Estimation temps réel de flux et de vitesse d'une machine asynchrone

Les techniques modernes de commande des machines tournantes, en particulier de type asynchrone, reposent sur le contrôle du processus de conversion électromagnétique. Ceci implique donc la connaissance du flux magnétique et de la vitesse de rotation qui caractérisent l'état énergétique interne de la machine. La mesure du flux à l'aide de capteurs s'avère très délicate et irréaliste du point de vue industriel. C'est pourquoi aujourd'hui on recourt à des reconstructeurs d'état qui permettent d'accéder à la connaissance du flux à partir de la mesure de grandeurs électriques, courants et tensions, et de la mesure de la vitesse. Un tel reconstructeur est fondé sur la résolution numérique, en temps réel, des équations décrivant le fonctionnement de la machine. Le modèle mathématique qui s'est imposé est celui de Park bien que, a priori, il ne soit pas unique.

De plus l'étude algorithmique du reconstructeur de flux montre qu'il est possible d'évaluer la vitesse de rotation à partir de la mesure des seules grandeurs électriques ; on parle alors abusivement de machines « sans capteur ».

Ce travail montre l'élaboration d'un reconstructeur de flux et de vitesse en temps réel à l'aide d'un ordinateur de type PC connecté à la machine par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition. Les programmes seront élaborés dans l'environnement Matlab/Simulink. L'aspect temps réel est assuré par la boîte à outils « RealTime Windows Target ».

I/ Matériel et logiciels

Le banc utilisé est composé d'un moteur asynchrone à cage accouplé à une génératrice à courant continu, montée en excitation séparée, elle-même connectée sur une charge résistive afin de pouvoir soumettre la MAS à différents couples résistants.

Caractéristiques de la MAS :

MAS à cage Leroy-Sommer LSMV 100 L
2 paires de pôles
Tension nominale : 400 V (Δ), 230 V (Y)
Puissance nominale : 2,2 kW
Intensité nominale : 4,7 A
Couple nominal : 14,6 N.m
Vitesse de rotation nominale : 1 440 tr/min

Une génératrice tachymétrique (ou un capteur de couple et de vitesse) est également montée sur l'arbre moteur, délivrant une tension proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur (l'afficheur du capteur couple – vitesse, possède une sortie « vitesse instantanée » délivrant une tension proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur.)

