

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF 1-
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la Faculté de Technologie
Département d'Electronique

Pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option: Contrôle

Par

M^{elle}. **BOUHAREB Hanane**

THEME

Observateur non linéaire mode glissant

Soutenu le 19/09/2013 devant la commission d'examen :

Mr. F. KRIM	Professeur à l'université de Sétif	Président
Mme. S. SEMCHEDDINE	Maître de conférences à l'université de Sétif	Rapporteur
Mr. N. KHENFER	Professeur à l'université de Sétif	Examineur
Mr. A. HASSAM	Maître de conférences à l'université de Sétif	Examineur

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.

Je suis très reconnaissante à madame SEMCHEDDINE Samia Maître de Conférences classe A au sien du département d'électronique, d'avoir accepté de diriger mes travaux, et pour ses encouragements et son soutien qui m'ont été une aide précieuse.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

J'insiste à ne pas oublier mes amis, avec lesquelles j'ai partagé des très beaux moments et mes collègues dans les départements d'électronique, de la médecine et de la chirurgie dentaire, pour leurs amours et leurs confiances.

Enfin, je ne pourrai jamais suffisamment remercier ma famille : mon père, ma mère, mes frères et sœurs, qui m'ont soutenue et encouragée le long de mon parcours. Sans leurs confiances immenses en moi, sans leurs aides et leurs amours, je n'aurais pas pu aller au bout de mes projets.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
I. Observabilité et observateur	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Observabilité des systèmes linéaires	5
I.3. Observateur des systèmes linéaires	6
I.3.1. Observateur de Luenberger.....	7
I.3.2. Filtre de Kalman	8
I.4. Observabilité des systèmes non linéaires	9
I.5. Observateur des systèmes non linéaires.....	12
I.5.1. Observateur de Luenberger étendu	12
I.5.2. Filtre de Kalman étendu	13
I.6. Conclusion	13
II. Observateur mode glissant	15
II.1. Introduction.....	15
II.2. Conception d'un observateur mode glissant.....	16
II.3. observateur mode glissant des systèmes linéaires	19
II.4. Observateur triangulaire mode glissant	23
II.5. Conclusion	25
III. Observateur mode glissant triangulaire pour un système de pompage.....	26
III.1. Introduction	26
III. 2. Principe du système de pompage.....	27
III. 3. Modélisation du système dans l'espace d'état	27
III. 4. Conception de l'observateur mode glissant triangulaire.....	31
III. 5. Convergence de l'observateur mode glissant triangulaire	31
III. 6. Résultats de simulation	32
III.7. Conclusion.....	35
IV. Conception d'observateur non linéaire mode glissant pour la machine synchrone à aimants permanents	36
IV.1. Introduction	36
IV.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents	37
IV.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	39

IV.3.1. Les équations électriques	40
IV.3.2. Les équations mécaniques.....	44
IV.3.3. Expression du couple électromagnétique	45
IV.4. Modèle d'état dans le repère tournant (d – q).....	46
IV.5. Modèle d'état dans le repère fixe ($\alpha - \beta$).....	46
IV.6. Observabilité de la machine synchrone à aimants permanents	48
IV.6.1. Observabilité de la machine avec mesure de vitesse et de position	48
IV.6.2. Observabilité de la machine sans mesure de vitesse et de position.....	49
IV.7. Conception de l'observateur mode glissant	53
IV.8. Résultats de simulation.....	55
IV.9. Conclusion.....	59
Conclusion et perspectives.....	60
Bibliographie.....	62

INTRODUCTION GENERALE

La mesure de toutes les grandeurs (variables) d'un procédé physique est souvent primordiale afin de mettre en œuvre des stratégies de commande par retour d'état par exemple, ou bien des stratégies de surveillance et de diagnostic de défauts [1].

Cependant, pour des raisons techniques ou économiques (difficulté d'implémentation ou coût élevé des capteurs) il n'est pas toujours possible d'accéder à toutes les variables d'état représentant ces grandeurs, d'où la nécessité de faire recours à un système dynamique auxiliaire, appelé observateur, qui est chargé d'estimer l'état du système [1].

De manière générale, la synthèse de l'observateur exploite les informations disponibles sur le système réel à savoir ses entrées et ses sorties mesurées on se basant sur un modèle dynamique du système.

