



Exercice d'application

*Modélisation et Commande de la
Machine Asynchrone*

Application : Commande en couple d'une Machine Asynchrone

Une machine asynchrone est commandée en IRFO. C'est une commande en courant ; la boucle de vitesse est donc inexistante et les références de courant sont directement imposées par l'utilisateur. La transformation triphasé - diphasé utilisée est celle de Clarke.

Dans le repère dq , la référence de courant i_{ds}^* est de 8 A et elle est constante.

La valeur maximale que peut prendre la référence de courant i_{qs}^* est de 15 A.

Les caractéristiques de la machine sont :

$$R_s = 2,25 \Omega$$

$$R_r = 0,7 \Omega$$

$$L_s = 0,1232 \text{ H} \quad (\text{les inductances et la mutuelle sont cycliques})$$

$$L_r = 0,1122 \text{ H}$$

$$M = 0,1118 \text{ H}$$

Nombre de paires de pôles $p=2$

$$J = 0,038 \text{ kg m}^2$$

- 1 Quel est ce type de contrôle, sur quel vecteur flux cherche t on à placer l'axe "d" du repère tournant ?
- 2 Nous allons démontrer les équations de ce type de contrôle vectoriel.

2.1 A partir de :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases}$$

Ecrivez φ_{ds} , φ_{qs} , i_{dr} , i_{qr} en fonction du reste des variables (φ_{dr} , φ_{qr} , i_{ds} , i_{qs}). Notez que

$$\sigma L_s = L_s \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right)$$

2.2 Eliminez φ_{ds} , φ_{qs} , i_{dr} , i_{qr} des équations :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases}$$

2.3 Ce contrôle vectoriel implique $\varphi_{dr} = \varphi_r$ et $\varphi_{qr} = 0$. Montrez que l'on obtient le système d'équations :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r \\ 0 = \frac{1}{\tau_r} \varphi_r + \frac{d\varphi_r}{dt} - \frac{M}{\tau_r} i_{ds} \\ 0 = \omega_r \varphi_r - \frac{M}{\tau_r} i_{qs} \end{cases}$$

2.4 Le terme $\frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt}$ est négligé et les termes $\omega_s \sigma L_s i_{qs}$, $\omega_s \sigma L_s i_{ds}$, $\omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r$ sont appelés termes couplages. On peut les compenser. Montrez alors que la fonction de transfert des courants de la machine pour les deux axes est : $\frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \sigma \tau_s p}$

2.5 Montrez que le flux rotorique répond avec une constante de temps du 1^{er} ordre. Ecrivez sa fonction de transfert.

2.6 Trouvez comment génère t on la pulsation rotorique puis l'angle de Park.

3 Décrivez cette commande en expliquant le rôle des différentes parties.

4 Calculer les constantes de temps statorique τ_s et rotorique τ_r de la machine.

5 Combien vaut $\sigma \tau_s$, que peut on dire au sujet du temps de réponse des courants par rapport à celui du flux rotorique ?

6 Dans le repère dq (Figure 1) :

6.1 Calculer le module du vecteur flux rotorique.

6.2 Calculer le module du vecteur flux statorique (pour $i_{qs}^* = 0$ A et pour $i_{qs}^* = 15$ A).

6.3 Dessiner les vecteurs flux rotorique et statorique pour les 2 cas de figure. Dessinez également (avec une autre échelle mais sur le même schéma) le vecteur courant i_s et ses deux composantes i_{ds} , i_{qs} .

6.4 Quelle est la signification de l'angle entre les deux vecteurs flux.

7 Montrez que le couple électromagnétique s'écrit : $C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \varphi_r i_{qs}$

Quelle est la valeur maximale du couple électromagnétique que peut générer la machine à l'aide de ce contrôle et sans dépasser les limites.

8 Que vaut le courant statorique (par exemple i_{as}), valeur max et valeur efficace (pour $i_{qs}^* = 15$ A).

9 Que deviennent ces valeurs si l'on avait utilisé dans notre schéma de commande une transformation de Concordia au lieu d'une transformation de Clarke tout en gardant les mêmes valeurs pour les références i_{ds}^* et i_{qs}^* .

