}^m$ comme suit :

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\phi_{r\beta}^m}{\phi_{r\alpha}^m}\right)$$

2- Cas de présence d'un estimateur de flux

L'angle θ_s est calculé en fonction des composantes du flux rotorique estimées $\hat{\phi}_{r\alpha}, \hat{\phi}_{r\beta}$ comme suit :

$$\hat{\theta}_s = \arctg\left(\frac{\hat{\phi}_{r\beta}}{\hat{\phi}_{r\alpha}}\right)$$

4- Classification des structures de la commande vectorielle

4.1- Classification selon l'orientation du repère (dq)

a) Par orientation du flux rotorique

Dans ce cas, l'axe (d) du repère (dq) est confondu sur le vecteur flux rotorique. Ce qui en résulte :

$$\phi_{rd} = \phi_r, \phi_{rq} = 0.$$

b) Par orientation du flux statorique

Dans ce cas, l'axe (d) du repère (dq) est confondu sur le vecteur flux statorique. Ce qui en résulte :

$$\phi_{sd} = \phi_s, \phi_{sq} = 0.$$

c) Par orientation du flux d'entrefer

Dans ce cas, l'axe (d) du repère (dq) est confondu sur le vecteur flux d'entrefer. Ce qui en résulte :

$$\phi_{ed} = \phi_e, \phi_{eq} = 0.$$

4.2- Classification selon la méthode de calcul de l'angle de Park**a) Commande vectorielle indirecte**

Dans ce cas, la connaissance de la phase du vecteur flux rotorique est indispensable. Elle est calculée indirectement par :

$$\theta_s = p\theta + \int \omega_r dt + \theta_r(0) \text{ pour le cas d'un capteur de position}$$

$$\theta_s = \int (\omega_r + p\Omega) dt + \theta_s(0) \text{ pour le cas d'un capteur de vitesse}$$

Dans cette approche, le flux rotorique n'est pas régulé. On n'a pas donc besoin ni de capteur ni d'estimateur de flux.

b) Commande vectorielle directe

Dans ce cas, la connaissance du module du vecteur flux rotorique et de sa phase sont indispensables. La phase du flux rotorique est calculée directement par :

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\phi_{r\beta}^m}{\phi_{r\alpha}^m}\right) \text{ pour le cas d'un capteur de flux}$$

$$\hat{\theta}_s = \arctg\left(\frac{\hat{\phi}_{r\beta}}{\hat{\phi}_{r\alpha}}\right) \text{ pour le cas d'un estimateur de flux}$$

Dans cette approche, le flux rotorique est régulé. On a donc besoin soit d'un capteur soit d'un estimateur de flux.

4.3- Classification selon le type d'alimentation de la machine**a) Commande vectorielle en courant**

Dans ce cas, la machine est alimentée en courant soit par :

- un onduleur de courant ;

- un onduleur de tension contrôlé en courant via une PWM à hystérésis.

b) Commande vectorielle en tension

Dans ce cas, la machine est alimentée en tension par un onduleur de tension contrôlé en tension par

- une PWM sinusoidale (SPWM).

- une PWM vectorielle (SVPWM).

5. Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en courant

Principe

Avec orientation du flux rotorique, nous avons :

$$T_r \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \phi_{rd} = M i_{sd}$$

$$C_{em} = \frac{PM}{L_r} \phi_{rd} i_{sq}$$

En supposant que le flux varie d'une manière lente en régime permanent, il vient :