Dans le cas linéaire, le problème de synthèse d'observateurs est bien maîtrisé. Les solutions apportées telles que l'observateur de Luenberger ou le filtre de Kalman permettent de répondre à toutes les situations [2].

Cependant, le problème d'estimation d'état des systèmes non linéaires reste sans solution dans un grand nombre de cas et cela, malgré les nombreuses méthodes proposées dans ce sens.

Une des classes les plus connues des observateurs robustes est celle des observateurs mode glissant, ce type d'observateur est basé sur la théorie des systèmes à structure variable. Ces derniers ont de bonnes propriétés de robustesse vis-à-vis des erreurs paramétriques et des perturbations bornées[3].

Notre mémoire aborde la conception de l'observateur mode glissant pour des systèmes non linéaires. Il s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente quelques concepts généraux sur l'observabilité et les observateurs des systèmes linéaires et non linéaires.

Le deuxième a pour objectif de présenter en détail les méthodes de synthèse des observateurs mode glissant.

Le troisième présente la conception d'un observateur mode glissant triangulaire pour la reconstruction d'état d'un système de pompage présenté par un modèle d'état non linéaire.

Le dernier chapitre de se mémoire concerne l'analyse de l'observabilité et la synthèse d'un observateur mode glissant non linéaire pour l'estimation de la vitesse et la position d'une machine synchrone à aimants permanents présentée par un modèle d'état fortement non linéaire.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE I

Observabilité et observateur

I.1. Introduction

La mise en œuvre des lois de commande basées sur le modèle mathématique du système repose implicitement sur l'hypothèse que tout l'état est connu à chaque instant.

Pour des raisons technologiques (de matériel, de réalisabilité, etc), de fiabilité (panne des éléments de mesure) ou encore économiques (coût des capteurs), dans de nombreuses applications la mesure de tout l'état n'est pas possible.

Il est alors nécessaire, à l'aide des variables d'entrées et de sorties du système de reconstruire les variables d'état non mesurées pour élaborer la commande. De ce fait, l'idée repose sur l'utilisation d'un observateur.

Un observateur est un système dynamique que l'on peut appeler capteur informatique, puisqu'il est souvent implanté sur ordinateur afin de reconstituer ou d'estimer en temps réel l'état courant d'un système, à partir des mesures disponibles, des entrées du système et une connaissance à priori du modèle [1].

Il nous permet alors de suivre l'évolution de l'état en tant qu'information sur le système.

Le besoin d'information sur l'état interne du système est motivé par le fait qu'elle est une étape importante voire indispensable à plusieurs niveaux [4] :

- La commande du procédé, qui nécessite obligatoirement la connaissance de son état interne.
- La surveillance du procédé, à travers les écarts entre le comportement de l'observateur et celui du procédé.
- La modélisation (identification) du procédé, au moyen de l'estimation des grandeurs constantes qui paramétrisent le modèle.

Ceci est illustré clairement par la figure I.1 [4]:

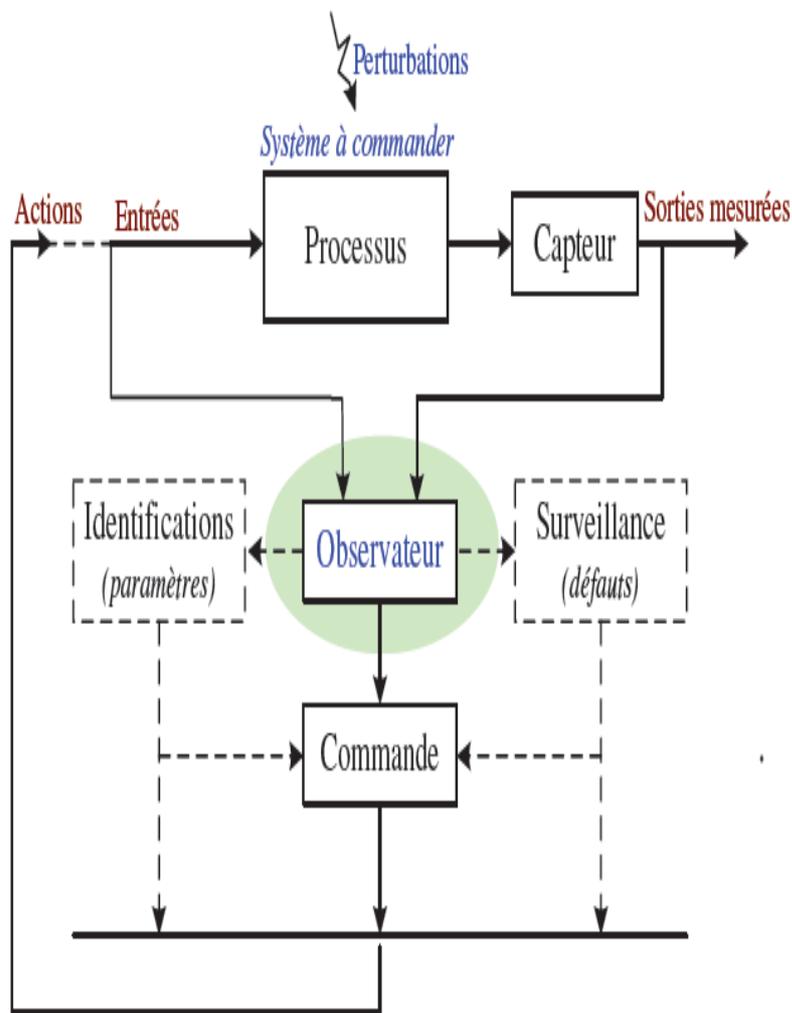


Figure I.1. Observateur : la partie essentielle dans la commande.

I.2. Observabilité des systèmes linéaires

Considérons le système linéaire suivant [5]:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

Où : $x \in \mathbf{R}^n$ représente le vecteur d'état.

$u \in \mathbf{R}^m$ est le vecteur d'entrée.

$y \in \mathbf{R}^p$ dénote le vecteur de sortie.

Les matrices A , B et C ont des dimensions appropriées.

Un observateur peut être réalisé si le système est observable, c'est-à-dire qu'il est possible de reconstruire son vecteur d'état $x(t)$ sur tout intervalle $[t_0, t_1]$ à partir de l'information disponible sur ses entrées $u(t)$ et ses sorties $y(t)$ [4].

La propriété d'observabilité du système linéaire (I.1) peut être formalisée de la façon suivante :

Définition 1 : Observabilité [6]

Le système (I.1) est observable si, étant donné l'instant t_0 , il existe un instant t_1 fini tel que la connaissance de $y(t_0, t_1)$ et $u(t_0, t_1)$ permette de déterminer de manière unique l'état $x(t_0) = x_0$ et ceci quelque soit l'entrée du système.

Définition 2 : Reconstructibilité [6]

Un état x_1 est dit reconstructible à l'instant t_1 si, quelque soit $u(t)$, il existe $t_0 \leq t_1$ tel que la connaissance de $u(t)$ et de $y(t)$ avec $t \in [t_0, t_1]$ permette de déterminer $x_1 = x(t_1)$.

Si tout état est reconstructible à l'instant t_1 , le système est dit complètement reconstructible.

On remarque clairement que dans la première définition (observabilité), le problème est de retrouver la condition initiale de l'état $x(t_0) = x_0$ à partir d'informations postérieures à celle-ci. Par contre dans la deuxième définition (Reconstructibilité) le problème est de déterminer l'état à partir d'informations antérieures à celle-ci.

Une fois l'état initial est retrouvé, on peut estimer facilement l'état à tout instant ce qui nous permet facilement de concevoir la loi de commande du processus.

Pour tester l'observabilité du système (I.1), on peut appliquer le test du rang de la matrice d'observabilité, définie comme suit [5] :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (I.2)$$

La condition du rang utilisée pour étudier l'observabilité est définie comme suit :

Définition 3 : Condition du rang [5]

L'observabilité du système (I.1) est garantie si le rang de la matrice d'observabilité O est égal à n . On dit alors que la paire (C, A) est observable.

Une fois l'observabilité du système linéaire (I.1) est garantie par l'application de la condition du rang, il est possible de lui construire un observateur tel que celui de type Luenberger.

I.3. Observateur des systèmes linéaires

Une solution simple et optimale au problème de l'estimation de l'état des systèmes linéaires a été proposée par Luenberger dans le cadre déterministe, et par Kalman dans le cadre stochastique. Dans les deux cas, on considère le modèle dynamique du système linéaire défini par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Lw(t) \\ y = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (I.3)$$

Où : $x \in R^n$ représente le vecteur d'état.