10 La vitesse de la machine ne dépend que du couple électromagnétique ; c'est-à-dire qu'il n'y a pas de frottements. La machine est supposée "fluxée" avec une consigne de courant $i_{ds}^* = 8$ A et le courant i_{qs}^* passe de 0 à 15 A à $t=0$. On suppose que les boucles de courant répondent instantanément.

Combien de temps met la machine pour atteindre les 500 tr/mn. Trouvez vous ce temps réaliste ?

11 Quel est le comportement de la machine si au moment où elle atteint les 500 tr/mn on met brusquement $i_{qs}^* = 0$ A.

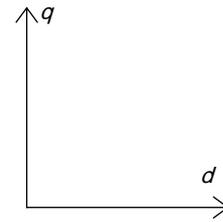


Figure 1 :
Repère dq

12 Quel est le comportement de la machine si au moment où elle atteint les 500 tr/mn on met brusquement $i_{qs}^* = -15$ A.
Est ce qu'elle atteindrait dans ce cas un régime permanent, si oui lequel, si non expliquer.

Corrigé

La machine asynchrone est commandée en IRFO. C'est une commande en courant ; la boucle de vitesse est donc inexistante et les références de courant sont directement imposées par l'utilisateur. La transformation triphasé - diphasé utilisée est celle de Clarke.

Dans le repère dq , la référence de courant i_{ds}^* est de 8 A et elle est constante.

La valeur maximale que peut prendre la référence de courant i_{qs}^* est de 15 A.

Les caractéristiques de la machine sont :

$$R_s = 2,25 \Omega$$

$$R_r = 0,7 \Omega$$

$$L_s = 0,1232 \text{ H} \quad (\text{les inductances et la mutuelle sont cycliques})$$

$$L_r = 0,1122 \text{ H}$$

$$M = 0,1118 \text{ H}$$

Nombre de paires de pôles $p=2$

$$J = 0,038 \text{ kg m}^2$$

1 C'est un contrôle vectoriel indirect par orientation du flux rotorique (Indirect Rotor Field Orientation : IRFO). On cherche à orienter l'axe d sur le vecteur flux rotorique.

2 Nous allons démontrer les équations de ce type de contrôle vectoriel.

2.1 A partir de :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases}$$

Ecrivons φ_{ds} , φ_{qs} , i_{dr} , i_{qr} en fonction du reste des variables (φ_{dr} , φ_{qr} , i_{ds} , i_{qs}).

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} \\ i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{dr} - M i_{ds}) \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{qr} - M i_{qs}) \end{cases} \quad \text{avec } \sigma L_s = L_s \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right)$$

2.2 Eliminons φ_{ds} , φ_{qs} , i_{dr} , i_{qr} des équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{array} \right. \text{ on y remplace les variables par } \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} \\ i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{dr} - M i_{ds}) \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{qr} - M i_{qs}) \end{array} \right.$$

2.3 Ce contrôle vectoriel implique $\varphi_{dr}=\varphi_r$ et $\varphi_{qr}=0$. On a alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r \\ 0 = \frac{1}{\tau_r} \varphi_r + \frac{d\varphi_r}{dt} - \frac{M}{\tau_r} i_{ds} \\ 0 = \omega_r \varphi_r - \frac{M}{\tau_r} i_{qs} \end{array} \right.$$

2.4 Le terme $\frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt}$ est négligé et les termes $\omega_s \sigma L_s i_{qs}$, $\omega_s \sigma L_s i_{ds}$, $\omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r$ sont appelés termes couplages. On peut les compenser grâce à l'introduction à la sortie des régulateurs de courant de termes calculés qui correspondent à ces termes mais de signe contraire, mais ce n'est nécessaire que si l'on veut obtenir une dynamique élevée.