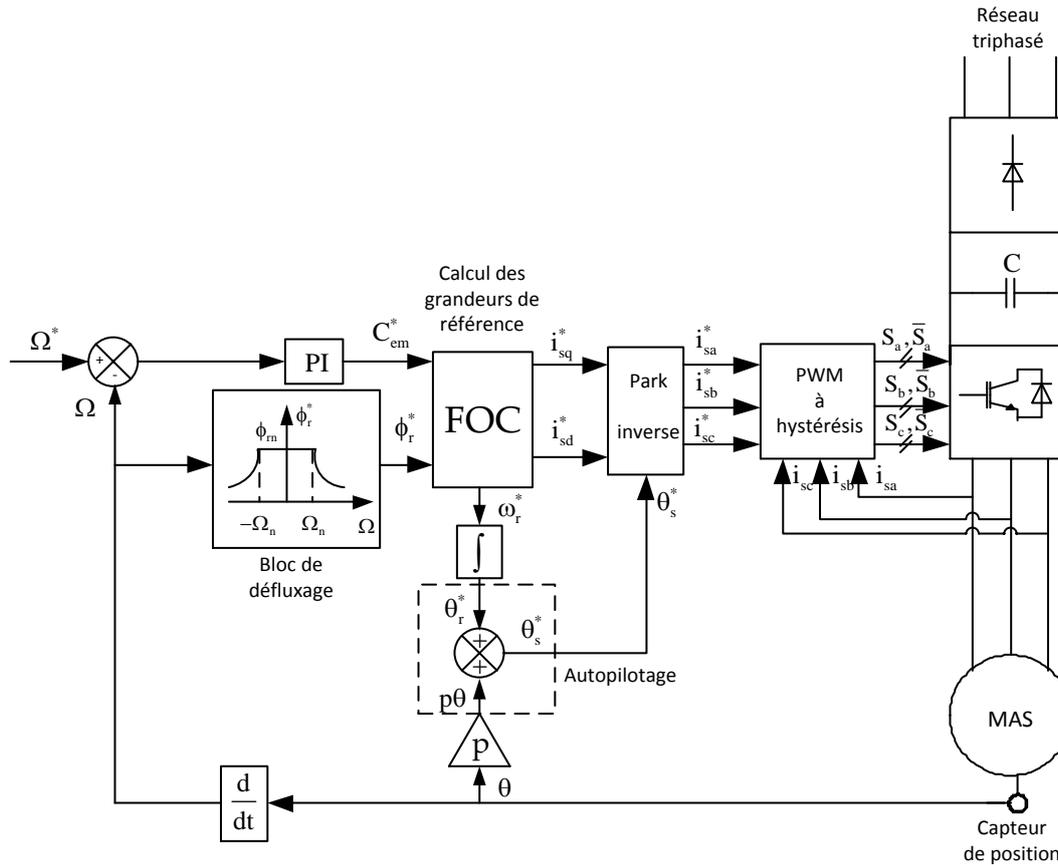
$$\phi_{rd} = M i_{sd}$$

$$C_{em} = \frac{PM^2}{L_r} i_{sd} i_{sq} = p L_s (1 - \sigma) i_{sd} i_{sq}, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

D'après cette équation, il est clair qu'il est possible de contrôler le flux rotorique et le couple par action sur les courants statoriques à l'aide d'une alimentation en courant.

Structure de la commande

La structure de commande vectorielle indirecte d'une machine asynchrone alimentée en courant est représentée sur la figure ci-dessous.



Dans cette structure de commande :

- Le flux rotorique n'est pas régulé. On n'a pas donc besoin ni de capteur ni d'estimateur de flux.
- La pulsation rotorique apparait dans la commande pour calculer la position du vecteur flux rotorique nécessaire pour effectuer la transformation de Park inverse.
- Un seul capteur de position (ou de vitesse) est nécessaire pour calculer d'une manière indirecte la position du vecteur flux rotorique.

Bloc de défluxage

L'objectif de ce bloc est le calcul du flux de référence. Ce flux est maintenu à sa valeur nominale pour des vitesses inférieures à la vitesse nominale. Pour un fonctionnement avec des vitesses supérieures à la vitesse nominale, le flux de référence doit être réduit inversement proportionnel à la vitesse. Ce qui conduit à un défluxage de la machine et une réduction du couple que l'on peut imposer en survitesses.

L'expression du flux de référence est donc :

$$\Phi_r^* = \begin{cases} \Phi_m & \text{si } |\Omega| < \Omega_n \\ \Phi_m \frac{\Omega_n}{\Omega} & \text{si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases}$$

Bloc FOC : Field Oriented Control

L'objectif de ce bloc est le calcul des courants et de la pulsation rotorique de référence en fonction des valeurs souhaitées du flux et du couple. Les grandeurs de références i_{sd}^* , i_{sq}^* , ω_r^* sont obtenues par inversion directe du modèle en courant à $\phi_{rq} = 0$ selon la relation suivante :

$$\text{FOC : } \begin{cases} i_{sd}^* = \frac{\phi_r^*}{M} \\ i_{sq}^* = \frac{L_r}{pM\phi_r^*} \\ \omega_r^* = \frac{M}{T_r\phi_r^*} i_{sq}^* \end{cases}$$

Calcul des gains du régulateur PI de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence capable de maintenir la vitesse correspondante.

L'équation mécanique est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f\Omega - C_r \Rightarrow J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r$$

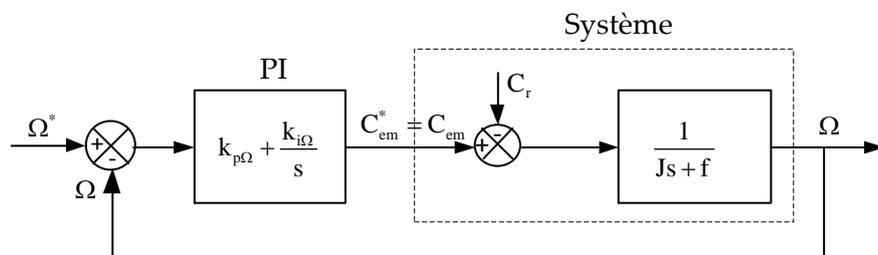
En appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$(Js + f)\Omega(s) = C_{em}(s) - C_r(s)$$

Ce qui en résulte la fonction de transfert suivante :

$$G_{\Omega}(s) = \frac{\Omega(s)}{C_{em}(s) - C_r(s)} = \frac{1}{Js + f}$$

En utilisant un régulateur PI, le schéma de régulation de la vitesse est celui donné par la figure ci-dessous.



