

# MISE EN ŒUVRE D'UNE IDENTIFICATION DE L'ÉTAT ROTORIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE PAR FILTRE DE KALMAN

A. GUERGAZI, A. DEBILOU

Département d'Electrotechnique, Département d'Electronique  
 Université Mohamed Khider, Biskra, BP 145, 07000 Biskra, Algérie.

## RESUME

On se propose dans cet article de mettre en œuvre une identification pratique des grandeurs non accessibles à la mesure d'une machine asynchrone à cage. Nous introduisons le filtre de *KALMAN* comme outil permettant l'estimation et la prédiction de l'état rotorique de la machine, à partir de grandeurs mesurables.

Un dispositif expérimental sera conçu autour d'un IBM-PC pilote, comprenant une carte d'acquisition, une série de capteurs et un module électronique de filtrage et d'adaptation des signaux.

La technique en question permet une identification sur site et en fonctionnement nominal. Les grandeurs mesurées sont les tensions d'alimentation, les courants statoriques et la vitesse de rotation. La mise en œuvre pratique du filtre de *KALMAN* sur des données expérimentales, aboutie à des résultats satisfaisants, comparés à ceux obtenus par simulation sous Matlab/Simulink.

## 1. INTRODUCTION

La machine asynchrone associée à une commande vectorielle, permet de remplir les mêmes objectifs qu'une machine à courant continu, grâce aux performances des commandes utilisées par les variateurs modernes de vitesse. Il a été établi que la commande vectorielle permet l'obtention d'excellentes performances dynamiques. Néanmoins, ces performances présentent une nette dégradation due à la présence de bruits de mesures et à la variation des paramètres et des grandeurs mises en jeu avec la température. Par suite, la connaissance relativement parfaite des grandeurs et des paramètres s'impose.

Il convient donc de concevoir des méthodes d'identification dans ce sens. De nombreux travaux [1][2] de plusieurs chercheurs ont été initiés dans l'identification et ont donné des résultats satisfaisants et prometteurs.

L'objectif de ce travail est d'introduire le filtre *KALMAN* comme outil d'estimation pratique de l'état rotorique de la machine asynchrone.

## 2. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Le modèle de la machine est établi en considérant des hypothèses simplificatrices, à savoir que la machine est symétrique, fonctionne en régime non saturé et que les différentes pertes sont négligeables [3]. Le régime dynamique de fonctionnement d'une machine asynchrone est décrit par les équations

électromécaniques écrites dans le repère de *PARK* [3][4] comme l'indique la figure.1, où toutes les grandeurs étant ramenées à un référentiel statorique. Le choix judicieux du repère, permet une simplification remarquable des expressions des équations différentielles.

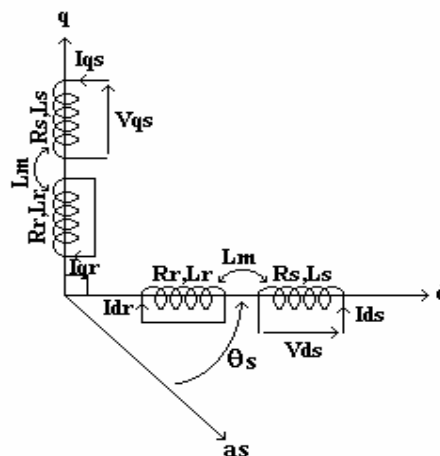


Figure.1: Représentation physique de la transformation de PARK pour une machine asynchrone.

### 2.1 Modèle continu

#### 2.1.1 Equations Electriques

Dans un référentiel lié au stator, le modèle d'état de la machine asynchrone est défini par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
V_{ds} &= (R_s + pL_s)i_{ds} + pL_m i_{dr} \\
V_{qs} &= (R_s + pL_s)i_{qs} + pL_m i_{qr} \\
0 &= pL_m i_{ds} + \omega_r L_m i_{qs} + (R_r + pL_r)i_{dr} + \omega_r L_m i_{qr} \\
0 &= -\omega_r L_m i_{ds} + pL_m i_{qs} - \omega_r L_m i_{dr} + (R_r + pL_r)i_{qr}
\end{aligned} \quad (1)$$