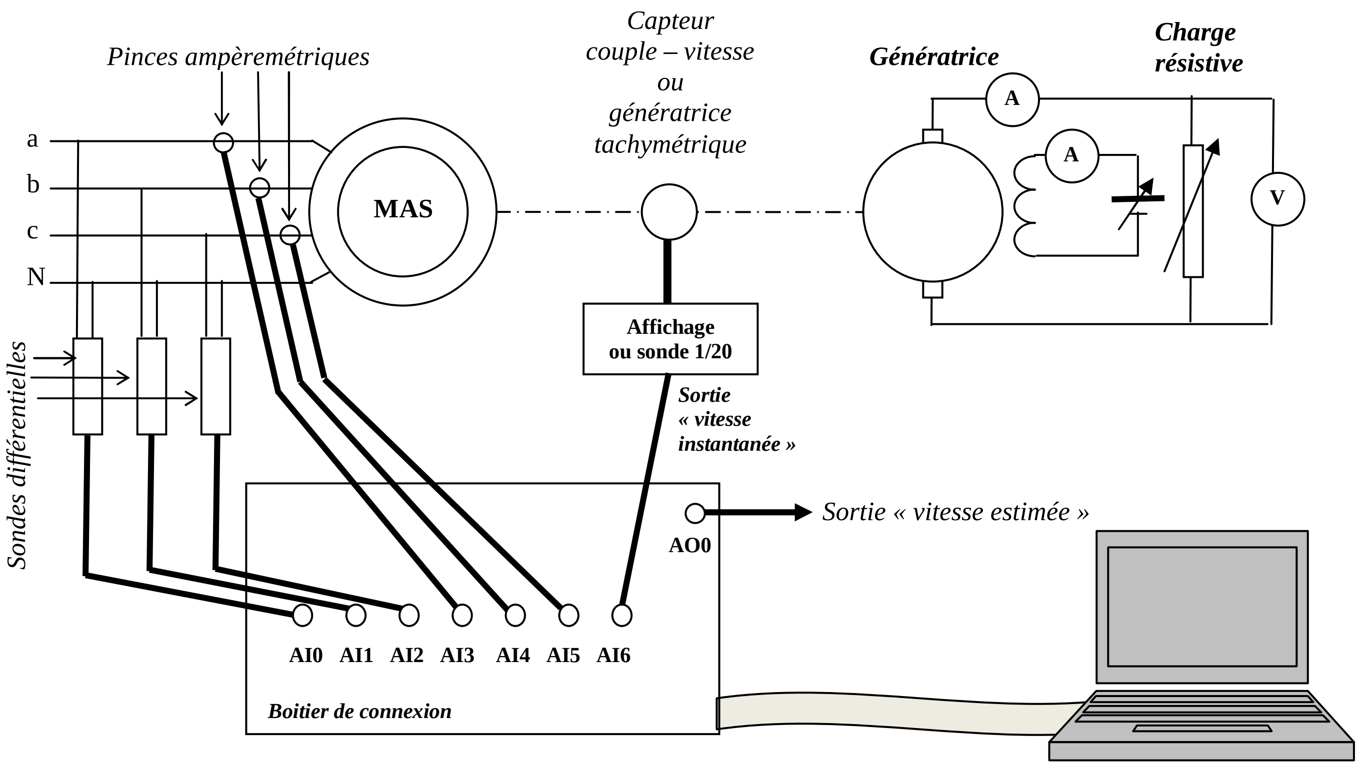


Figure 1

Le développement se fera dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Un schéma SIMULINK a déjà été bâti pour le besoin du TP (« estimflux_reel.mdl » dans le dossier de travail C:\MATLABR2010A\work\GSP3) ; ce schéma est donné en dernière page.
On pourra insérer des blocs « Scope » pour visualiser en temps réel différentes grandeurs. Pour ne pas interrompre l'évolution temps réel, on pourra visualiser la vitesse instantanée mesurée, la vitesse estimée et le flux rotorique dans des fenêtres particulières en cliquant deux fois sur le bloc « Affich » (affichage sur une durée de 10 s).

Le fichier TP.m rassemble les différentes instructions nécessaires à l'exécution du programme en temps réel, la définition de la durée d'affichage (10 s) et la fréquence d'échantillonnage.

On travaillera à une fréquence d'échantillonnage $\mathbf{F_E = 2\ kHz}$.

II/ Aspects théoriques

-1- Modèle de Park

Notations :

- s, r : indice se rapportant au stator, au rotor
- d, q : axes de la machine de Park
- α, β : axes liés au stator
- θ : position angulaire du rotor dans le repère statorique
- θ_s, θ_r : position angulaire de d dans le repère statorique, rotorique
- ω_s, ω_r : pulsation statorique, pulsation rotorique

R_s, R_r : résistance d'une phase statorique, rotorique
L_s, L_r : inductance cyclique statorique, rotorique
M_{sr} : mutuelle inductance stator – rotor
$\sigma = 1 - \frac{{M_{sr}}^2}{L_s.L_r}$: coefficient de dispersion
$\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$; $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$: constante de temps statorique, rotorique

Enfin, on posera : $R_{sr} = R_s + \frac{{M_{sr}}^2}{\tau_r.L_r} = R_s + R_r.\frac{{M_{sr}}^2}{{L_r}^2}$

La transformation de Park, appliquée au stator et au rotor, permet d'écrire les équations dans un même repère (d, q) en imposant $\theta_s = \theta_r + \theta$.

Les équations électriques statoriques s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = R_s.\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(1)}$$

Et les équations rotoriques :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_s.\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2)}$$

Les flux statoriques sont liés aux courants par :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix} = L_s.\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + M_{sr}.\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3)}$$

Et les flux rotoriques par :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = M_{sr}.\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + L_r.\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4)}$$

-2- Estimation du flux rotorique par reconstruction d'état

Considérons le vecteur d'état du mode électromagnétique suivant :

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix}$$

Les variables d'état i_{ds} et i_{qs} étant aussi mesurables, on peut écrire une équation d'état d'ordre réduit en reportant **(4)** dans **(2)** :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_r} & \frac{d\theta_r}{dt} \\ -\frac{d\theta_r}{dt} & -\frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \frac{M_{sr}}{\tau_r}.\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(5)}$$

L'équation d'observation est obtenue en reportant **(4)** dans **(3)** puis dans **(1)** :