Calcul de la fonction de transfert en boucle fermée

La vitesse Ω s'écrit :

$$\Omega = \frac{1}{Js + f} \left\{ \underbrace{\left(k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} \right)}_{C_{em}^*} (\Omega^* - \Omega) - C_r \right\}$$

$$\Omega(Js + f) = \left(k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} \right) \Omega^* - \left(k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} \right) \Omega - C_r$$

$$\left(Js + f + \frac{k_{p\Omega}s + k_{i\Omega}}{s} \right) \Omega = \frac{k_{p\Omega}s + k_{i\Omega}}{s} \Omega^* - C_r$$

$$(Js^2 + fs + k_{p\Omega}s + k_{i\Omega})\Omega = (k_{p\Omega}s + k_{i\Omega})\Omega^* - sC_r$$

$$\Omega = \frac{k_{p\Omega}s + k_{i\Omega}}{Js^2 + (k_{p\Omega} + f)s + k_{i\Omega}} \Omega^* - \frac{s}{Js^2 + (k_{p\Omega} + f)s + k_{i\Omega}} C_r$$

En négligeant la perturbation C_r , la fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$G_{\Omega}^{BF}(s) = \frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{k_{p\Omega}s + k_{i\Omega}}{Js^2 + (k_{p\Omega} + f)s + k_{i\Omega}} = \frac{\frac{k_{p\Omega}}{J}s + \frac{k_{i\Omega}}{J}}{s^2 + \frac{k_{p\Omega} + f}{J}s + \frac{k_{i\Omega}}{J}}$$

En identifiant le dénominateur de $G_{\Omega}^{BF}(s)$ avec celui d'un système de la forme canonique suivante :

$$H(s) = \frac{\omega_{n\Omega}}{s^2 + 2\xi_{\Omega}\omega_{n\Omega}s + \omega_{n\Omega}^2}$$

On trouve :

$$\begin{cases} \frac{k_{i\Omega}}{J} = \omega_{n\Omega}^2 \\ \frac{k_{p\Omega} + f}{J} = 2\xi_{\Omega}\omega_{n\Omega} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_{i\Omega} = J\omega_{n\Omega}^2 \\ k_{p\Omega} = 2J\xi_{\Omega}\omega_{n\Omega} - f \end{cases}$$

6- Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en tension

Principe

Pour monter que le flux et le couple peuvent être contrôlés par action sur les tensions on doit tenir compte des tensions statoriques. En effet, les équations des tensions statoriques d'une MAS commandée par orientation du flux rotorique ($\phi_{rq} = 0$) sont :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \sigma L_s \omega_s i_{sq}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \omega_s \phi_{rd} + \sigma L_s \omega_s i_{sd}$$

Si on admet que le flux varié très lentement par rapport aux courants statoriques, l'équation précédente se simplifie à :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \sigma L_s \omega_s i_{sq}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \omega_s \phi_{rd} + \sigma L_s \omega_s i_{sd}$$

L'application de la transformée de Laplace, nous donne :

$$v_{sd} = (R_s + \sigma L_s s) i_{sd} - \sigma L_s \omega_s i_{sq}$$

$$v_{sq} = (R_s + \sigma L_s s) i_{sq} + \frac{M}{L_r} \omega_s \phi_{rd} + \sigma L_s \omega_s i_{sd}$$

Nous avons également :

$$\phi_{rd} = M i_{sd}$$

$$\omega_r = \frac{M i_{sq}}{T_r \phi_{rd}}$$

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} \phi_{rd} i_{sq}$$

Contrôle en tension du flux rotorique

D'après l'équation suivante :

$$\phi_{rd} = M i_{sd}$$

Le flux ϕ_{rd} est contrôlé par le courant i_{sd} .

Et d'après l'équation suivante :

$$i_{sd} = \frac{\overbrace{v_{sd} - e_{sd}}^{u_{sd}}}{R_s + \sigma L_s s} = \frac{u_{sd}}{R_s + \sigma L_s s} \text{ avec } e_{sd} = -\sigma L_s \omega_s i_{sq} : \text{ terme de couplage}$$

Le courant i_{sd} est contrôlé par la tension u_{sd} .

Ce qui nous donne :

$$\frac{\phi_{rd}}{M} = \frac{u_{sd}}{R_s + \sigma L_s s} \Rightarrow \phi_{rd} = \frac{M}{R_s + \sigma L_s s} u_{sd}$$

Selon cette équation, le flux ϕ_{rd} est contrôlé par la tension u_{sd} qui est en fonction de la tension v_{sd} .

Résultat : Le contrôle du flux rotorique nécessite le contrôle de la tension v_{sd} . Cette dernière est contrôlée par régulation du courant i_{sd} .