La notation matricielle du modèle d'état est donnée par :

$$pX(t) = A(t)X(t) + Bu(t) \quad (2)$$

Le développement des calculs conduit à :

$$\begin{bmatrix} pi_{ds} \\ pi_{qs} \\ pi_{dr} \\ pi_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & L_m^2 \omega_r & L_m R_r & L_m L_r \omega_r \\ L_m^2 \omega_r & -R_s L_r & -L_m L_r \omega_r & L_m R_r \\ L_m R_s & -L_m L_s \omega_r & -R_r L_s & -L_s L_r \omega_r \\ L_m L_s \omega_r & L_m R_s & L_s L_r \omega_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

Selon la définition du modèle de *PARK*, le vecteur d'entrée  $u$  est constitué des tensions statoriques  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ . Nous avons choisi pour le vecteur d'état  $X$ , les deux courants statoriques  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  et les deux courants rotoriques non accessibles à la mesure  $i_{dr}$ ,  $i_{qr}$ .

### 2.1.2 Equations Mécaniques

Les équations mécaniques liants la vitesse au couple sont données par :

$$\begin{cases} C_e = \frac{3}{2} np L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \Omega_r = C_e - C_r \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 Modèle discret

La discrétisation de l'équation (2) est obtenue en établissant l'approximation d'*EULER* entre les variables aux instants  $k$  et  $(k+1)$ , avec un temps d'échantillonnage  $T_e$ .

Par conséquent :

$$\dot{X}(k) = \frac{X(k+1) - X(k)}{T_e} \quad (5)$$

Les équations (2) et (5) conduisent au modèle discret suivant:

$$X(k+1) = [I + AT_e]X(k) + BT_e u(k) \quad (6)$$

Le modèle numérique de la machine asynchrone, est alors représenté par le système d'équations:

$$\begin{cases} X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)u(k) \\ Y(k) = C(k)X(k) \end{cases} \quad (7)$$

où,

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s}{\sigma L_s} T_e & \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r} T_e \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} T_e & \frac{L_m}{\sigma L_s} T_e \omega_r \\ -\frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r} T_e \omega_r & 1 - \frac{R_s}{\sigma L_s} T_e & -\frac{L_m}{\sigma L_s} T_e \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} T_e \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} T_e & -\frac{L_m}{\sigma L_r} T_e \omega_r & 1 - \frac{R_r}{\sigma L_r} T_e & -\frac{1}{\sigma} T_e \omega_r \\ \frac{L_m}{\sigma L_r} T_e \omega_r & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} T_e & \frac{1}{\sigma} T_e \omega_r & -\frac{R_r}{\sigma L_r} T_e \end{bmatrix}$$

$$G(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} T_e & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} T_e \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} T_e & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} T_e \end{bmatrix}$$

$$C(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 2.3 Modèle stochastique

La machine asynchrone ne peut pas être représentée parfaitement par un modèle déterministe, par conséquent il est nécessaire d'introduire les différentes sources d'incertitudes qui sont modélisées par des bruits dans le modèle linéaire :

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)u(k) + W(k) \quad (8)$$

$$Y(k) = C(k)X(k) + V(k)$$

$W(k)$  définit les bruits d'état, bruits d'erreurs de modélisation sur les fonctions  $F$  et  $G$ .  $V(k)$  définit le bruit d'observation, bruits de mesure et erreurs de modélisation sur la fonction  $C$ . Ces bruits sont respectivement caractérisés par leurs matrices de covariance  $Q$  et  $R$  définies comme suit :

$$\begin{aligned} E[W_k W_i^T] &= Q * \delta_{ki} \\ E[V_k V_i^T] &= R * \delta_{ki} \end{aligned} \quad (9)$$

## 3. FILTRE DE KALMAN [5][6]

Le filtre de *KALMAN* est un observateur d'état, perturbé par différentes sources de bruits. Il est adapté au calcul en temps réel. La mise en œuvre de ce filtre nécessite la connaissance précise des variances des bruits. La connaissance de la valeur initiale des vecteurs d'état et de la matrice de covariance d'erreur sont également obligatoires. La figure.2 illustre la configuration de la structure de filtre de *KALMAN*.