$u \in R^m$ est le vecteur d'entrée.

$y \in R^p$ dénote le vecteur de sortie.

Les matrices A , B et C ont des dimensions appropriées.

$w(t) \in R^r$ et $v(t) \in R^p$ sont deux bruits blancs gaussiens d'espérance nulle, de covariances respectives Q et R .

Ces bruits sont supposés non corrélés.

Les conditions initiales sont définies par $x(0) = x_0$.

I.3.1. Observateur de Luenberger[7][8]

La théorie de l'observation de Luenberger repose essentiellement sur des techniques de placement de pôles. On se place dans le cas déterministe, ou les bruits w et v sont nuls, Luenberger propose l'observateur suivant pour le système (I.3) :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (I.4)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ a pour expression :

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) \quad (I.5)$$

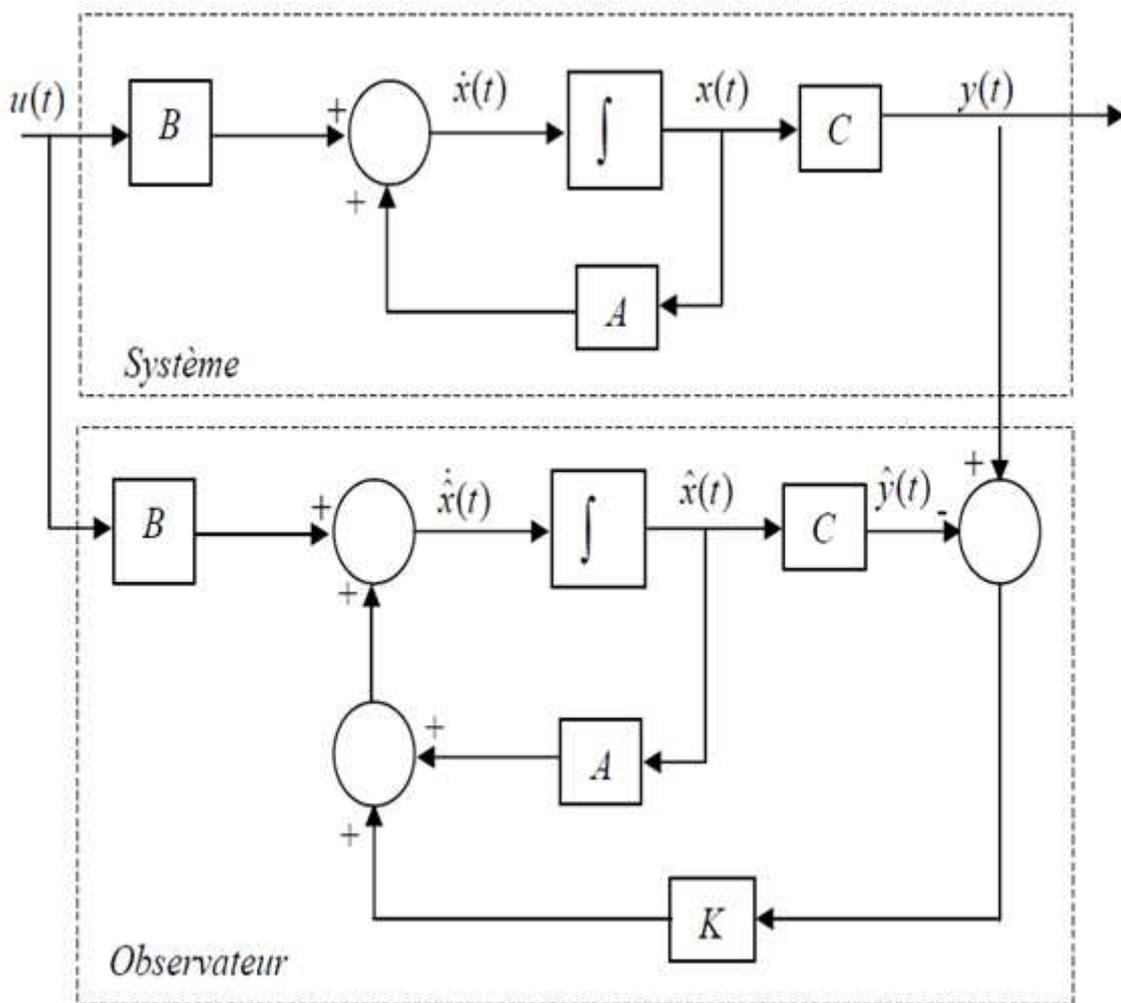


Figure I.2. Schéma structural de l'observateur de Luenberger

En utilisant une technique de placement de pôles, il suffit alors de choisir le gain K de l'observateur de telle sorte que les valeurs propres de la matrice $A-KC$ soient dans le demi plan complexe gauche.

