Chapitre II

METHODES D 'ESTIMATIONS ET D'OBSERVATIONS DU FLUX ROTORIQUE

Actuellement, les machines asynchrones sont les machines électriques les plus utilisées dans les applications industrielles. Cela est du, en grande partie, à leur simplicité de construction et à leur robustesse. Pour avoir un fonctionnement rapide et un contrôle précis, afin de garantir les performances souhaitées, la régulation de flux dans la machine et sont maintien constant sont indispensables. Or, les grandeurs de sortie utilisée pour l'élaboration de la commande des machines sont souvent difficilement accessibles pour des raisons techniques ou pour des problèmes de coût.

La première idée pour accéder au flux rotrique, est d'utiliser des capteurs placés convenablement dans l'entrefer de la machine. Cependant, l'utilisation de ces capteurs altère la stabilité de la machine, et les avantages du moteur asynchrone sont alors perdus. De plus, le surcoût amené par leur utilisation, leur fragilité ou les problèmes de fiabilité limitent leur mise en œuvre dans des applications industrielles.

II.1 Estimateurs utilisés en boucle ouvert

Ces estimateurs reposent sur l'utilisation d'une représentation de la machine sous forme d'équation de Park définie en régime permanent (estimateur statique)ou transitoire (estimateur dynamique). Ils sont obtenus par une résolution directe des équations associées à ce modèle. Une telle approche conduit à la mise en œuvre d'algorithmes simples et donc rapides. Cependant leur dynamique dépend des modes propres de la machine et ils sont peu robustes aux variations paramétriques avec la température et la fréquence.

Dans ce qui suit nous représenterons, dans un souci de simplifications, l'estimation du flux rotorique de la machine asynchrone.

II.1.1 Présentation de l'estimateur de flux

A partir des équations de Park (1.22), d'où les équations (sous forme canonique) décrivant l'évolution des flux :

$$\begin{cases} \dfrac{d\varphi_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + \omega_s \varphi_{sq} + v_{Sd} \\ \dfrac{d\varphi_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - \omega_s \varphi_{sd} + v_{Sq} \\ \dfrac{d\varphi_{rd}}{dt} = -R_r i_{rd} + \omega_r \varphi_{rq} \\ \dfrac{d\varphi_{rq}}{dt} = -R_r i_{rq} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.1)$$

Et à partir des expressions des flux (1.23), on peut déduire les expressions des courants :

$$\begin{cases} i_{sd} = \dfrac{1}{\sigma L_s}\varphi_{sd} - \dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\varphi_{rd} \\ i_{sq} = \dfrac{1}{\sigma L_s}\varphi_{sq} - \dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\varphi_{rq} \\ i_{rd} = \dfrac{1}{\sigma L_r}\varphi_{rd} - \dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\varphi_{sd} \\ i_{rq} = \dfrac{1}{\sigma L_r}\varphi_{rq} - \dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\varphi_{sq} \end{cases} \quad (2.2)$$

En reportant (2.2) dans (2.1),ces équations peuvent être reformulées pour ne faire intervenir que les flux :

$$\begin{cases} \dfrac{d\varphi_{sd}}{dt} = -R_s\left(\dfrac{1}{\sigma L_s}\right)\varphi_{sd} + \omega_s\varphi_{sq} + R_s\left(\dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\right)\phi_{rd} + v_{sd} \\ \dfrac{d\varphi_{sq}}{dt} = -R_s\left(\dfrac{1}{\sigma L_s}\right)\varphi_{sq} - \omega_s\varphi_{sd} + R_s\left(\dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\right)\varphi_{rq} + v_{sq} \\ \dfrac{d\varphi_{rd}}{dt} = R_r\left(\dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\right)\varphi_{sd} - R_r\left(\dfrac{1}{\sigma L_r}\right)\varphi_{rd} + \omega_r\varphi_{rq} \\ \dfrac{d\varphi_{rq}}{dt} = R_r\left(\dfrac{1-\sigma}{\sigma L_m}\right)\varphi_{sq} - R_r\left(\dfrac{1}{\sigma L_r}\right)\varphi_{rq} - \omega_r\varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.3)$$

La méthode consiste à choisir le repère le mieux approprie pour représenter le flux considéré (flux statorique, rotorique ou d'entrefer).

II.1.2 Estimation du flux rotorique

La méthode la plus répandue dans le domaine des contrôles linéaires d'une machine asynchrone est celle appelée « contrôle vectoriel à orientation du flux rotorique » [LEN 01]. Son grand intérêt est

d'assurer un découplage entre le contrôle du flux rotorique et celui du couple comme dans une machine à courant continu. Dans ce cas les réglages des principales variables sont réalisés dans le référentiel d-q tournant et aligné selon le vecteur flux rotorique de façon à avoir $\phi_{rd} = \Phi_r$.

Le cœur de ce contrôle représente le bloc d'estimation qui a pour rôle de reconstruire le module du flux rotorique, sa position par rapport au stator, et le couple électromagnétique. Dans un repère lié au flux rotorique, et à partir des équations (1.22) et (2.2), on a :

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{rd} = -\dfrac{1}{T_r}\phi_{rd} + \omega_r\phi_{rq} + \dfrac{L_m}{T_r} i_{sd} \\ \dot{\phi}_{rq} = -\dfrac{1}{T_r}\phi_{rq} - \omega_r\phi_{rd} + \dfrac{L_m}{T_r} i_{sq} \end{cases} \tag{2.4}$$

et comme le flux rotorique est aligné, dans ce repère, sur l'axe d, alors :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \Phi_r \\ \phi_{rq} = 0 \end{cases}$$

donc l'équation (2.4) donne :

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_r = -\dfrac{1}{T_r}\Phi_r + \dfrac{L_m}{T_r} i_{sd} \\ \omega_r = \dfrac{L_m}{T_r}\dfrac{i_{sq}}{\Phi_r} \end{cases} \tag{2.5}$$

Ces deux équations donnent la structure de l'estimateur :

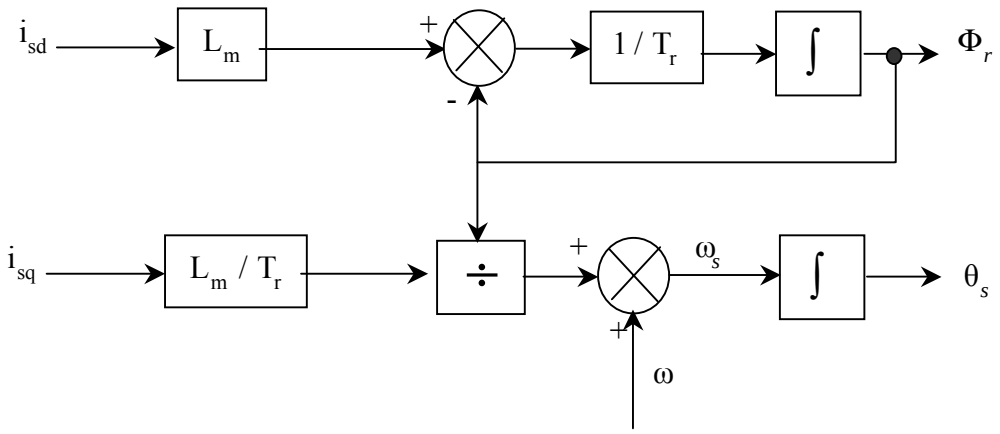

Figure 2.1 – Estimateur de flux rotorique.