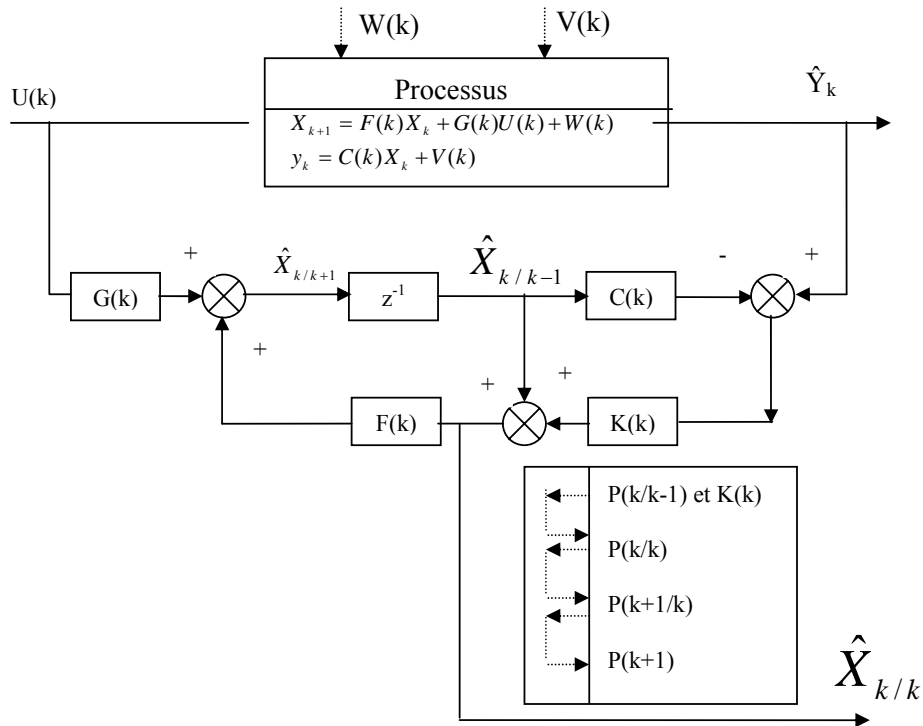


Figure 2 : Structure du filtre de KALMAN.

Les équations de l'algorithme du filtre de KALMAN sont :

(1). Equation du gain :

$$K(k) = P(k/k) - C^T(k)[C(k)P(k/k-1)C^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (10)$$

(2). Equation d'estimation :

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + K(k)[Y(k) - C(k)\hat{X}(k/k-1)] \quad (11)$$

(3). Variance a posteriori :

$$P(k/k) = [1 - K(k)C(k)]P(k/k-1) \quad (12)$$

(4). Variance a priori :

$$P(k+1/k) = F(k)P(k/k)F^T(k) + Q(k) \quad (13)$$

#### 4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 3. Il comprend :

- Un moteur asynchrone à cage, de puissance égale à 3 kW.
- Trois transformateurs utilisés pour atténuer les tensions d'alimentation de la machine et pour isolation.
- Trois capteurs de courants (transformateur d'intensité) fermés par des résistances de très faibles valeurs proportionnelles aux courants absorbés par la machine.

- Une carte d'acquisition.

- Un ordinateur personnel IBM-PC pilote.

L'ensemble des signaux (tensions, courants), ainsi que le signal issu de la génératrice tachymétrique, constituent les sept entrées analogiques de la carte électronique d'adaptation [7].

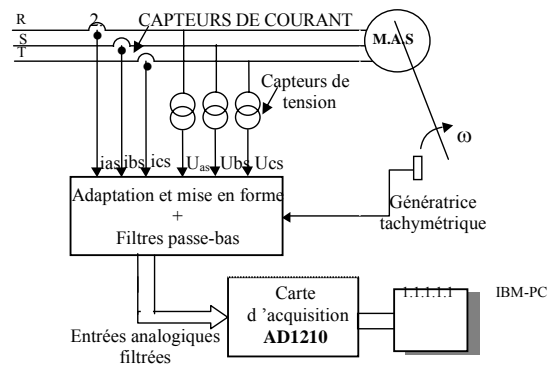


Figure 3 : Schéma bloc de la chaîne expérimentale.

Cette carte a pour rôles principaux l'adaptation, la mise en forme et le filtrage en passe bas des différents signaux pour une meilleure acquisition.

La carte d'acquisition utilisée est (AD1210 de BRAIN BOXES) caractérisée par :

- Huit entrées analogiques sur une plage de tension paramétrable.

- Une résolution sur 12 bits.
- Une fréquence d'échantillonnage programmable allant jusqu'à 100Khz
- Un gain en tension programmable de 1-10-100 et 1000.