La réalisation de cet objectif nécessite les étapes suivantes:

-Etape 1 : Calcul de la référence du courant i_{sd} par inversion directe de l'équation donnant le flux ϕ_{rd} selon l'équation suivante :

$$i_{sd}^* = \frac{\phi_{rd}^*}{M}$$

-Etape 2 : Asservissement du courant i_{sd} en négligeant le terme de couplage e_{sd} . Un régulateur PI est utilisé pour calculer la tension de référence u_{sd}^* comme suit :

$$u_{sd}^* = PI(i_{sd}^* - i_{sd})$$

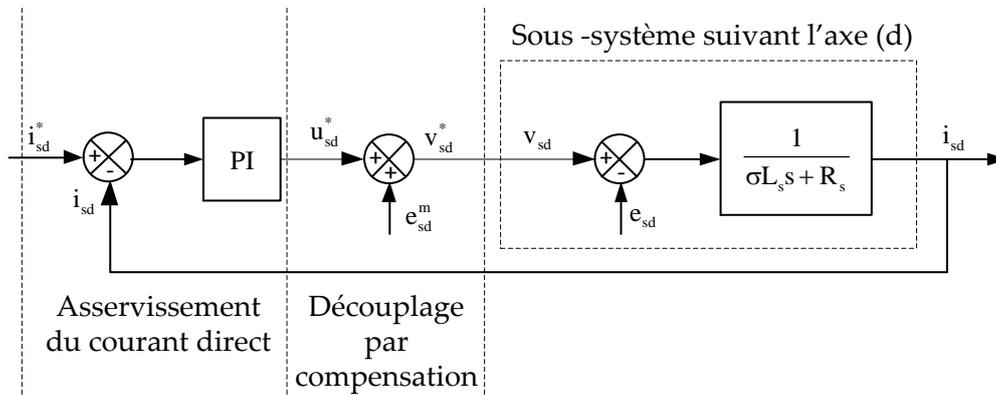
-Etape 3 : Application d'une loi de découplage permettant d'annuler l'effet du terme de couplage e_{sd} et de calculer la tension de référence v_{sd}^* selon la loi suivante :

$$v_{sd}^* = u_{sd}^* + e_{sd}^m$$

Avec $e_{sd}^m = -\sigma L_s \omega_s i_{sq}$ est la valeur mesurée de e_{sd} .

Le calcul de v_{sd}^* nécessite l'ajout du terme de couplage e_{sd}^m de signe opposée de e_{sd} de manière à séparer les boucles de régulation d'axes (d) et (q).

Le schéma bloc représentatif de l'asservissement de i_{sd} et du découplage par compensation est la suivante :



Contrôle en tension du couple

En examinant l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} \phi_{rd} i_{sq}$$

Si le flux rotorique est contrôlé de manière à être maintenu à une valeur donnée, le couple devient proportionnel à la composante en quadrature du courant statorique i_{sq} .

D'un autre côté, nous avons :

$$(\mathbf{R}_s + \sigma \mathbf{L}_s s) \mathbf{i}_{sq} = \mathbf{v}_{sq} - \mathbf{e}_{sq}$$

Avec

$$\mathbf{e}_{sq} = \frac{M}{L_r} \omega_s \phi_{rd} + \sigma L_s \omega_s \mathbf{i}_{sd} : \text{le terme de couplage}$$

Sachant que $\phi_{rd} = M \mathbf{i}_{sd}$, le terme \mathbf{e}_{sq} devient :

$$\mathbf{e}_{sq} = \frac{M^2}{L_r} \omega_s \mathbf{i}_{sd} + \sigma L_s \omega_s \mathbf{i}_{sd} = \underbrace{\left(\frac{M^2}{L_r} + \sigma L_s \right)}_{L_s} \omega_s \mathbf{i}_{sd} = L_s \omega_s \mathbf{i}_{sd}$$

Le courant \mathbf{i}_{sq} est exprimé par :

$$\mathbf{i}_{sq} = \frac{\overbrace{\mathbf{v}_{sq} - \mathbf{e}_{sq}}^{u_{sq}}}{\mathbf{R}_s + \sigma \mathbf{L}_s s} = \frac{\mathbf{u}_{sq}}{\mathbf{R}_s + \sigma \mathbf{L}_s s}$$

Cette équation ne renseigne que le courant \mathbf{i}_{sq} peut être contrôlé par la tension \mathbf{u}_{sq} .

D'où le couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} \phi_{rd} \frac{\mathbf{u}_{sq}}{\mathbf{R}_s + \sigma \mathbf{L}_s s}$$

Selon cette équation, le couple C_{em} est contrôlé par la tension \mathbf{u}_{sq} qui est en fonction de \mathbf{v}_{sq} .

La réalisation de cet objectif nécessite les étapes suivantes:

- Etape 1 : Calcul de la référence du courant \mathbf{i}_{sq} par inversion directe de l'équation donnant le couple C_{em} selon l'équation suivante :

$$\mathbf{i}_{sq}^* = \frac{L_r}{pM} C_{em}^*$$

- Etape 2 : Asservissement du courant \mathbf{i}_{sq} en négligeant le terme de couplage \mathbf{e}_{sq} . Un régulateur PI est utilisé pour calculer la tension de référence \mathbf{u}_{sq}^* comme suit :