Les estimateurs en boucle ouverte, se sont des estimateurs qui ne permettent aucune correction des erreurs de mesures ou d'estimation. Il est souligné qu'une identification en ligne de la constante de temps rotorique s'avère particulièrement importante.

II.2 Les observateurs

Les estimateurs décris précédemment constituent des observateurs simples du flux rotorique. Ils fonctionnent naturellement en boucle ouverte et pour cette raison, on les appelle « estimateur ». Leur précision peut s'avère insuffisante dans le cas présent, il apparaît d'emblée que toute erreur relative sur les paramètres et les constantes du temps se percute directement sur les grandeurs estimées. Cette constatation justifie les efforts achevés par les concepteurs pour réaliser des estimateurs en boucle fermée, « observateurs ».

Les méthodes de commande des processus pour un système dynamique, avec x l'état du système, y sa sortie et u son entrée, utilisent le principe du retour d'état (commande optimale, découpage, placement des pôles,…). Comme dans la plupart des cas, les seules grandeurs accessibles du système, sont les variables d'entrée et de sortie, il est nécessaire à partir de ces informations de reconstruire l'état du modèle choisi, alors la présence d'un autre système dynamique $\hat{S}(\hat{x}, \hat{y}, u)$ qui a la propriété que l'état $\hat{x}$ du processus S est nécessaire pour élaborer la commande à base d'un observateur. La figure (2.2) représente une conception générale d'un observateur.

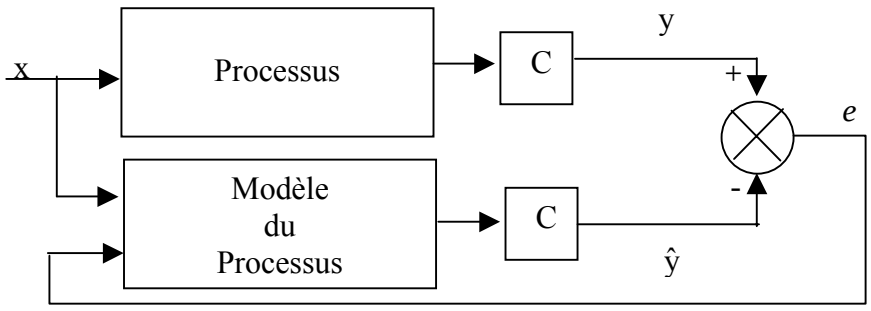

figure 2.2- Conception générales d'un observateur

II.2.1 Principe d'un observateur

La structure d'un observateur d'état est celle indiquée sur la figure (2.3). Elle fait intervenir tout d'abord un estimateur fonctionnant en boucle ouverte qui porte également le nom de prédicteur et qui est caractérisé par la même dynamique que celle du système. La structure fonctionnant en boucle fermée obtenue par l'introduction d'une matrice de gains K permet d'imposer la dynamique propre à

cet observateur. Le vecteur de sortie y est comparé au vecteur équivalent $\hat{y}$ donné par l'observateur pour assurer le fonctionnement en boucle fermée. Ainsi on définit une nouvelle variable, l'erreur d'observation. Celle-ci est multipliée par une matrice de gain K et envoyée à l'entrée de l'observateur pour influencer les états estimés. Ainsi, par un choix judicieux de la matrice de gain K. On peut modifier la dynamique de l'observateur et par conséquent faire évoluer la vitesse de convergence de l'erreur vers zéro.

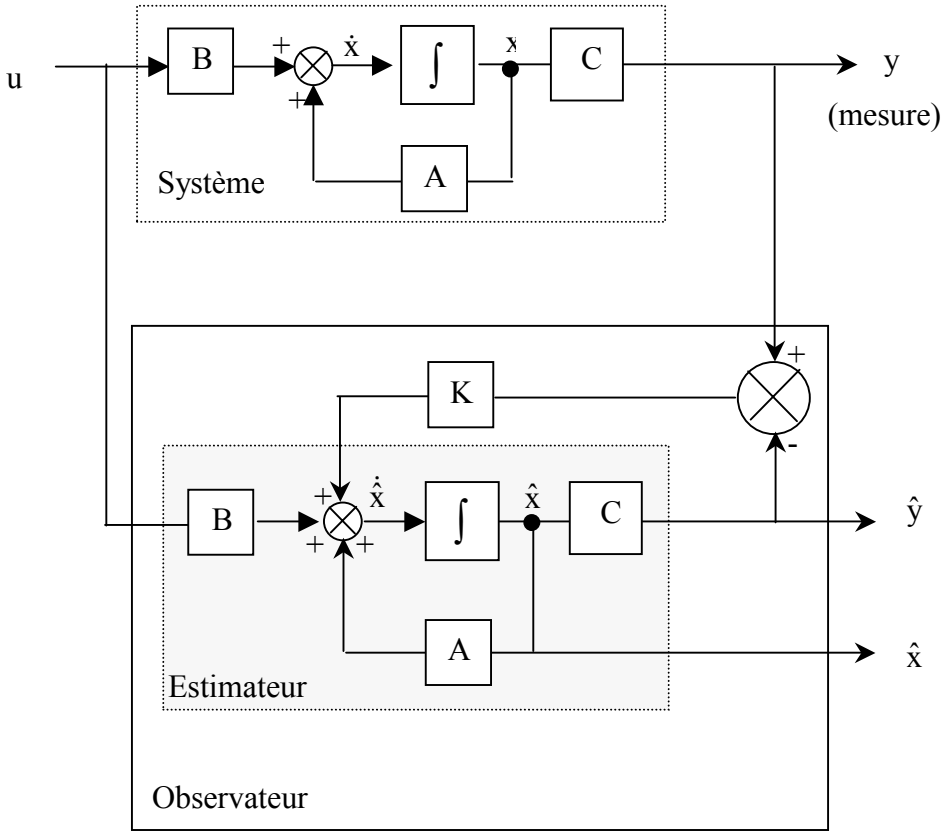

Figure 2.3 -Schéma fonctionnel d'un observateur

Alors le but d'un observateur est donc de fournir la valeur de l'état non mesuré à un instant donné en fonction des états mesurés passé.