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{sr} & \sigma.L_s.\dfrac{d\theta_s}{dt} \\ \sigma.L_s.\dfrac{d\theta_s}{dt} & R_{sr} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \sigma.L_s.\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \frac{M_{sr}}{L_r} . \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_r} & -\dfrac{d\theta}{dt} \\ \dfrac{d\theta}{dt} & -\dfrac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(6)}$$

Plaçons-nous dans un repère lié au stator : $\dfrac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\dfrac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m$

Les axes d et q sont notés dans ce cas particulier respectivement α et β. L'équation d'état s'écrit :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_r} & -\omega_m \\ \omega_m & -\dfrac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{M_{sr}}{\tau_r} . \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(7)}$$

Et l'équation d'observation :

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{bmatrix} - R_{sr} . \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} - \sigma.L_s.\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{M_{sr}}{L_r} . \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_r} & -\omega_m \\ \omega_m & -\dfrac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(8)}$$

-3- Estimation de la vitesse

L'axe d est maintenant aligné avec le vecteur représentatif du flux rotorique ; le repère (d, q) tourne donc à la vitesse du champ tournant. Ceci se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \;;\; \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad \text{et} \quad \Psi_{qr} = 0$$

En considérant le vecteur $\overrightarrow{\Psi_r}$ dans le repère (α, β), il vient immédiatement :

$$\theta_S = \arctan\left(\frac{\Psi_{\beta r}}{\Psi_{\alpha r}}\right)$$

Les courants i_{ds} et i_{qs} sont obtenus à partir de $i_{\alpha s}$ et $i_{\beta s}$ par la matrice de rotation d'angle θ_s :

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \sin\theta_s \\ -\sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}$$

De plus, on obtient par dérivation une valeur estimée de la pulsation statorique $\widehat{\omega_s}$.
D'autre part, la deuxième relation de l'équation d'état s'écrit :

$$0 = -\omega_r.\Psi_{dr} + \frac{M_{sr}}{\tau_r}.i_{qs}$$

D'où on déduira la valeur de $\widehat{\omega_r}$:

$$\widehat{\omega_r} = \frac{M_{sr}}{\tau_r.\widehat{\Psi_{dr}}}.i_{qs} \qquad \textbf{(9)}$$

Cette relation fournit la valeur estimée $\widehat{\omega_r}$ de la pulsation rotorique. La valeur estimée de la vitesse de rotation s'écrit donc :

$$\widehat{\omega_m} = \widehat{\omega_s} - \widehat{\omega_r} \qquad \textbf{(10)}$$

Cet estimateur est représenté ci-dessous :