En appliquant la transformation de Laplace aux équations du système, on a :

$$v_{ds} + \omega_s \sigma L_s i_{qs} = v'_{ds} = (R_s + \sigma L_s p) i_{ds}$$

$$v_{qs} - \omega_s \sigma L_s i_{ds} - \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r = v'_{qs} = (R_s + \sigma L_s p) i_{qs}$$

La fonction de transfert des courants de la machine pour les deux axes est : $\frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \sigma \tau_s p}$

2.5 Le flux rotorique répond avec une constante de temps du 1^{er} ordre.

$$0 = \frac{1}{\tau_r} \varphi_r + p \varphi_r - \frac{M}{\tau_r} i_{ds}$$

La fonction de transfert est donc : $\varphi_r = \frac{M}{1 + p \tau_r} i_{ds}$

2.6 Génération de la pulsation rotorique puis l'angle de Park : A partir de la dernière

équation $0 = \omega_r \varphi_r - \frac{M}{\tau_r} i_{qs}$ on calcule la pulsation rotorique $\omega_r = \frac{i_{qs}}{\tau_r i_{ds}}$ puis l'angle de

$$\text{Park } \theta_s = \int \omega_s dt = \int (p\Omega + \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*}) dt .$$

Généralement on utilise les références plutôt que les mesures à causes des perturbations (bruit, harmoniques MLI...) que peuvent comporter les mesures.

3 Description de la commande en expliquant le rôle des différentes parties.

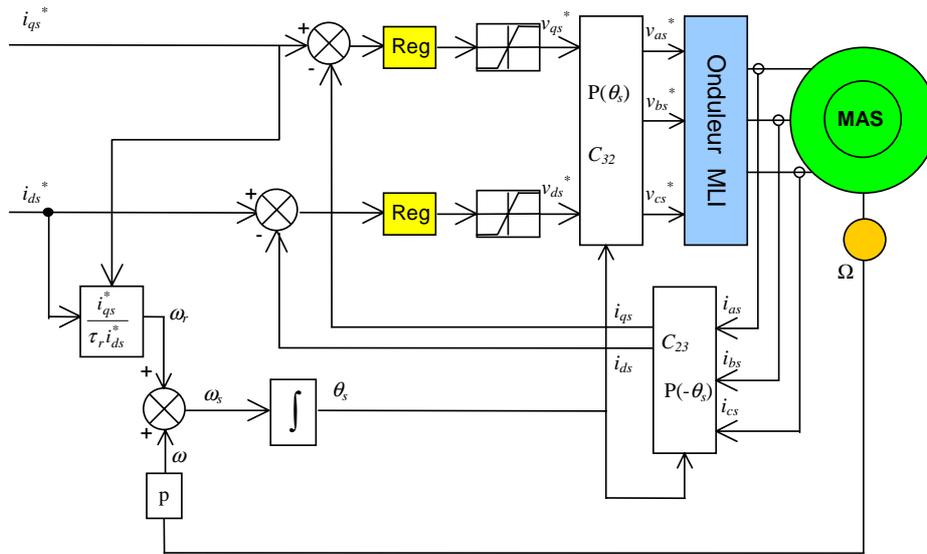


Figure 2 Schéma de régulation de courant de MAS en IRFO

Le régulateur de courant i_{qs} , le régulateur de courant i_{ds} , les transformations directes et inverses et le calcul de l'angle de la transformation de Park θ_s . C.f. devoir.

4 Calcul des constantes de temps statorique τ_s et rotorique τ_r de la machine.

$$\tau_s = \frac{L_s}{R_s} = 0,056 \text{ s} \quad \text{et} \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r} = 0,160 \text{ s}$$

5 $\sigma\tau_s = 0,005 \text{ s}$

Les courants répondent à des échelons de tension avec une constante de temps $\sigma\tau_s$ qui est beaucoup plus faible que la constante de temps avec laquelle répond le flux sur un échelon de courant i_{ds} (τ_r)

6 Dans le repère dq :

6.1 Calcul du module du vecteur flux rotorique

$$\varphi_r = \sqrt{\varphi_{dr}^2 + \varphi_{qr}^2} = \varphi_r = M i_{ds} = 0,89 \text{ Wb}$$

6.2 Calcul du module du vecteur flux statorique (pour $i_{qs}^* = 0 \text{ A}$ et pour $i_{qs}^* = 15 \text{ A}$).

$i_{qs}^* = 0 \text{ A}$	$i_{qs}^* = 15 \text{ A}$
$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2}$	$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2}$
$\varphi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} = 0,986 \text{ Wb}$	$\varphi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} = 0,986 \text{ Wb}$
$\varphi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} = 0 \text{ Wb}$	$\varphi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} = 0,177 \text{ Wb}$
$\varphi_s = 0,986 \text{ Wb}$	$\varphi_s = 1 \text{ Wb}$

6.3 Diagramme des vecteurs flux rotorique et statorique pour les 2 cas de figure. Diagramme des vecteurs courants i_s et ses deux composantes i_{ds}, i_{qs} .