Notons que la carte d'acquisition est insérée sur l'un des slots ISA (Industriel Slot Adapter) de l'unité centrale.

### 5. DESCRIPTION DE LA PROCEDURE D'IDENTIFICATION

La figure 4 montre la procédure pratique de l'identification de l'état rotorique de la machine asynchrone. Nous distinguons, un fichier d'acquisition pour le stockage temporel des données et deux fichiers de fonctions, le premier simule le modèle du moteur "modèle" et le deuxième pour la gestion de tout le processus d'identification "id-modèle".

Les étapes de la procédure pratique d'identification se résument ainsi :

- Détermination des paramètres électriques et mécaniques ( $R_r, L_s, L_r, L_m, J, f$ ) à partir des données du constructeur mentionnées sur la plaque signalétique. La résistance  $R_s$  est considérés connue par une mesure directe [8].

- Chargement des tensions, des courants et de la vitesse mesurés depuis les fichiers d'acquisitions.
- Traitement des mesures pour la compensation des composantes continues du aux offset des composants électroniques.
- Transformation de *PARK* pour les tensions ( $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ ) et des courants ( $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ ) en composantes ( $V_d, V_q$ ) et ( $i_d, i_q$ ) selon le repère d-q dans un référentiel lié au stator.
- Initialisation : La résolution des équations d'état discrètes (7) nécessite la connaissance de l'état à l'instant initial. Dans notre cas, seul les courants initiaux sont connus ( $i_{ds0}$  et  $i_{qs0}$ ). Il reste donc à inclure les courants rotoriques initiaux,  $i_{dr0}$  et  $i_{qr0}$ , dans le vecteur de paramètres à estimer.
- Exécution des équations d'identification. Quand l'algorithme converge (le nombre d'itérations maximales est atteint), la dernière partie du fichier de commandes "id-modèle", affiche l'évolution des grandeurs estimées .

Le fichier de simulation "modèle", permet d'identifier les courbes théoriques des courants rotoriques à partir des équations. Ces courbes seront comparées aux résultats obtenus par application du filtre de *KALMAN*. V.

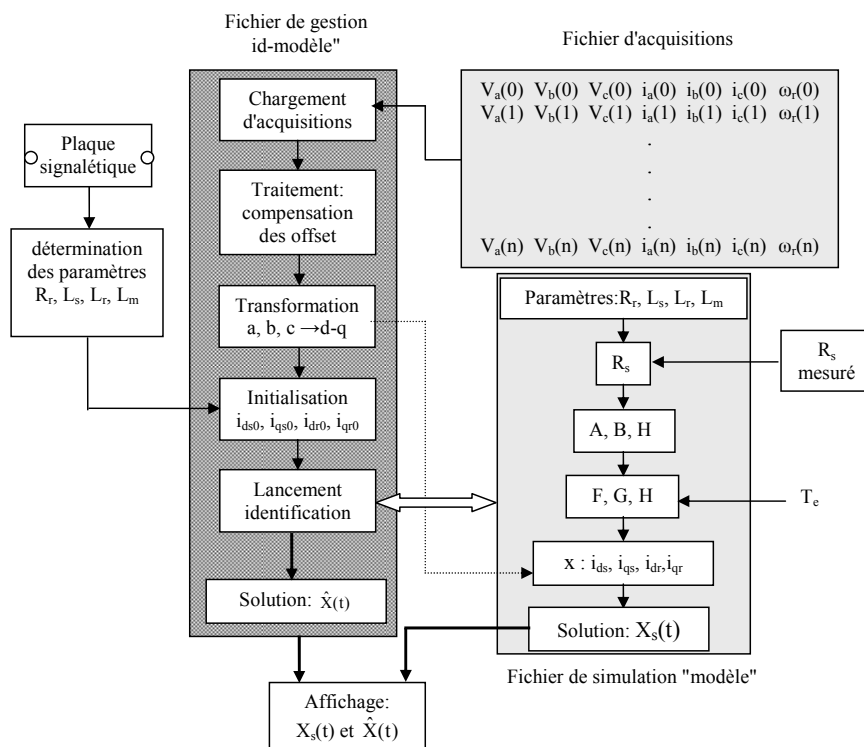


Figure 4 : Programations pour l'identification

### 6. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de simulation obtenus par application du filtre de *KALMAN* en régime de démarrage de la

machine asynchrone, sont présentés sur la figure (5-a et 5-c). Nous montrons les formes des deux composantes du courant rotorique  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$ .