$$\mathbf{u}_{sq}^* = \text{PI}(\mathbf{i}_{sq}^* - \mathbf{i}_{sq})$$

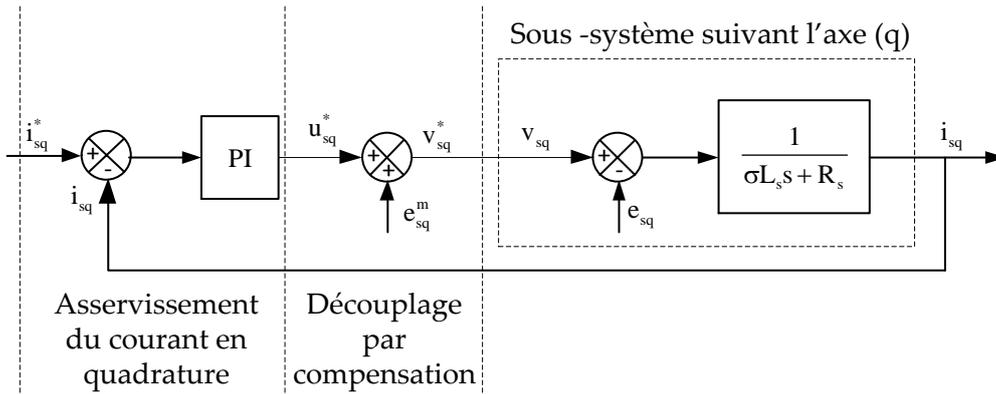
- Etape 3 : Application d'une loi de découplage permettant d'annuler l'effet du terme de couplage \mathbf{e}_{sq} et de calculer la tension de référence \mathbf{v}_{sq}^* selon la loi suivante :

$$v_{sq}^* = u_{sq}^* + e_{sq}^m$$

Avec $e_{sq}^m = L_s \omega_s i_{sd}$ est la valeur mesurée de e_{sq} .

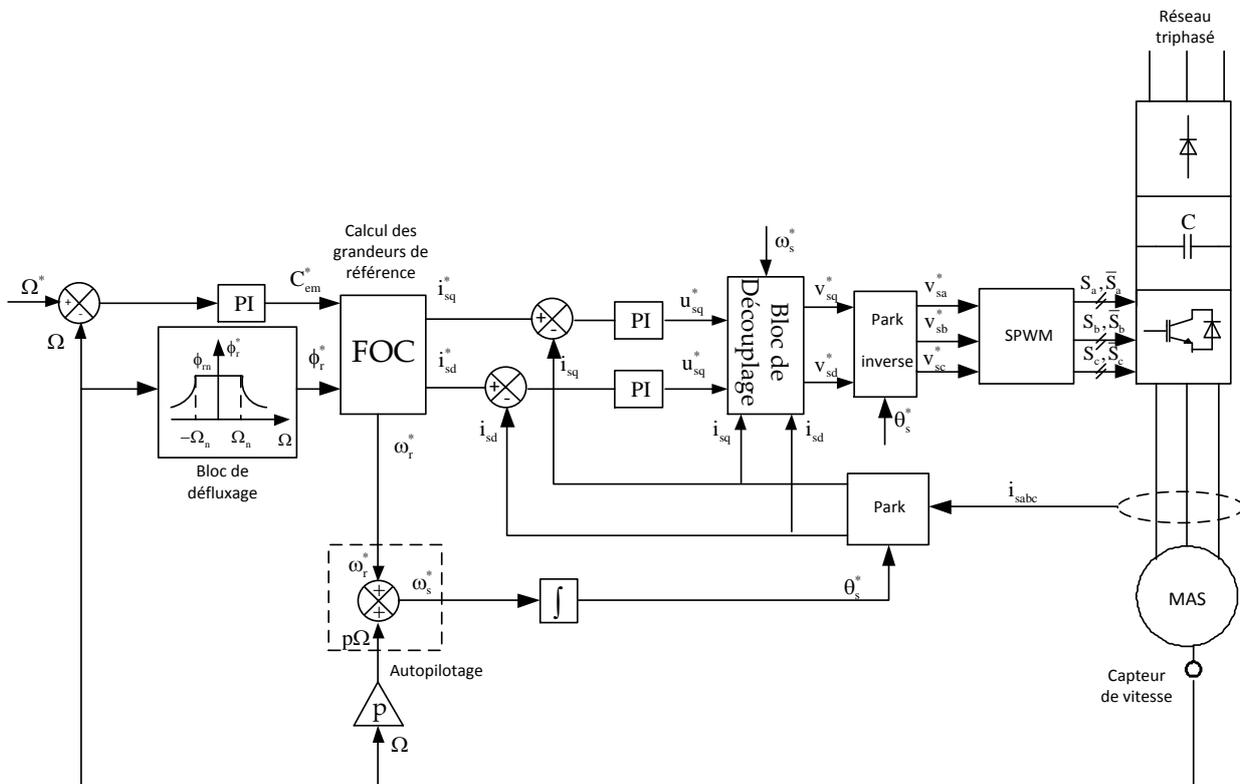
Le calcul de v_{sq}^* nécessite l'ajout du terme de couplage e_{sq}^m de signe opposée de e_{sq} de manière à séparer les boucles de régulation d'axes (d) et (q).