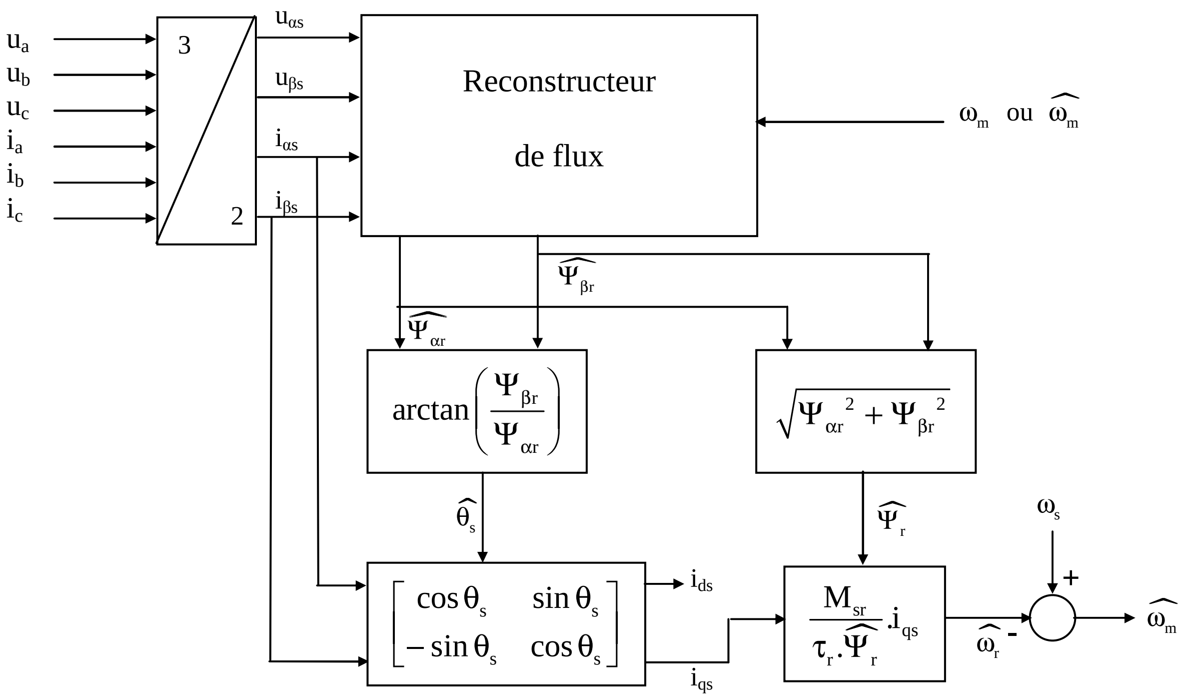


Figure 2

III/ Travail à réaliser

-1- Prise en main du matériel et du logiciel

Réaliser le montage électrique conformément à la figure 1.

Avant de mettre ce montage sous tension, lancer le fichier TP.m, ou ouvrir le modèle estimflux_reel.mdl (ces 2 fichiers se trouvent dans le dossier C:\MATLABR2010A\work\GSP3)

On trouve sur ce schéma :

- Les 7 grandeurs à mesurer (« Analog Input » 1 à 7, correspondant aux entrées AI0 à AI6)
  - → Les 3 premières mesurent les 3 tensions statoriques, après application d'un gain, fonction des sondes différentielles utilisées. **Vérifier la concordance gain-sensibilité des sondes.**
  - → Les 3 suivantes mesurent les courants statoriques, après application d'un gain, fonction des pinces ampèremétriques utilisées. **Vérifier la concordance gain-sensibilité des pinces ampèremétriques.**
  - → La dernière correspond à la mesure de la vitesse de rotation. Là encore, un gain permet de retrouver la vitesse de rotation (en tr/min).

- Les 3 grandeurs triphasées mesurées (tension ou courant) sont appliquées à une transformation de Clark ($\theta = 0$), pour fournir les vecteurs $U_s = \begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{bmatrix}$ ou $I_s = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}$ dans le repère statorique

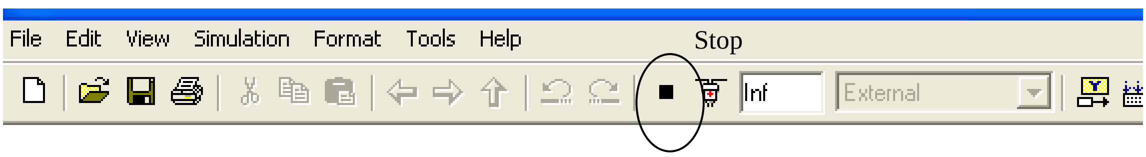
- Un bloc « Embedded MATLAB function » **estimflux** : ce bloc prend en entrée le vecteur U_s, le vecteur I_s, sa dérivée estimée par $\frac{dI_s}{dt} \approx \frac{I_{sn} - I_{s(n-1)}}{T_E}$ et la vitesse de rotation ω_m (suivant la position des switchs : vitesse de synchronisme, ou vitesse mesurée ou vitesse estimée). L'écriture de ce bloc, qui fournira le vecteur flux Ψ_r (dans le repère statorique), sera à faire dans le cadre de ce TP.

- Un deuxième bloc comparable, **estimvit** : conformément à la figure 2, ce bloc qui prend en entrée le vecteur Ψ_r dans le repère statorique, fournit la vitesse estimée $\widehat{\omega_m}$. L'écriture de ce bloc fait également partie du travail à réaliser.

Dans un premier temps, les deux blocs « estimflux » et « estimvit » sont des programmes pratiquement vides[1], qu'il faudra compléter.

Pour faire une modification du schéma (ajouter un bloc « Scope », modifier l'ordre des filtres numériques, modifier les programmes estimflux et estimvit) il faut :

1. Arrêter la « simulation »
2. Faire la modification
3. Relancer le fichier TP.m



Faire vérifier le montage, et noter les caractéristiques de la génératrice à courant continu (en particulier : valeur maximale du courant d'excitation)

Insérer dans le schéma 2 blocs Scope, puis démarrer progressivement le moteur asynchrone.

[1] Seules les grandeurs caractéristiques de la MAS sont définies, ainsi que les sorties, mises à 0

Vérifier qu'on a bien un système de tensions triphasées direct. Dans le cas contraire, agir en conséquence.