II.2.2 Les observateurs linéaires

En général, les observateurs du flux peuvent être classés selon la dimension du vecteur d'état, en deux familles [SAN 03, HIN 03, MAD 03] :

-la première famille regroupe des observateurs d'ordre complet qui donnent des informations sur les quatre variables d'état de la machine. Ces variables sont définies, soit comme quatre composantes flux statorique et rotorique, soit comme deux composantes du courant statorique et deux composantes du flux rotorique.

-la deuxième famille concerne des observateurs d'ordre réduit obtenus en éliminant les états accessible de la machine.

II.2.2.1 Les observateurs linéaires d'ordre complet

Considérons un système continu linéaire, où sa dynamique est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \qquad x(0) = x_0, \tag{2.6}$$

L'observateur du système linéaire défini par les équations (2.6) a la forme générale suivante :

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\,\hat{x} + Hu + Ky, \tag{2.7}$$

Où l'état $\hat{x}$ de l'observateur a la même dimension que l'état x du processus.

Les matrices $\hat{A}$, K et H de l'équation (2.7) doivent être choisies d'une manière à satisfaire les propriétés exigées par l'observateur : l'état de l'observateur doit converger vers l'état du processus indépendamment de l'état x et l'entrée u. Pour déterminer ces matrices l'erreur d'estimation est donnée par :

$$e = x - \hat{x} \tag{2.8}$$

A partir des équations (2.6) et (2.8) on obtient :

$$\dot{e} = \hat{A}e + (-\hat{A} + A - KC)x + (B - H)u \tag{2.9}$$

Pour que l'erreur converge vers le zéro, indépendamment de x et de u, les conditions suivantes doivent être satisfaites :

$$\hat{A} = A - KC \tag{2.10}$$

$$H = B \tag{2.11}$$

Si ces conditions sont satisfaites, l'erreur de l'estimation est gouvernée par :

$$\dot{e} = \hat{A}e \tag{2.12}$$

Cette erreur converge vers zéro si $\hat{A}$ est une matrice stable. Cela veut dire que ses pôles doivent se trouver dans le demi-plan gauche. La correction de l'observateur est obtenue par la sélection de la matrice de gain K, puisque les matrices A, B et C sont définies par le processus. Il est très important de noter que le choix judicieux des gains de la matrice K permet de fixer la dynamique de l'observateur. Plusieurs méthodes sont proposées pour déterminer la matrice K [BOR 90].

Pour mettre en valeur le rôle de la matrice de gain de l'observateur, et expliquer les exigences des conditions données par (2.10) et (2.11) ,l'observateur peut être écrit comme suit :

$$\dot{\hat{x}} = A\,\hat{x}(t) + Hu(t) + K(y - C\,\hat{x}),$$

Cette équation peut être représentée par le schéma-bloc suivant (Figure 2.4) :

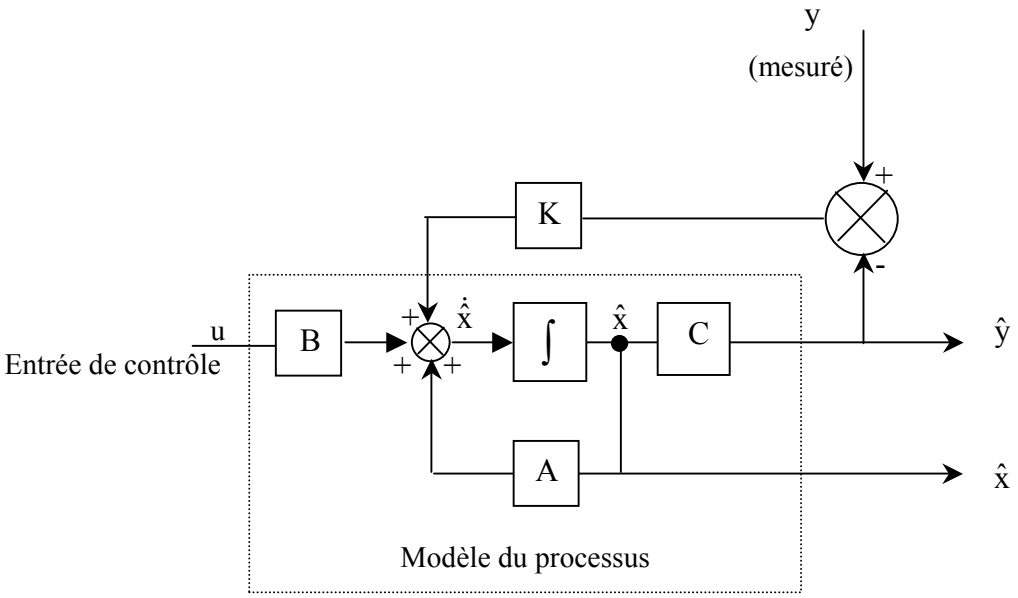

Figure 2.4 - Structure d'un observateur d'ordre complet pour un système linéaire.

II.2.2.2 Les observateurs linéaires d'ordre réduit

L'observateur d'ordre complet décrit dans la section précédente a le même ordre que le processus. Si le système comporte n états et m sorties mesurables, il paraît redondant d'estimer les états connus. Théoriquement, on a besoin d'estimer les états inconnus, cela résulte dans un observateur de dimension (n-m) où n présente la dimension du vecteur d'état et m le nombre des observations. Quand le nombre des observations est comparable à la dimension du vecteur d'état, un observateur d'ordre réduit peut représenter une simplification considérable.

La description de l'observateur d'ordre réduit est simplifiée si le vecteur d'état peut être segmenté en deux vecteurs :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Tel que : $x_1 = y = C\,x$ (2.14)

x_1 : vecteur d'observation de dimension m.

x_2 : vecteur d'état contient des composantes non mesurables de dimension n-m.