Le schéma bloc représentatif de l'asservissement de i_{sq} et du découplage par compensation est la suivante :



Structure de la commande

La structure de commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique d'une MAS alimentée en tension est représentée par la figure ci-dessous.



Bloc de découplage

Le bloc de découplage sert à ajouter les termes de couplage à la sortie des régulateurs pour obtenir les tensions de références nécessaires pour le réglage. Ces tensions sont données par :

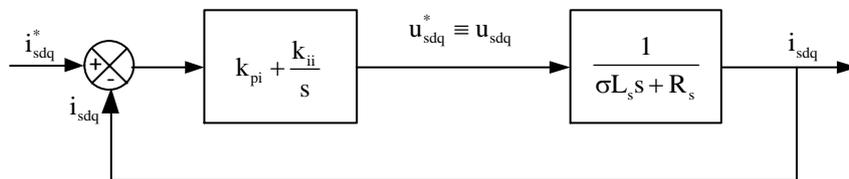
$$v_{sd}^* = u_{sd}^* + e_{sd}^m$$

$$v_{sq}^* = u_{sq}^* + e_{sq}^m$$

Cette compensation permet à la fois de découpler et linéariser le système.

Calcul des gains des régulateurs des courants

Après compensation, on obtient un schéma de réglage identique pour les deux axes (d) et (q). Le schéma de réglage des courants direct et en quadrature à l'aide de régulateurs PI est représenté sur la figure ci-dessous.



La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_i^{BF}(s) = \frac{i_{sdq}(s)}{i_{sdq}^*(s)} = \frac{\frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s(\sigma L_s s + R_s)}}{1 + \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s(\sigma L_s s + R_s)}} = \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s(\sigma L_s s + R_s) + k_{pi}s + k_{ii}} = \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{\sigma L_s s^2 + (k_{pi} + R_s)s + k_{ii}} = \frac{\frac{k_{pi}}{\sigma L_s} s + \frac{k_{ii}}{\sigma L_s}}{s^2 + \frac{k_{pi} + R_s}{\sigma L_s} s + \frac{k_{ii}}{\sigma L_s}}$$

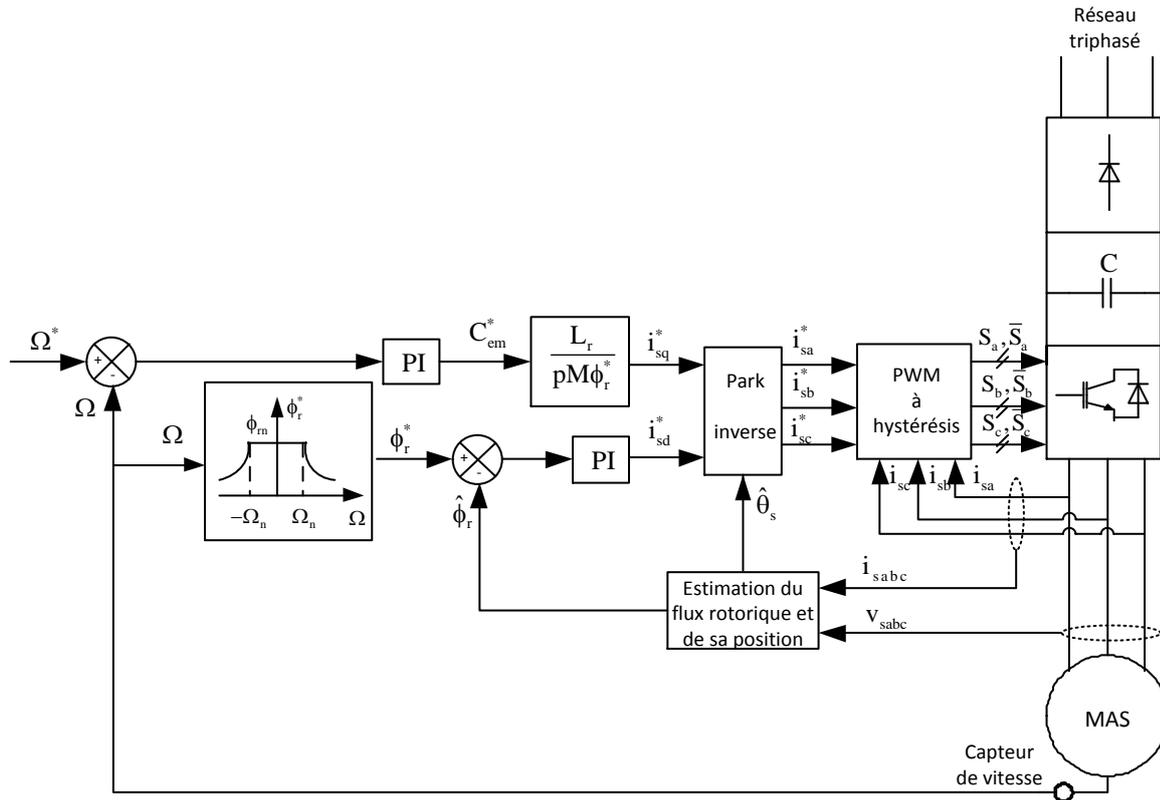
Par identification de $G_i^{BF}(s)$ avec la forme canonique d'un système de deuxième ordre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{k_{ii}}{\sigma L_s} = \omega_{ni} \\ \frac{k_{pi} + R_s}{\sigma L_s} = 2\xi_i \omega_{ni} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_{ii} = \sigma L_s \omega_{ni} \\ k_{pi} = 2\sigma L_s \xi_i \omega_{ni} - R_s \end{cases}$$

7- Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en courant

Structure de la commande

Le schéma de principe de la commande vectorielle directe d'une MAS alimentée en courant est représenté sur la figure ci-dessous.