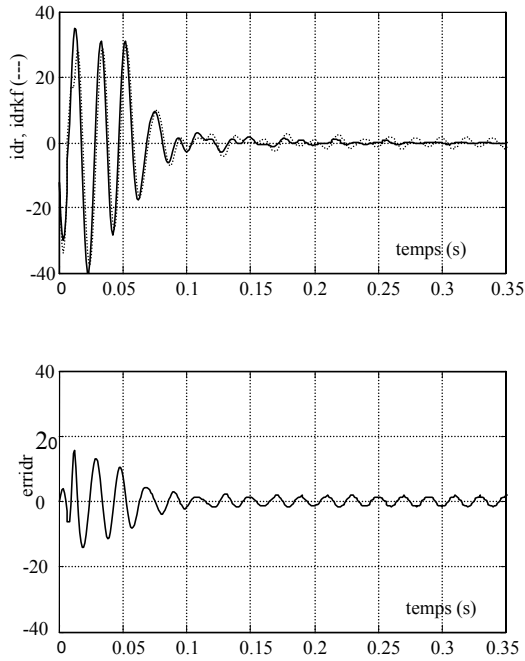


Figure 5a : Estimation de l'état rotorique  $i_{dr}$  par filtre de KALMAN (simulation)

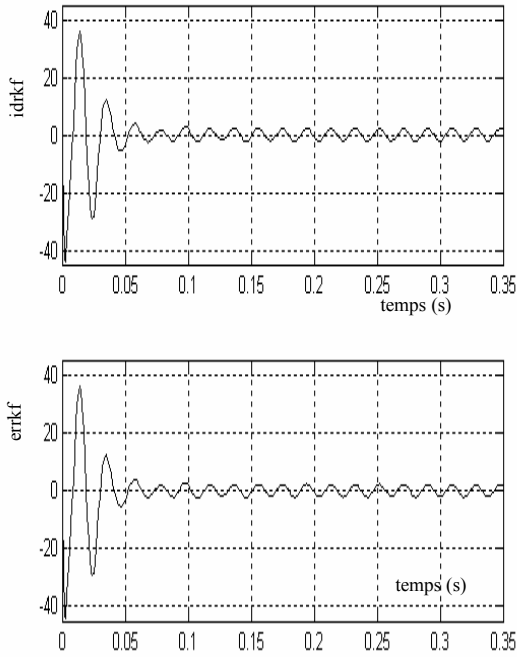


Figure 5-b : Estimation de l'état rotorique  $i_{dr}$  par filtre de KALMAN (pratique)

Pour des conditions initiales identiques en simulation et en estimation et pour des paramètres de bruit simulé, choisis, les allures des deux composantes  $i_{drkf}$  et  $i_{qrkf}$  de l'état rotorique estimé, suivent les deux composantes obtenues par simulation. L'erreur d'estimation est importante en démarrage et sa jusqu'à l'achèvement du régime transitoire après (0.1s). En régime permanent, l'erreur est de forme sinusoïdale et converge vers une valeur très faible.

A une période d'échantillonnage égale à (1 ms) et pour des matrices de variances d'erreur  $Q$  et  $R$  tel que :  $Q=10^{-4}[1\ 0\ 0; 0\ 1\ 0; 0\ 0\ 1]$ ,  $R=10^{-2}[1\ 0; 0\ 1]$ , les courbes obtenus en pratiques reproduisent bien les résultats de la simulation de l'état rotorique figure (5-b et 5-d). L'erreur reste sinusoïdale importante en transitoire et faible en régime permanent.

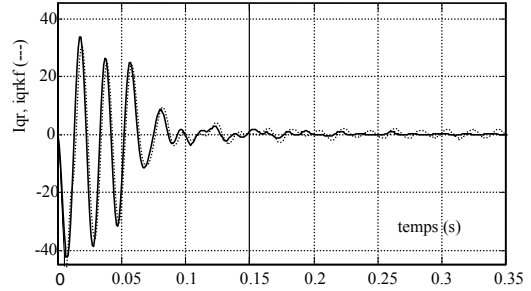


Figure 5-c : Estimation de l'état rotorique  $i_{qr}$  par filtre de KALMAN (simulation)