Alors la dynamique du processus est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u \end{cases} \quad (2.15)$$

Puisque x_1 est mesuré alors :

$$\hat{x}_1 = x_1 = y \quad (2.16)$$

Nous définissons l'observateur d'ordre réduit par :

$$\hat{x}_2 = K\,y + z \quad (2.17)$$

où z est l'état d'un système d'ordre (n-m) :

$$\dot{z} = \hat{A}z + Ly + Hu \quad (2.18)$$

Un schéma-bloc de l'observateur réduit est présenté par la figure (2.5) :

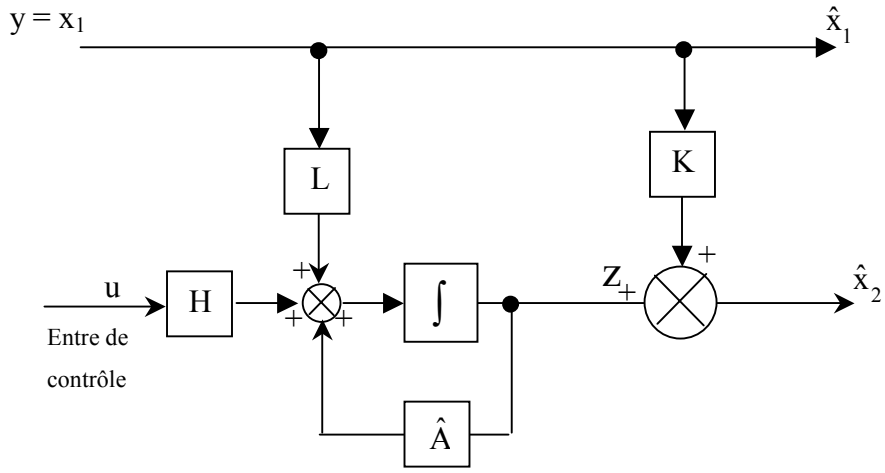

Figure 2.5 - Structure d'un observateur d'ordre réduit pour un système linéaire.

Les matrices $\hat{A}$, L, H et K sont choisies, comme dans le cas de l'observateur d'ordre complet, pour assurer que l'erreur dans l'estimation d'état converge vers zéro, indépendamment de x, y et u. Comme il n'est y a aucune erreur dans l'estimation de x_1, alors :

$$e_1 = x_1 - \hat{x}_1 = 0 \quad (2.19)$$

Donc, il est nécessaire d'assurer seulement la convergence de e_2 vers zéro.

$$e_2 = x_2 - \hat{x}_2 \quad (2.20)$$

à partir des équations (2.15) à (2.18), on a :

$$\dot{e}_2 = (A_{21} - KA_{11} + \hat{A}K - L)x_1 + (A_{22} - KA_{12} - \hat{A})x_2 + \hat{A}e_2 + (B_2 - KB_1 - H)u \quad (2.21)$$

Comme dans le cas d'un observateur d'ordre complet, et pour faire disparaître les coefficients de x_1, x_2 et u il est indispensable d'assurer les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \hat{A} = A_{22} - KA_{12} \\ L = A_{21} - KA_{11} + \hat{A}K \\ H = B_2 - KB_1 \end{cases} \quad (2.22)$$

Lorsque ces conditions sont satisfaites, l'erreur de l'estimation sera donnée par :

$$\dot{e}_2 = \hat{A}e_2 \quad (2.23)$$

La matrice de gain K doit être choisie de telle sorte que les pôles de $\hat{A} = A_{22} - KA_{12}$ doivent se trouver dans le demi-plan gauche ; A_{22} et A_{12} de l'observateur d'ordre réduit jouent le rôle des matrices A et C de l'observateur d'ordre complet.

II.2.3 Observateurs discrets prédicteurs ou correcteurs

Considérons le système discret défini par :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k \\ y_k = C_k x_k \end{cases} \quad (2.24)$$

On construit un observateur pour ce système par le principe énoncé dans le cas des systèmes continue ; seulement ici, nous distinguerons deux types d'observateurs suivant que le mesure est disponible à l'instant k ou à l'instant k+1 d'après ce que l'on connaît à l'instant k nous noterons $\hat{x}_{k+1/k}$ cette prédiction. Dans le deuxième cas, nous construisons un observateur–correcteur, l'estimation de l'état sera alors notée $\hat{x}_{k+1/k+1}$ [BOR 90].

II.2.3.2 Observateur –prédicteur

Ce constructeur d'état est défini par :

$$\hat{x}_{k+1/k} = A_k \hat{x}_{k/k-1} + B_k u_k + K^p(y_k - \hat{y}_{k/k-1}) \quad (2.25)$$

Avec $\hat{y}_{k/k-1} = C\hat{x}_{k/k-1}$. Ce qui peut s'écrire également :

$$\hat{x}_{k+1/k} = [A_k - K^p C_k]\hat{x}_{k/k-1} + B_k u_k + K^p y_k \quad (2.26)$$

Cette structure est identique à celle obtenue dans le cas des systèmes continus ; en notant $\tilde{x}_{k+1/k}$ l'erreur de reconstruction, il vient :

$$\tilde{x}_{k+1/k} = [A_k - K^p C_k]\tilde{x}_{k/k-1} \tag{2.27}$$

II.2.3.2 Observateur correcteur

Dans le cas ou y_{k+1} est connue, l'estimation de x_{k+1} est fournie par le reconstructeur :

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = A_k \hat{x}_{k/k} + B_k u_k + K^c(y_{k+1} - \hat{y}_{k+1}) \tag{2.28}$$

Où $\hat{y}_{k+1}$ représente l'estimation de la sortie à l'instant k+1 qui peu être réalisé de deux façons différentes : par anticipation ou par prédiction.

II.2.3.2 a-Anticipation

On pose dans ce cas :

$$\hat{y}_{k+1} = C\,\hat{x}_{k+1/k+1} \tag{2.29}$$

Ce qui conduit à écrire l'observateur, sous la forme :

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = [I - K^c C_k]^{-1}[A_k \hat{x}_{k/k} + B_k u_k + K^c y_{k+1}] \tag{2.30}$$

l'erreur de reconstruction, est définie par l'équation récurrente :

$$\tilde{x}_{k+1/k+1} = [I - K^c C_k]^{-1} A_k \tilde{x}_{k/k} \tag{2.31}$$

II.2.3.2 b-Prédiction

Dans ce cas, $\hat{y}_{k+1}$ est la meilleure estimation que l'on puisse faire de la sortie à partir de l'information disponible avant le calcul de, on pose donc :

$$\hat{y}_{k+1} = C[A_k \hat{x}_{k/k} + B_k u_k] \tag{2.32}$$

Ce qui est conduit à la deuxième forme de reconstructeur-correcteur :

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = [I - K^c C_k][A_k \hat{x}_{k/k} + B_k u_k] + K^c y_{k+1} \tag{2.33}$$

Avec les même notations que précédemment, l'erreur de reconstruction est régie par l'équation:

$$\tilde{x}_{k+1/k+1} = [I - K^c C_k] A_k \tilde{x}_{k/k} \tag{2.34}$$

II.3 Observateur déterministes de Luenberger

L'observateur de Luenberger est l'un des observateurs connus dans les commandes par retour d'état. Il permet de reconstruire l'état du système observable lorsque tout ou partie du vecteur d'état ne peut être mesuré [BOR 90], comme il peut estimer les paramètres variables ou inconnus d'un système, c'est le cas d'un observateur étendu. Une représentation de l'observateur de Luenberger peut s'exprimer dans la figure (2.6)[GUY 96].