Dans cette structure de commande deux chaînes de régulation dans chaque axe sont nécessaires:

- L'une concerne le flux et le courant direct ;
- L'autre concerne la vitesse et le courant en quadrature.

Estimateur du flux

La commande directe nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa position. L'utilisation d'un estimateur est l'une de solutions couramment adoptées. L'estimation du flux rotorique peut être réalisée dans le repère (αβ) en trois étapes :

Etape 1 : Estimation des composantes du flux statorique en fonction des courants et tensions statoriques mesurés dans le repère (αβ)

Dans un repère stationnaire, le vecteur flux statorique peut être estimé par :

$$\hat{\phi}_s = \int (\bar{v}_s - R_s \bar{i}_s) dt$$

Sachant que $\bar{\phi}_s = \phi_{s\alpha} + j\phi_{s\beta}$, $\bar{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$, $\bar{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$, le développement de cette équation dans le repère (αβ) donne :

$$\hat{\phi}_{s\alpha} = \int (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt$$

$$\hat{\phi}_{s\beta} = \int (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt$$

Les tensions $v_{s\alpha}, v_{s\beta}$ et les courants $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ sont calculés à l'aide de la transformation de Clarke comme suit :

$$v_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left(v_{sa} - \frac{1}{2} v_{sb} - \frac{1}{2} v_{sc} \right) = v_{sa}$$

$$v_{s\beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{sc} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{sb} - v_{sc})$$

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) = i_{sa}$$

$$i_{s\beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sc} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sb} - i_{sc})$$

Etape 2 : Estimation, dans le repère $(\alpha\beta)$, des composantes du flux rotorique en fonction de celles du flux statorique estimé et celles du courant statorique mesuré

Le vecteur flux rotorique peut être estimé par :

$$\hat{\phi}_r = \frac{L_r}{M} (\hat{\phi}_s - \sigma L_s \bar{i}_s)$$

Dans le repère $(\alpha\beta)$, les composantes du vecteur flux rotorique sont :

$$\hat{\phi}_{r\alpha} = \frac{L_r}{M} (\hat{\phi}_{s\alpha} - \sigma L_s i_{s\alpha})$$

$$\hat{\phi}_{r\beta} = \frac{L_r}{M} (\hat{\phi}_{s\beta} - \sigma L_s i_{s\beta})$$

Etape 3 : Calcul du module du flux et de sa position en fonction des composantes estimées du flux rotorique

Le module du vecteur flux rotorique est estimé par:

$$\hat{\phi}_r = \sqrt{\hat{\phi}_{r\alpha}^2 + \hat{\phi}_{r\beta}^2}$$

La position du vecteur flux rotorique est estimée par:

$$\hat{\theta}_s = \text{atan} \left(\frac{\hat{\phi}_{r\beta}}{\hat{\phi}_{r\alpha}} \right)$$

La vitesse de rotation du vecteur flux rotorique est estimée par:

$$\hat{\omega}_s = \frac{d\hat{\theta}_s}{dt}$$

Calcul des gains du régulateur de flux rotorique

Afin d'assurer un contrôle correcte du couple, il faut maintenir le flux rotorique à une valeur constante de référence.

Nous avons :

$$T_r \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \phi_{rd} = M i_{sd}$$

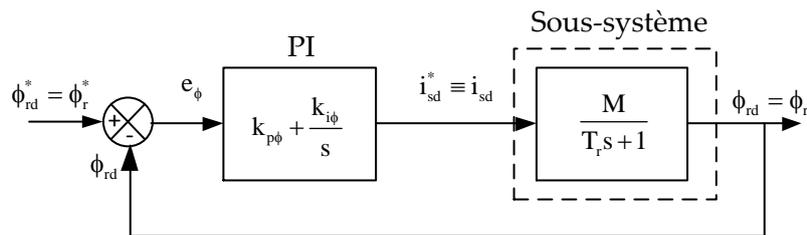
L'application de la transformée de Laplace donne :

$$(T_r s + 1)\phi_{rd}(s) = M i_{sd}(s)$$

Ce qui en résulte la fonction de transfert suivante :

$$G_\phi(s) = \frac{\phi_{rd}(s)}{i_{sd}(s)} = \frac{M}{T_r s + 1}$$

Le schéma bloc de régulation du flux rotorique est représenté sur la figure ci-dessous.