Vérifier également qu'on a bien un système de courants triphasés direct, en retard de phase sur la tension (sens des pinces ampèremétriques).

Dernière étape (si nécessaire) : étalonnage de la mesure de vitesse ; mesurer à l'aide d'un voltmètre la valeur de la tension délivrée par le capteur de vitesse, noter la vitesse de rotation affichée, et en déduire le gain à introduire dans le schéma.

-2- Reconstructeur de flux avec capteur de vitesse

On cherchera, dans cette partie, à estimer en temps réel la valeur du flux rotorique Ψ_{dq} de la machine lorsqu'on la soumet à des variations de charge.

2.1. Écrire les équations de la machine (7) et (8) sous la forme :

$$\underline{\dot{X}} = \mathbf{A}.\underline{X} + \mathbf{B}.\underline{U} \qquad\qquad \underline{Y} = \mathbf{C}.\underline{X}$$

En explicitant les vecteurs $\underline{X}$, $\underline{Y}$ et $\underline{U}$ et les matrices **A**, **B** et **C**

2.2. On souhaite faire un reconstructeur d'état conformément au schéma générique de la figure 3.
Ecrire les équations permettant de calculer l'estimation

$\widehat{\underline{\dot{\Psi}_r}}$ de $\underline{\dot{\Psi}_r}$

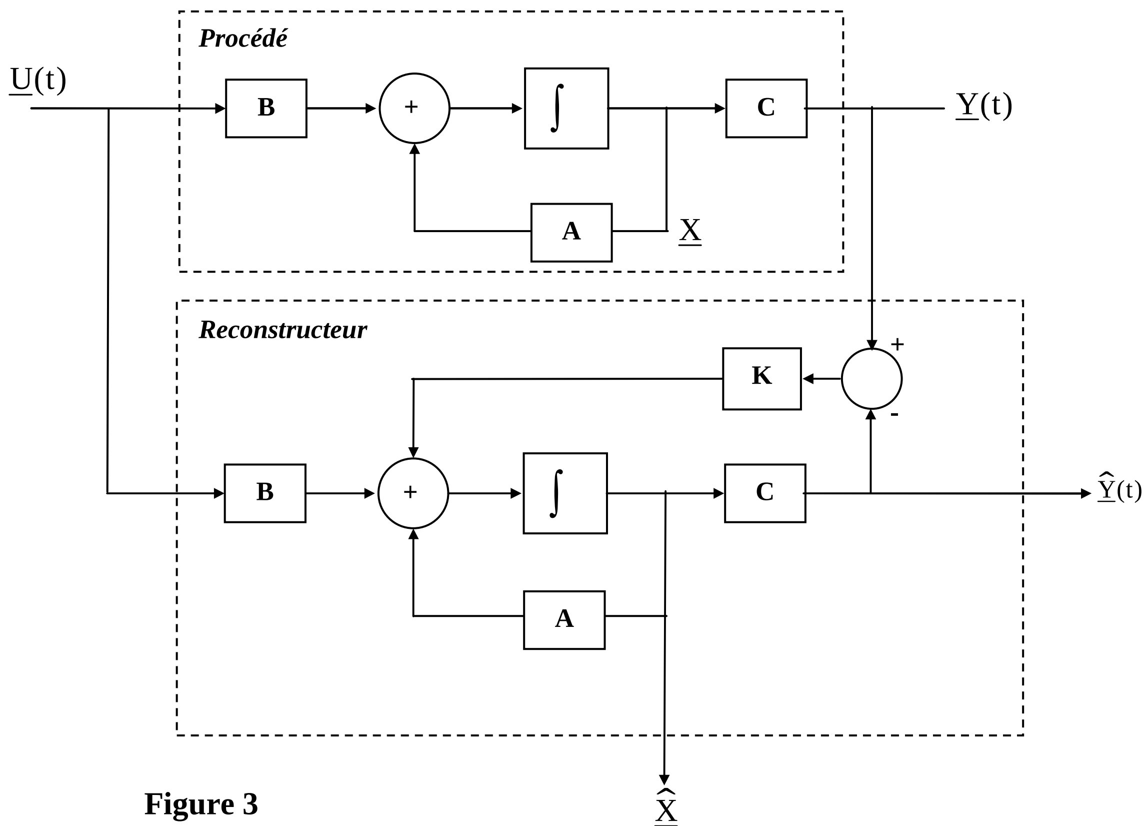


Figure 3

2.3. Compléter le bloc estimflux en langage Matlab : on pourra travailler directement en vectoriel. Le programme pré-établi montre comment on extrait les grandeurs essentielles (tensions Us, courants Is et pulsation ω_m) du vecteur u d'entrée. On affectera au vecteur y de sortie le résultat du calcul de l'estimation du vecteur de flux $\underline{\Psi}_r$.