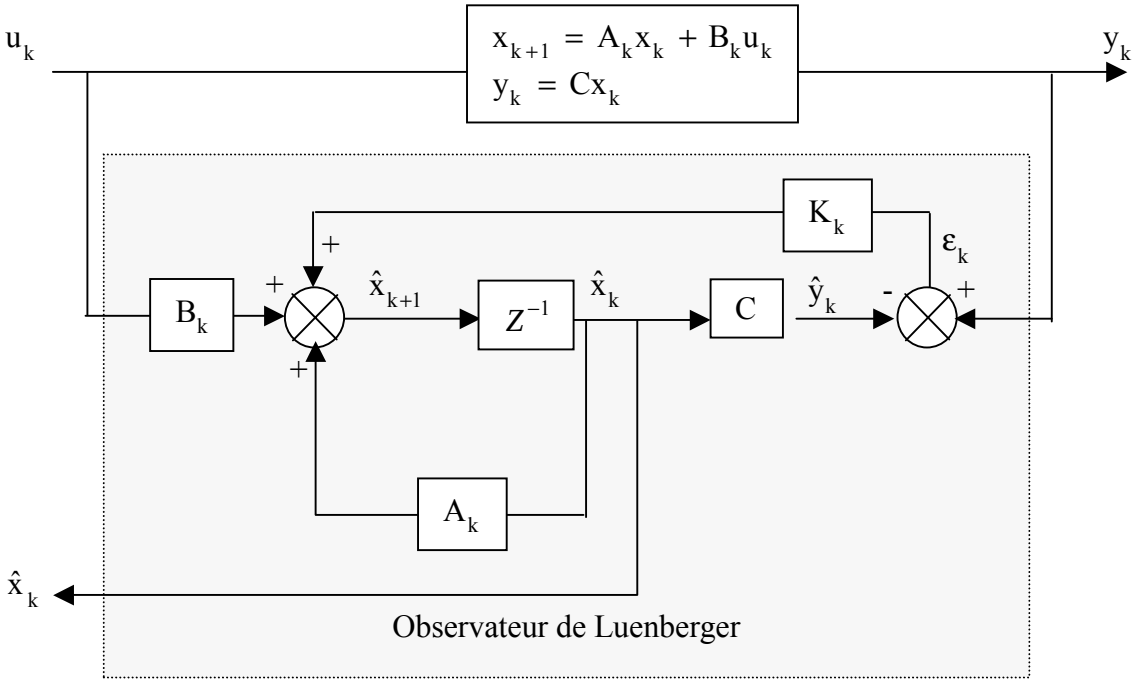

Figure 2.6 - Observateur de Luenberger

La mise en équation de l'observateur conduit à :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k + K_k \varepsilon_k \\ \hat{y}_k = C\hat{x}_k \end{cases} \tag{2.35}$$

Le terme K_k corrige le vecteur reconstruit à partir de l'erreur d'estimation. L'erreur d'estimation est donnée par :

$$\tilde{x}_{k+1} = (A - K_k C)\,\tilde{x}_k \tag{2.36}$$

La matrice de gain est calculée d'une manière à assurer une convergence rapide de $\hat{x}$ vers x. La stabilité de l'observateur et leur performance sont obtenues avec un bon choix des valeurs propres de

la matrice($A-K_kC$). Cet observateur nous permet de reconstituer l'état non mesurable avec une correction de l'erreur d'état mesuré, cette technique amène une meilleure dynamique et une bonne précision par rapport à celle obtenue avec un capteur du flux dans les machines asynchrone.

II.3.1 Calcul de flux rotorique de la machine asynchrone on utilisant l'observateur de Luenberger.

Le flux rotorique peut être calculer soit en utilisant l'observateur de Luenberger appliqué au modèle linéaire de $4^{ème}$ ordre soit par un modèle réduit de $2^{ème}$ ordre contenant uniquement les grandeurs du flux rotorique [ELT 01]. Les deux composantes de flux rotorique seront estimées dans un référentiel fixe liée au stator. Si on prend le system d'équation (2.35), qui présente le modèle discret de l'observateur de Luenberger, avec un choix d'un observateur correcteur par prédiction de la sortie.

II.3.1.1 Calcul de flux du modèle réduit de $2^{éme}$ ordre

Afin d'estimer le flux rotorique, on va exploiter le modèle réduit discret (1.40) de la machine asynchrone ; ce modèle ne contient que les deux composantes du flux rotorique, ce qui diminue le temps de calcul et facilite l'implantation de l'algorithme d'estimation.

$$\begin{cases} \hat{x}_{p_{k+1}} = A_{k2}\hat{x}_k + B_{k2}\, u_k \\ \hat{z}_{k+1} = C_{k+1}\ \hat{x}_{p_{k+1}} \\ \hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{p_{k+1}} + K_{k+1}\,(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1}) \end{cases} \tag{2.37}$$

Le gain K est obtenu en plaçant les pôles de l'observateur ($P_{d1} = a_1 + jb_1$ et $P_{d2} = a_1 - jb_1$) dans le cercle unitaire, où la matrice F_k contient les pôles à partie réel négative.Le gain est donné par (2.38)

$$K_{k+1} = (A_{k2} - F_k)(C_{k+1}A_{k2})^{-1} \tag{2.38}$$

La matrice d'état discrète A_{k2} et la matrice d'entrée discrète B_{k2} sont développées au deuxième ordre dans le chapitre I, le pas d'échantillonnage est très faible (de l'ordre de 400 µs). A_{k2} est rafraîchie en ligne pour tenir compte des variations de la vitesse de rotation du rotor.

Le gain K est calculé à l'aide de la fonction « place » contrôlé par Matlab, qui spécifie les pôles qui ont une partie réelle négative.

II.3.2 Résultats de la simulation

Le moteur utilisé est de 4 kW, ses paramètres sont présentés dans l'annexe. Dans un premier temps, nous avons simulés un démarrage à vide et à l'instant t = 1s, nous chargeons le moteur par un couple résistant de 25 Nm. Le pas d'échantillonnage utilisé est T_e = 400 µs.