La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_\phi^{BO}(s) = \frac{\phi_{rd}(s)}{e_\phi(s)} = \frac{k_{p\phi}s + k_{i\phi}}{s} \frac{M}{T_r s + 1}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_\phi^{BF}(s) = \frac{\phi_{rd}(s)}{\phi_{rd}^*(s)} = \frac{\frac{k_{p\phi}s + k_{i\phi}}{s} \frac{M}{T_r s + 1}}{1 + \frac{k_{p\phi}s + k_{i\phi}}{s} \frac{M}{T_r s + 1}} = \frac{(k_{p\phi}s + k_{i\phi})M}{s(T_r s + 1) + (k_{p\phi}s + k_{i\phi})M} = \frac{(k_{p\phi}s + k_{i\phi})M}{T_r s^2 + (1 + Mk_{p\phi})s + Mk_{i\phi}}$$

$$G_\phi^{BF}(s) = \frac{\frac{Mk_{p\phi}}{T_r}s + \frac{Mk_{i\phi}}{T_r}}{s^2 + \frac{1 + Mk_{p\phi}}{T_r}s + \frac{Mk_{i\phi}}{T_r}}$$

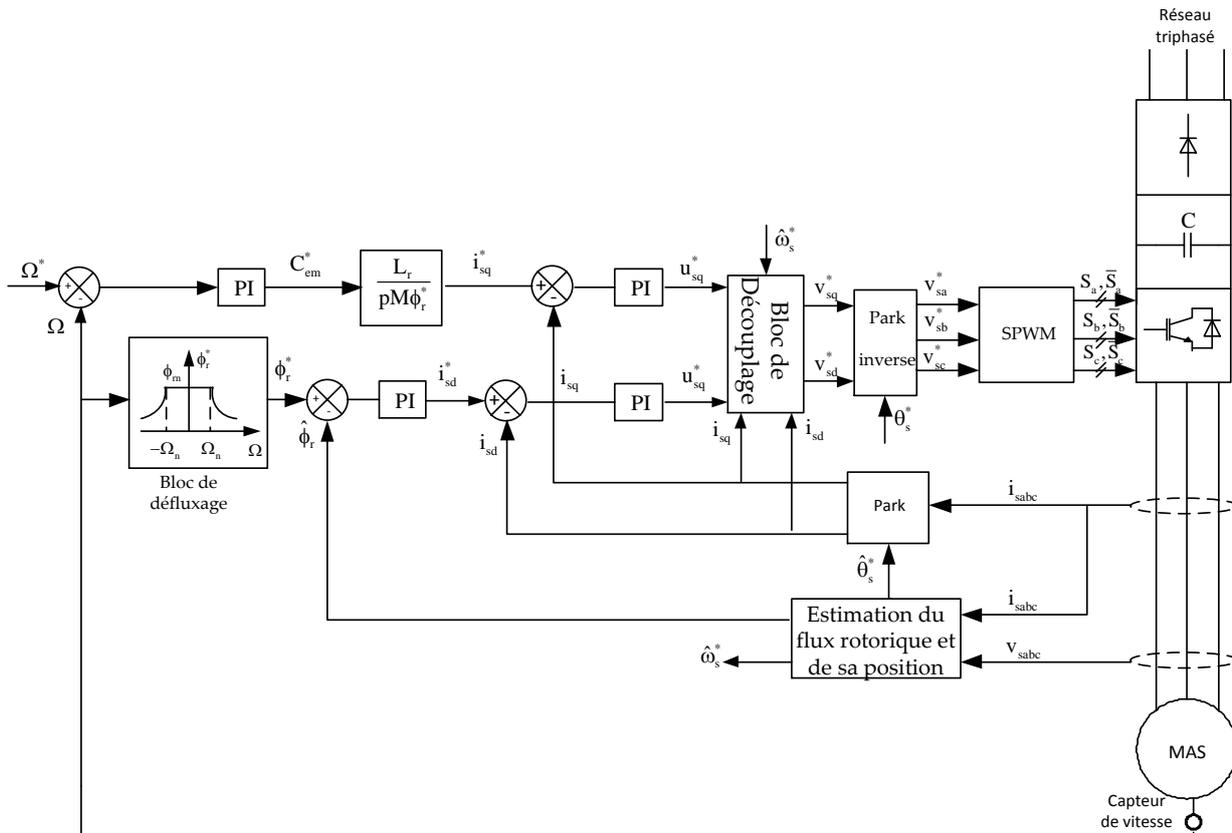
Par identification de $G_\phi^{BF}(s)$ avec la forme canonique d'un système de deuxième ordre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{Mk_{i\phi}}{T_r} = \omega_{n\phi}^2 \\ \frac{1 + Mk_{p\phi}}{T_r} = 2\xi_{\phi}\omega_{n\phi} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_{i\phi} = \frac{T_r}{M} \omega_{n\phi}^2 \\ k_{p\phi} = \frac{2T_r\xi_{\phi}\omega_{n\phi} - 1}{M} \end{cases}$$

8- Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté d'une MAS alimentée en tension

Structure de la commande

La stratégie de la commande vectorielle directe à flux rotorique orienté est présentée par le schéma fonctionnel de la figure suivante.



Tous les blocs dans ce schéma ont été déjà développés dans les sections précédentes.