Pour ce type d'observateur, une grande liberté est laissée au choix des valeurs propres, mais en pratique on choisit une dynamique d'erreur plus rapide que celle du processus.

Cependant, on ne peut les prendre infiniment grandes parce que on ne peut utiliser que des gains réalisables et l'augmentation de la bande passante du reconstituteur ne permet plus de négliger les bruits qui deviennent prépondérants en hautes fréquences.

Il faut noter qu'en présence des bruits w, v la dynamique de l'erreur est :

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) + Lw(t) - Kv(t) \quad (\text{I.6})$$

Cette erreur est donc sensible aux bruits par l'intermédiaire des deux fonctions de transfert $(sI - A + KC)^{-1}L$ et $(-sI + A - KC)^{-1}K$.

L'étude du gain fréquentiel permet de quantifier l'influence des bruits sur l'erreur d'observation.

I.3.2. Filtre de Kalman[9]

La théorie de l'observation de Kalman nécessite la résolution d'une équation de Riccati . Kalman utilise les propriétés statistiques des bruits w et v et propose la structure d'observateur suivante :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (\text{I.7})$$

En minimisant la matrice de covariance de l'erreur d'estimation $P = E[e(t)e(t)^T]$, on obtient l'expression du gain de l'observateur :

$$K = PC^T R^{-1} \quad (\text{I.8})$$

P est solution de l'équation de Riccati :

$$AP + PA - PC^T R^{-1} CP + LQL^T = 0 \quad (\text{I.9})$$

Sous certaines conditions, on peut montrer que la matrice P tend vers une limite et que le filtre est stable, ce qui permet éventuellement de conserver pour K sa valeur en régime permanent.

I.4. Observabilité des systèmes non linéaires

Les processus physiques sont très souvent représentés par des modèles non linéaires décrits sous la forme suivante (représentation d'état explicite) [10]:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y = h(x(t)) \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

Où :

$x \in R^n$ représente le vecteur d'état.

$u \in R^m$ est le vecteur d'entrée ou la commande.

$y \in R^p$ dénote le vecteur de sortie.

Les fonctions f et h sont des champs de vecteurs supposés suffisamment continûment dérivables sur x .

L'entrée u est localement bornée et mesurable.

L'observabilité du système non linéaire (I.10) est caractérisée par le fait qu'à partir de la sortie mesurée, il faut être capable de discerner les différents états initiaux. L'observabilité est donc définie à partir de la notion d'indiscernabilité dont voici la définition [10].

Définition 4 : Indiscernabilité [4]

Deux états initiaux $x(t_0) = x_1$ et $x(t_0) = x_2$ du système non linéaire (I.10) sont dits indiscernables sur l'intervalle de temps $[t_0, t_1]$ si, pour toute entrée $u(t)$, leurs sorties respectives $y_1(t)$ et $y_2(t)$ sont identiques sur cet intervalle.

Cette notion d'indiscernabilité de deux états initiaux nous permet de donner la définition suivante de l'observabilité :

Définition 5 : Observabilité [6]

Le système (I.10) est dit observable s'il n'existe pas de couple d'états initiaux distincts $\{x(t_0) = x_1, x(t_0) = x_2\}$ indiscernables.

Il faut noter aussi que l'observabilité dépend souvent de l'entrée, parce que certaines entrées u ne permettent pas de discerner tout couple d'états initiaux distincts, cela est le cas de l'exemple suivant [4]:

Considérons le système décrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = ux \\ y = x \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

Avec : $x \in R$

Le système (I.11) est observable pour toute entrée constante différente de 0. Donc on ne peut pas construire un observateur qui fonctionne avec ou au voisinage de l'entrée $u = 0$.

La conception d'un observateur nécessite sans doute un regard sur les entrées du système.