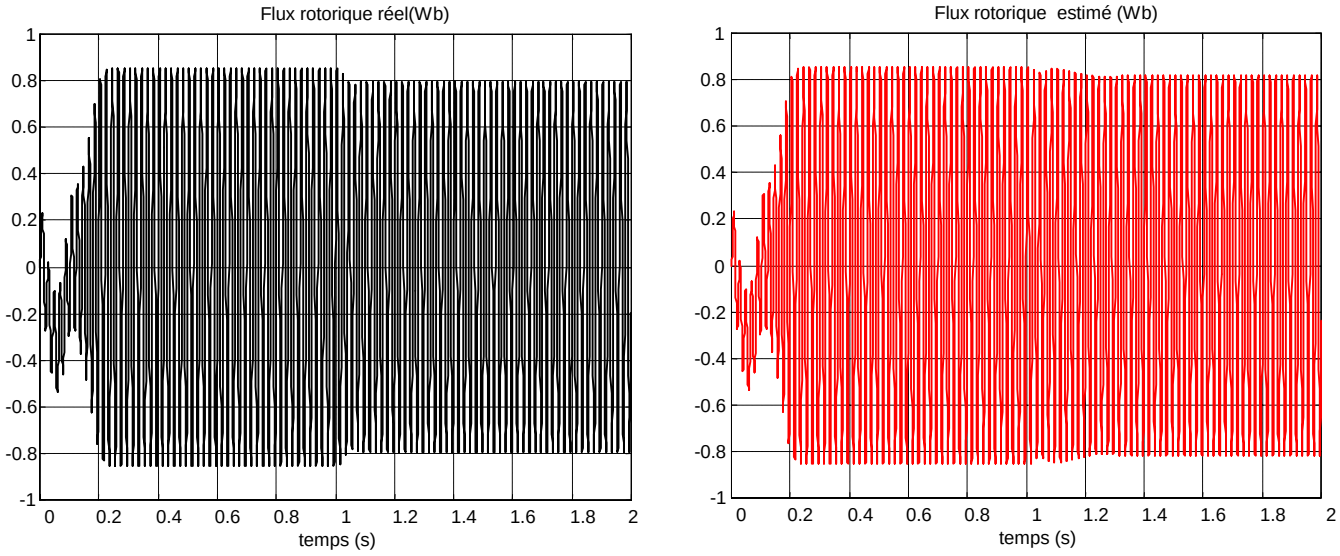

Figure 2.7 -Flux rotorique réel et estimé

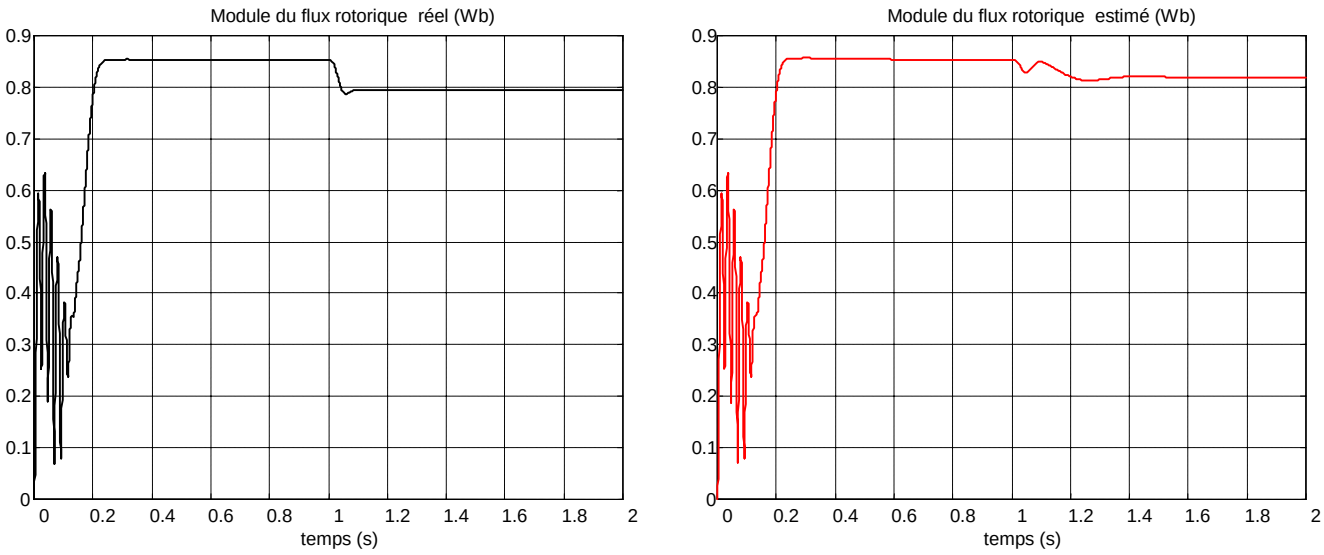

Figure 2.8 – Module de flux rotorique réel et estimé

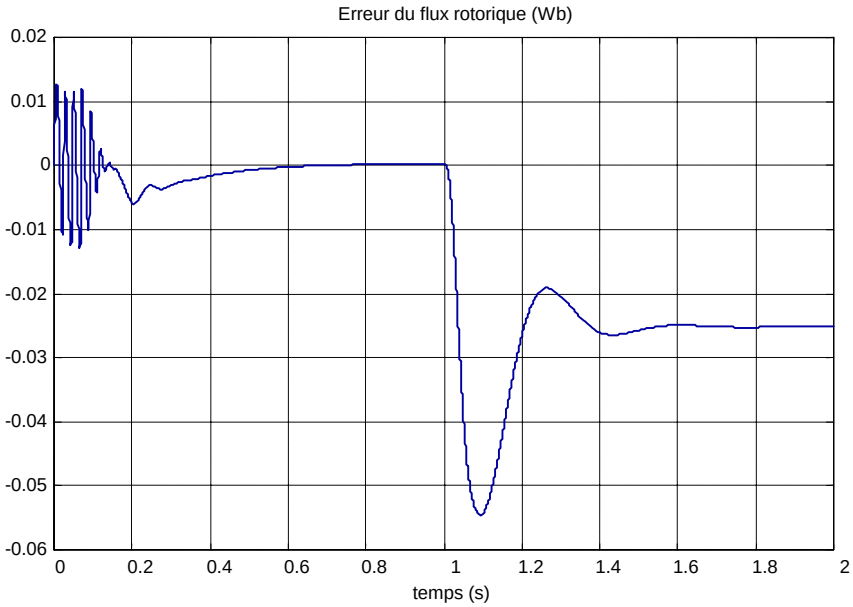

Figure 2.9 – Erreur de flux rotorique

Pendant le fonctionnement à vide du moteur, l'erreur entre le flux réel et le flux estimé, est presque nulle, à l'envers et à l'instant t=1s on remarque une dégradation du flux rotorique accompagné par une erreur d 'estimation conséquent du couple résistant imposé par la charge .

II.3.2.1 Résultats de simulation avec variation paramétrique

Ces résultats sont obtenus avec une variation des paramètres du moteur pendant le fonctionnement en charge (Cr= 25 Nm), à l'instant t= 1s .