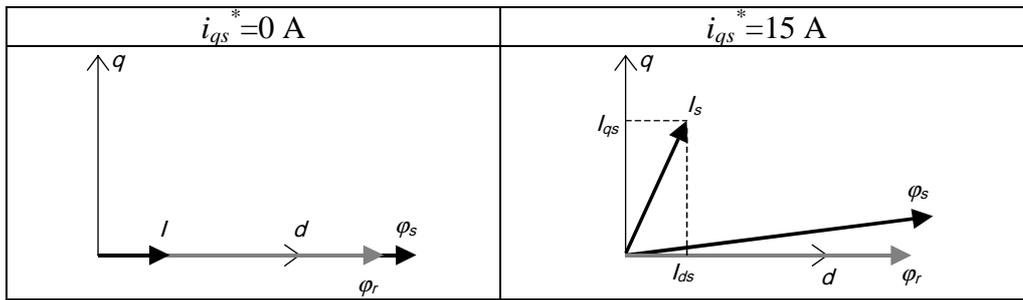


Figure 3

6.4 L'angle entre les deux vecteurs flux correspond à l'angle interne. Plus il est important, plus le couple est important.

7 Comme la transformation est celle de Clarke et non de Concordia, il apparaît un coefficient 3/2 sur la formule du couple.

La valeur maximale du couple électromagnétique que peut générer la machine à l'aide de ce contrôle et sans dépasser les limites correspond à i_{qs} maximal

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \varphi_r i_{qs} = 40,1 \text{ Nm}$$

8 Que vaut le courant statorique (par exemple i_{as}), valeur max et valeur efficace (pour $i_{qs}^* = 15 \text{ A}$).

On choisit un instant où l'axe α coïncide avec l'axe d . De sorte que :

$$i_{\alpha s} = i_{ds} = 8 \text{ A}$$

$$i_{\beta s} = i_{qs} = 15 \text{ A}$$

$$|i_{as}| = |i_s| = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} = 17 \text{ A}$$

$$I_{s \text{ eff}} = 12 \text{ A}$$

9 Dans le cas d'une transformation de Concordia tout en gardant les mêmes valeurs pour les références i_{ds}^* et i_{qs}^* .

$$|i_{as}| = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} = 13,9 \text{ A}$$

$$I_{s \text{ eff}} = 9,8 \text{ A}$$

10 La vitesse de la machine ne dépend que du couple électromagnétique ; c'est-à-dire qu'il n'y a pas de frottements. La machine est supposée "fluxée" avec une consigne de courant $i_{ds}^* = 8 \text{ A}$ et le courant i_{qs}^* passe de 0 à 15 A à $t=0$. On suppose que les boucles de courant répondent instantanément.

Pour atteindre 500 tr/mn

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e$$

$$J \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = C_e$$

$$\Delta t = J \frac{\Delta \Omega}{C_e} = 0.038 \frac{500}{40,1} \frac{\pi}{30} = 0,050 \text{ s}$$

Ce temps est tout à fait réaliste, on peut le comparer à celui donné dans l'exemple du relevé expérimental du devoir lors de l'inversion de vitesse de -600 à $+600$ tr/mn.

- 11 Si, quand elle atteint les 500 tr/mn, on met brusquement $i_{qs}^* = 0$ A, alors sa vitesse reste constante à 500 tr/mn car le couple est nul et il n'y a pas de frottement.
- 12 Si, quand elle atteint les 500 tr/mn, on met brusquement $i_{qs}^* = -15$ A, la vitesse décroît avec un couple de $-40,1$ Nm.

Elle atteindra le zéro au bout de 50 ms mais continuera sa course à accélération négative constante. Elle ne pourra pas aller à une vitesse infiniment négative à cause de la limitation en tension. En effet, le système ne peut fournir plus de tension que la valeur du bus continu. Hors, plus la vitesse est grande plus la valeur en tension (appliqué à la machine par le contrôle commande pour assurer le fonctionnement) est grande ($v_{qs} \# \omega_s \varphi_{ds}$).