On notera la présence de la variable X correspondant au vecteur $\underline{\Psi}_r$ à reconstruire. Cette variable est déclarée **persistent** de manière à retrouver sa valeur lors d'un prochain appel. Cela sera nécessaire lors de l'évolution entre deux instants d'échantillonnage (T_E = 0,5 *ms* ici).

On réalisera dans le programme, le calcul de la grandeur $\underline{\dot{\Psi}}_r$ puis, on en déduira la valeur de $\underline{\Psi}_r$ par la relation :

$$\underline{\Psi}_r\left(t+T_E\right) \approx \underline{\Psi}_r\left(t\right) + T_E.\underline{\dot{\Psi}}_r\left(t\right)$$

La matrice **K** sera choisie telle que : $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_1 & -k_2 \\ k_2 & k_1 \end{pmatrix}$.

Choisir judicieusement les constantes k_1 et k_2 (voir polycopié de cours) compte tenu des paramètres caractéristiques de la machine (donnés à la fin).

2.4. Lancer le programme, démarrer la machine et vérifier l'évolution du flux avec une variation de charge correspondant au passage machine à vide $\to$ charge nominale ($I_S \approx 4{,}5$ A) et inversement.(en cliquant 2 fois sur le bloc « Affichage »)

-3- Reconstruction de la vitesse

La reconstruction de la vitesse peut être utile pour se passer de capteur de vitesse (typiquement, génératrice tachymétrique). Dans notre cas, elle nous servira à vérifier que l'estimation du flux est correcte.

3.1. Ecrire les équations donnant la vitesse estimée de la machine à partir de la connaissance des courants $i_{\alpha s}$ et $i_{\beta s}$ (c'est-à-dire du vecteur I_s obtenu dans le repère statorique) et du vecteur de flux Ψ_r (on se servira du schéma donné en figure 2).

3.2. Ouvrir et compléter le bloc Simulink **estimvit** de sorte qu'on ait en sortie l'estimation $\widehat{\omega_m}$ de la vitesse ω_m.

3.3. Démarrer la machine et vérifier l'évolution de la vitesse pour une variation de charge (passage machine à vide $\to$ charge nominale ($I_S \approx 4{,}5$ A) et inversement)

3.4. Le reconstructeur de vitesse ainsi créé s'appuie sur la connaissance du flux dont l'estimation nécessite la connaissance de la vitesse.

Afin d'éviter d'utiliser ce paramètre supposé inconnu, on pourra actionner les commutateurs « Manual Switch » permettant d'injecter dans le reconstructeur de flux non plus la vitesse mesurée, mais une valeur constante correspondant à la vitesse de synchronisme de la machine ou la vitesse estimée.
Refaire les divers essais réalisés précédemment, avec la vitesse de synchronisme, ou avec la vitesse estimée.