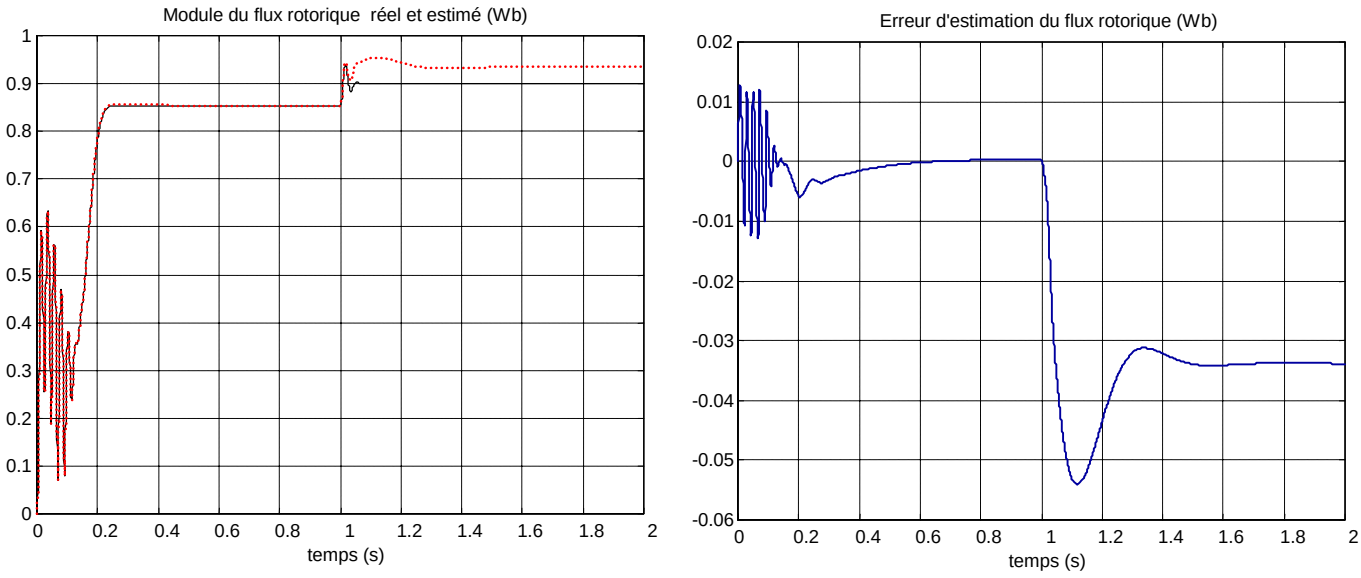

Figure 2.10 - Flux rotorique réel, estimé (Wb) avec ($\frac{\Delta L_s}{L_s} = -10\ \%$)

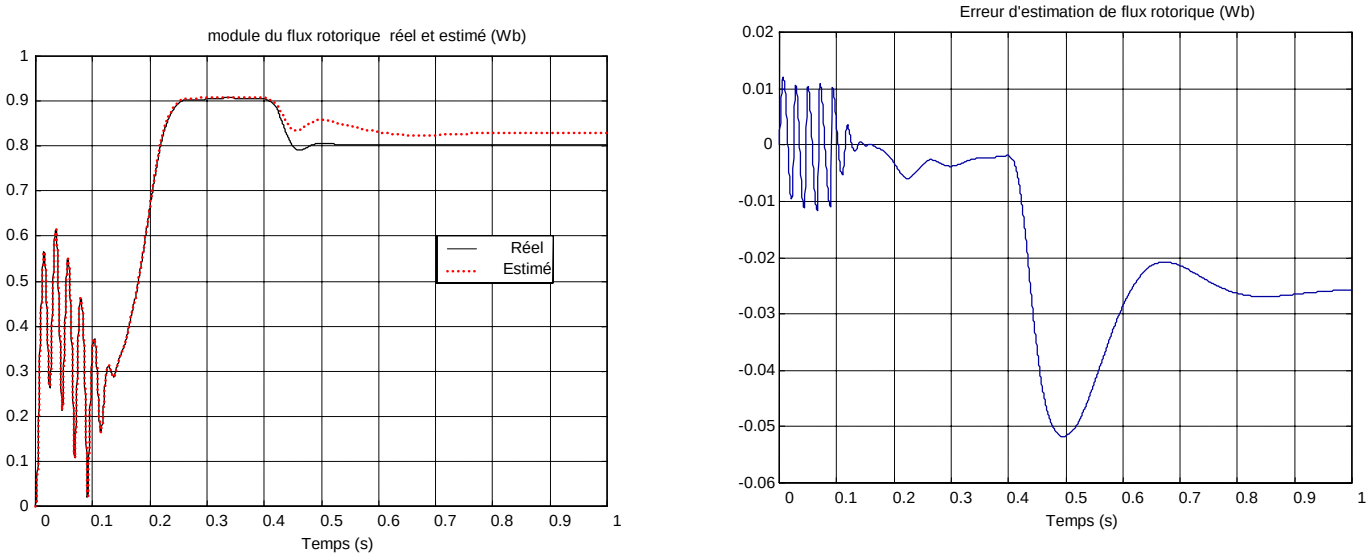

Figure 2.11 -Flux rotorique réel, estimé et l'erreur (Wb) avec ($\frac{\Delta R_s}{R_s} = +100 \quad \%$)