Considérons le système non linéaire (I.10), il existe en général des entrées dites singulières, pour lesquelles le système n'est pas observable. La recherche de ces entrées pour un système donné est encore un problème largement ouvert.

Définition 6 : Entrée universelle [6]

Une fonction d'entrée u est dite universelle pour le système (I.10) sur l'intervalle $[0, t]$ si tout couple d'états initiaux distincts peut être discernable sur l'intervalle $[0, t]$, lorsque le système est excité par u .

Définition 7 : Entrée singulière [4]

Une entrée non universelle sera dite entrée singulière.

Dans le cas où le système est dépourvu d'entrées singulières, il est appelé système uniformément observable.

Définition 8 : Système uniformément observable [4]

Un système dont toutes les entrées sont universelles est dit uniformément observable, c'est-à-dire, observable pour toute entrée u .

En général, contrairement aux systèmes linéaires, l'observabilité d'un système non linéaire ne suffit pas pour la synthèse d'un observateur. Une telle synthèse doit prendre en compte le problème des entrées.

On constate que l'étude des propriétés des entrées pour un système physique donné est de grande importance pour la synthèse d'un observateur.

Définition 9 : Espace d'observabilité [11]

Considérons le système (I.10). L'espace d'observabilité, l'espace \mathcal{O} , est défini par le plus petit espace vectoriel contenant les sorties h_1, h_2, \dots, h_p et qui soit fermé sous l'opération de la dérivation de Lie par rapport au champ de vecteur $f(x, u)$, u étant fixe.

On note $d\mathcal{O}$ l'espace des différentielles des éléments de \mathcal{O} .

Définition 10[11]

L'espace $d\mathcal{O}(x_0)$ (c'est-à-dire évalué en x_0) caractérise l'observabilité faible locale en x_0 du système (I.10).

Le système (I.10) est dit satisfaisant la condition de rang d'observabilité en x_0 si $\dim\mathcal{O}(x_0) = n$.

Le système (I.10) satisfait la condition de rang d'observabilité si, pour tout $x \in R^n$ $\dim\mathcal{O}(x) = n$.

Définition 11 : Espace d'observabilité générique [11]

Soit le système (I.10), l'espace d'observabilité générique est défini par :

$$\mathcal{O} = (\text{Span}_K dx) \cap [(\text{Span}_K du^{(v)}) + (\text{Span}_K dy^{(w)})] \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$$v \geq 0$$

$$w \geq 0$$

K est l'ensemble des fonctions méromorphes.

Le système (I.10) est génériquement observable si et seulement si :

$$\dim\mathcal{O} = n.$$

Supposons que la condition de rang d'observabilité générique soit satisfaite. On peut alors vérifier :

$$\text{rang}_K \begin{bmatrix} dy \\ d\dot{y} \\ \vdots \\ dy^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (\text{I.13})$$

Un critère seulement suffisant pour l'observabilité locale est :

Le jacobien $\frac{\partial(y, \dots, y^{(n-1)})}{\partial(x_1, \dots, x_n)}$ est de rang plein.

I.5. Observateur des systèmes non linéaires

Une fois l'observabilité du système non linéaire (I.10) est assurée, on passe à la synthèse de l'observateur.

La plupart des observateurs synthétisés pour les systèmes non linéaires et qui existent dans la littérature ont la structure suivante [1] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \eta(y, \hat{x}) \\ y = h(x(t)) \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

C'est-à-dire une copie du modèle plus un terme correcteur $\eta(y, \hat{x})$ qui établit la convergence de l'état estimé \hat{x} vers l'état réel x en un temps fini.

En général le gain d'observation et la stabilité de l'observateur synthétisé pour les systèmes non linéaires dépendent de l'entrée [6].

La synthèse des observateurs pour les systèmes non linéaires reste un sujet encore ouvert pour la recherche.

I.5.1. Observateur de Luenberger étendu [8]

L'observateur de Luenberger étendu intervient, soit au niveau du système original avec un gain constant, soit par le biais d'un changement de coordonnées avec un gain dépendant de l'état à estimer.

Dans le premier cas un modèle linéarisé est nécessaire, et le gain de l'observateur est calculé par placement de pôles. Ce type d'observateur ne peut être utilisé que lorsque on est sûr que l'état restera au voisinage de l'état d'équilibre.