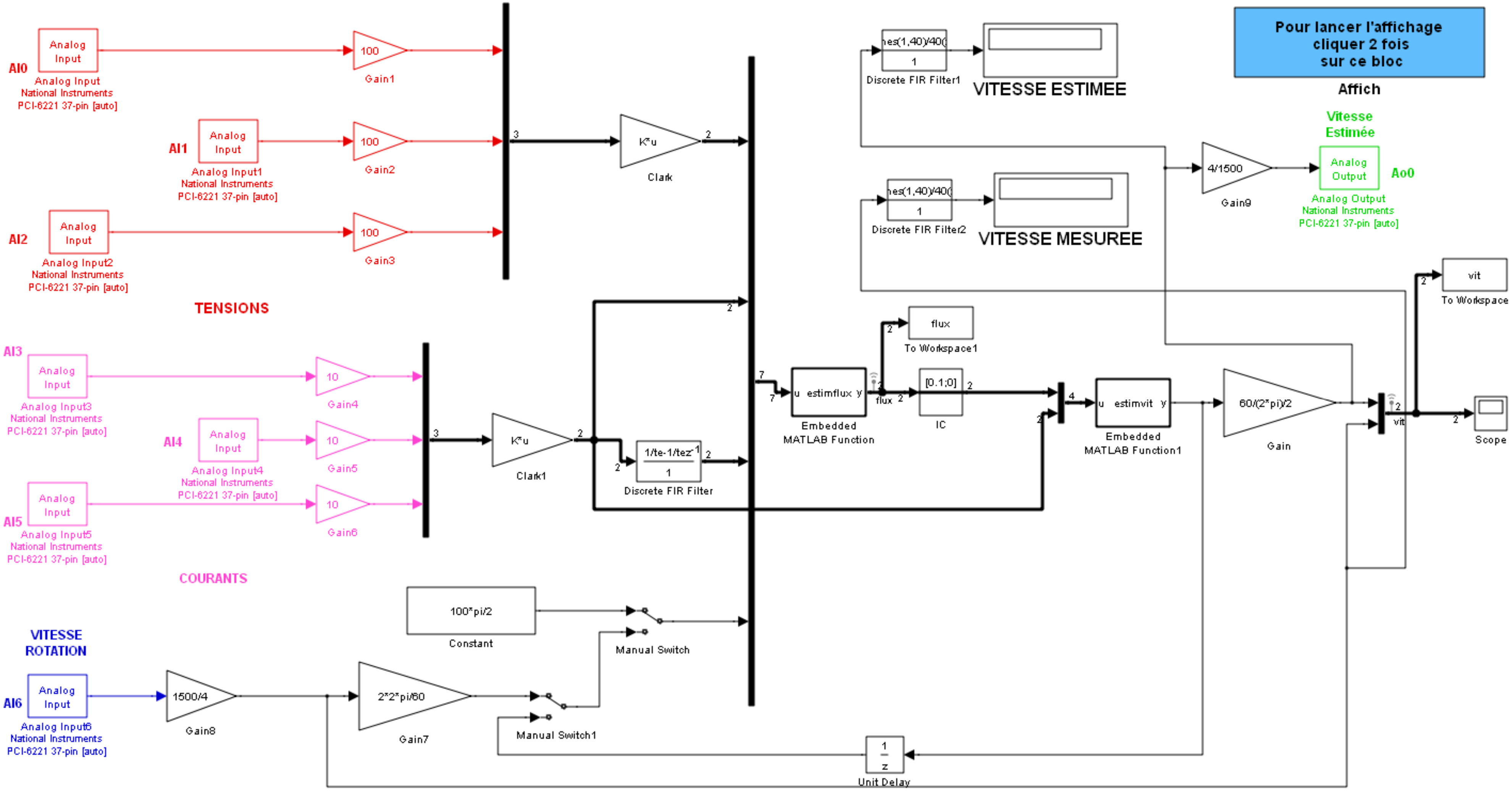
3.5. Comparer et interpréter les résultats obtenus.

Annexe : paramètres de la machine asynchrone LSMV 100 L

$R_s = 3{,}5\,\Omega$ $R_r = 0{,}4\,\Omega$

$L_s = 0{,}3\,H$ $L_r = 0{,}068\,H$

$M_{sr} = 0{,}12\,H$ $p = 2$ (nombre de paires de pôles)



AI0
Analog Input
Analog Input
National Instruments
PCI-6221 37-pin [auto]
100
Gain1
AI1
Analog Input1
Gain2
AI2
Analog Input2
Gain3
TENSIONS
K*u
Clark
AI3
Analog Input3
10
Gain4
AI4
Analog Input4
Gain5
AI5
Analog Input5
Gain6
Clark1
COURANTS
1/te-1/tez^-1
Discrete FIR Filter
VITESSE
ROTATION
AI6
Analog Input6
1500/4
Gain8
2*2*pi/60
Gain7
100*pi/2
Constant
Manual Switch
Manual Switch1
1
z
Unit Delay
estimflux
Embedded
MATLAB Function
flux
To Workspace1
[0.1;0]
IC
estimvit
Embedded
MATLAB Function1
60/(2*pi)/2
Gain
vit
To Workspace
Scope
Discrete FIR Filter1
VITESSE ESTIMEE
Discrete FIR Filter2
VITESSE MESUREE
Pour lancer l'affichage
cliquer 2 fois
sur ce bloc
Affich
Vitesse
Estimée
4/1500
Gain9
Analog
Output
Ao0
Analog Output