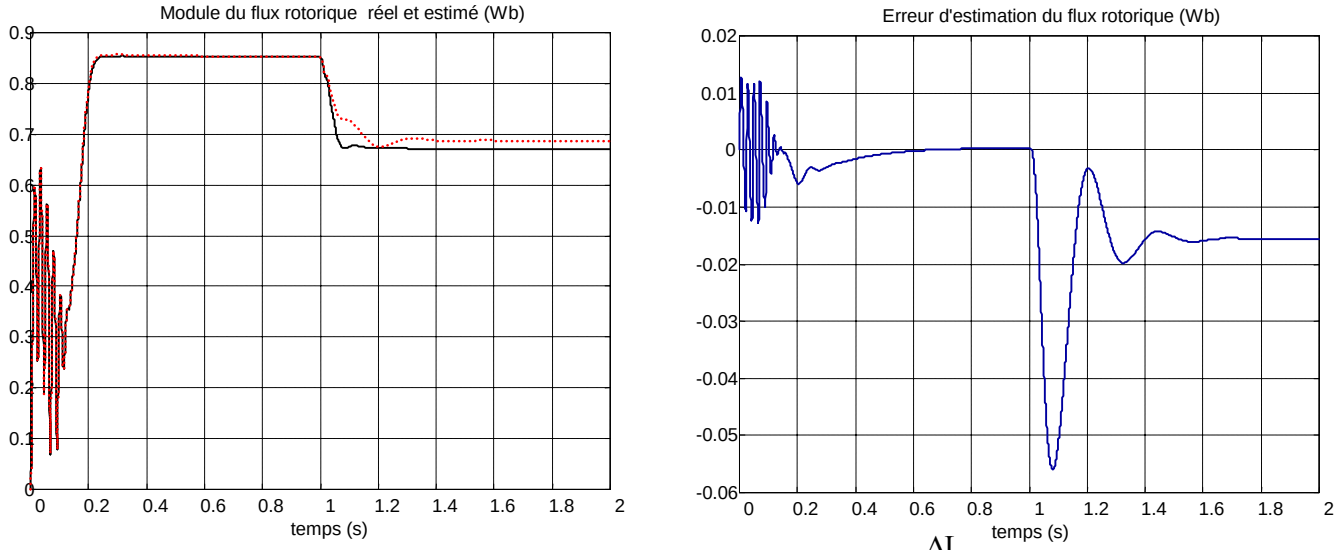

Figure 2.12 -Flux rotorique réel, estimé (Wb) avec ($\frac{\Delta L_m}{L_m} = -5 \quad \%$)

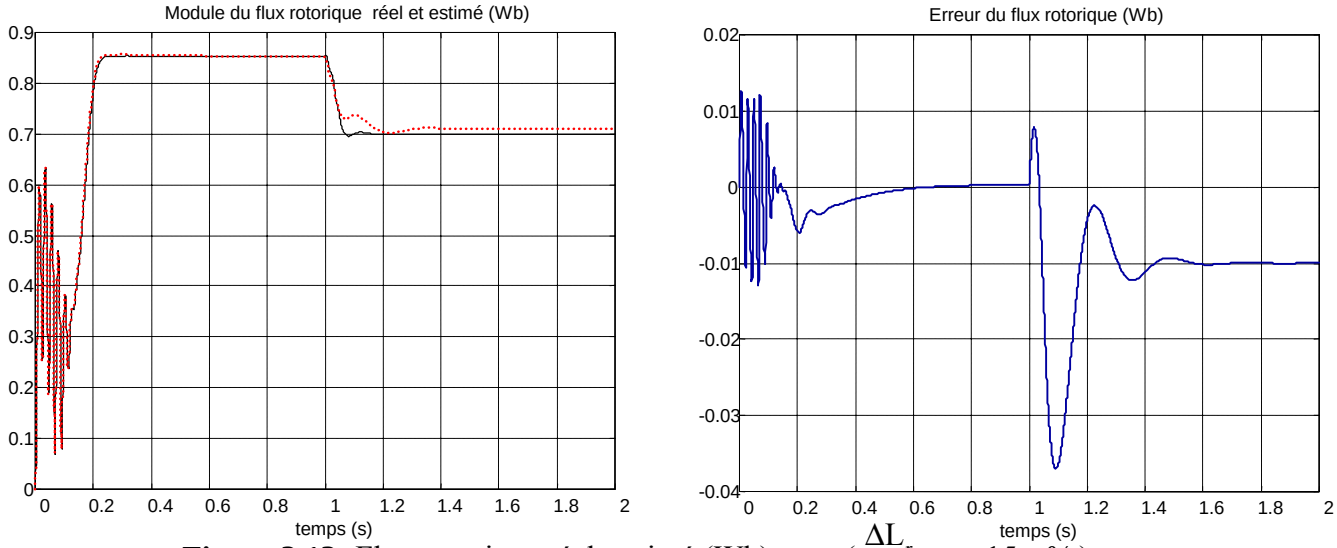

Figure 2.13 -Flux rotorique réel, estimé (Wb) avec ($\frac{\Delta L_r}{L_r} = -15 \quad \%$)

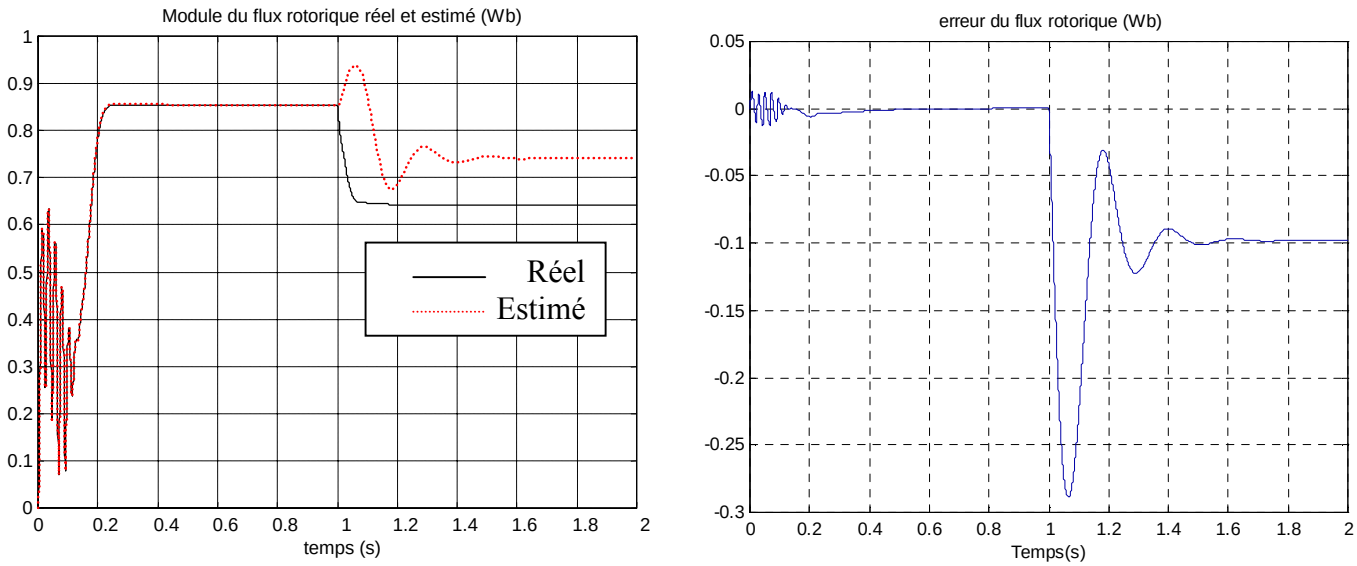

Figure 2.14 -Flux rotorique réel, estimé (Wb) avec ($\frac{\Delta R_r}{R_r}$=+100%)

La variation des paramètres du moteur asynchrone manifeste une erreur supplémentaire affectant la reconstruction du flux rotorique dans une commande vectorielle. Au contraire ici on peux remarqué aussi que l'augmentation de 100 % de la résistance rotorique, provoque une erreur d'observation moins importante, qui montre la possibilité d'utilisé ces observateurs dans une commande vectorielle sans aucune problème.