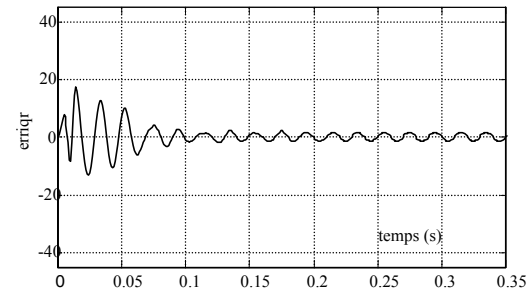


Figure 5-d : Estimation de l'état rotorique  $i_{qr}$  par filtre de KALMAN (pratique)

## 7. CONCLUSION

Dans le présent article, nous avons mis l'accent sur l'utilisation du filtre de *KALMAN* pour l'identification des courants rotoriques, grandeurs non accessibles à la mesure. Le modèle d'état est judicieusement formulé. Le choix d'un référentiel lié au stator à permet la simplification remarquable de l'expression des équations différentielles. Nous avons étudié l'identification par filtre de *KALMAN*, dans un environnement stochastique simulé, c'est-à-dire que les grandeurs d'entrée sont bruitées, les matrices de covariance d'état et d'observation sont connus. Les résultats obtenus des grandeurs rotoriques "courants" à estimer sont satisfaisant et suivent bien les courbes théoriques.

Les résultats issus des grandeurs pratiques mesurées sont également similaires au résultats attendus avec une erreur d'estimation faible en régime permanent. Par conséquent le filtre de *KALMAN* s'adapte bien à l'identification des grandeurs rotoriques non mesurables, ces grandeurs peuvent être exploitées en temps réel pour la commande des entraînement de la machine asynchrone.

### NOTATION UTILISEES :

$n_p$	nombre de paire de pôles,
$R_s, R_r$	résistance par phase stator, rotor,
$L_s, L_r$	inductance propre stator, rotor,
$L_m$	inductance mutuelle,
$\omega_r, \omega_s$	pulsation statorique et rotorique,
$\theta_s$	position angulaire électrique,
$C_e$	couple électromagnétique,
$C_r$	couple résistant,
$\sigma$	coefficient de dispersion,
$J$	moment d'inertie,
$f$	coefficient de frottement visqueux,
$\Omega_r$	vitesse mécanique du rotor,
$p$	opérateur de dérivation $d/dt$ ,
$V_{ds}, V_{qs}$	tensions statoriques suivant l'axe dq
$i_{ds}, i_{qs}$	courants statoriques suivant l'axe dq

$i_{dr}, i_{qr}$	courants rotoriques suivant l'axe dq
$X$	vecteur d'état,
$W(k)$	bruit d'état,
$V(k)$	bruit de mesure,
$G(k)$	matrice de commande,
$u(k)$	vecteur d'entrée,
$\phi(k+1,k)$	matrice de transition,
$Q(k)$	matrice de covariance d'état,
$R(k)$	matrice de covariance d'observation.
$\delta_{ki}$	indice de <i>Kroienicker</i> .

### REFERENCE

- [1] Loron L., "Identification paramétrique complète de l'actionneur asynchrone", Canadien Conférence on IA, Vol. 2, (1992), pp. 27.5-27.8.
- [2] Takayoshi M., Thomas L., "A rotor parameter identification scheme for vector controlled induction motor drives", Proc. IEEE Trans. On IA, Vol. IA-21, N°4, (1985), pp. 624-632.
- [3] Chatelain J., "Traité d'électricité, Machines électrique", Vol. X, Editions GEORGI, (1983).
- [4] Yayuan Fu, "Commandes découplées et adaptatives des machines asynchrones triphasées", Thèse de doctorat de Université Montpellier II, (1991).
- [5] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering And Prediction Problems", J. Basic Eng. ASME Trans. Series D 82, (1960), pp. 35-45.
- [6] R. E. Kalman, R. S. Busy, "A New Results In Linear Filtering And Prediction Theory", J. Basic Eng. ASME Trans. Series D 83, (1961), pp. 95-101.
- [7] Guergazi A, Debilou A.R., "Réalisation d'une chaîne d'acquisition : Application pour la détermination des paramètres électriques d'une machine asynchrone en cours de fonctionnements", Participation au conférence international ICEL'98, Oran.
- [8] Dolinar, D. Grcar, B. Jesernik, "Experimental identification methods in modeling the electric machines", ICEM, (1988).