Pour cette raison, l'utilisation de cet observateur peut être compromise par les instabilités qui peuvent se révéler si l'on s'éloigne du point de fonctionnement.

Dans le deuxième cas, les méthodes de changement de coordonnées ne concernent qu'une classe restreinte de systèmes non linéaires.

En effet, beaucoup d'approches utilisant les changements de coordonnées nécessitent l'intégration d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires, ce qui est souvent très délicat à réaliser. De ce fait, l'utilisation de solutions approchées est envisageable.

I.5.2. Filtre de Kalman étendu [8]

Le filtre de Kalman étendu est l'une des techniques d'estimation les plus populaires et largement étudié dans le domaine d'estimation d'état des systèmes dynamiques non linéaires.

Ce filtre étendu consiste à utiliser les équations du filtre de Kalman standard au modèle non linéaire linéarisé par la formule de Taylor au premier ordre.

Ce filtre étendu a été appliqué avec succès sur différents types de procédés non linéaires.

Malheureusement, les preuves de stabilité et de convergence établies dans le cas des systèmes linéaires, ne peuvent être étendues de manière générale au cas des systèmes non linéaires.

Une des classes les plus connues des observateurs robustes des systèmes physiques non linéaires est celle des observateurs modes glissants qu'on va étudier en détail dans le chapitre suivant (chapitre II) [12].

I.6. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base relatives à l'observabilité et aux observateurs des systèmes linéaires et non linéaires.

On a expliqué clairement l'étude de l'observabilité des systèmes linéaires par l'utilisation du critère de rang appliqué sur la matrice d'observabilité ensuite on a mis en évidence la synthèse d'un observateur de Luenberger et un filtre de Kalman pour un système linéaire observable.

Nous avons, d'autre part étudié l'observabilité des systèmes non linéaires et on a signalé clairement la dépendance de cette observabilité vis-à-vis de l'entrée du système.

Dans le chapitre suivant on va s'intéresser à l'étude et la synthèse d'un observateur non linéaire mode glissant qui présente l'avantage d'être robuste aux incertitudes sur les paramètres du modèle.

CHAPITRE II

Observateur mode glissant

II.1. Introduction

La mise en œuvre des lois de commandes basées sur le modèle non linéaire du système, nécessite la connaissance du vecteur d'état complet du système à chaque instant. Cependant, dans la plupart des cas, seule une partie de l'état est accessible à l'aide des capteurs.

Pour reconstituer l'état complet du système, l'idée repose sur l'utilisation d'un capteur logiciel, appelé observateur.

Un observateur est un système dynamique qui à partir de l'entrée $u(t)$ du système (la commande), de la sortie $y(t)$ mesurée, ainsi que d'une connaissance à priori du modèle, fournira en sortie un état estimé $\hat{x}(t)$ qui devra tendre vers l'état réel $x(t)$.

Une des classes les plus connues des observateurs robustes est celle des observateurs mode glissant [3].

II.2. Conception d'un observateur mode glissant

Le principe des observateurs mode glissant consiste à contraindre, à l'aide des fonctions discontinues, les dynamiques d'un système d'ordre n à converger vers une variété s de dimension $(n-p)$ dite surface de glissement (p étant la dimension du vecteur de mesure) [3].

L'attractivité de cette surface est assurée par des conditions appelées conditions de glissement. Si ces conditions sont vérifiées, le système converge vers la surface de glissement et y évolue selon une dynamique d'ordre $(n-p)$.

Dans le cas des observateurs mode glissant, les dynamiques concernées sont celles des erreurs d'observation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$.

A partir de leurs valeurs initiales $e(0)$, ces erreurs convergent vers les valeurs d'équilibre en deux étapes :

Dans une première phase, la trajectoire des erreurs d'observation évolue vers la surface de glissement sur laquelle les erreurs entre la sortie de l'observateur et la sortie du système réel (les mesures) $e_y = y - \hat{y}$ sont nulles.

Cette étape qui est généralement très dynamique est appelée mode d'atteinte.

Dans la seconde phase, la trajectoire des erreurs d'observation glisse sur la surface de glissement avec des dynamiques imposées de manière à annuler toutes les erreurs d'observation.

Ce dernier mode est appelé mode de glissement.

Considérons un système d'état non linéaire d'ordre n :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où :

$x \in R^n$ représente le vecteur d'état.

$u \in R^m$ est le vecteur d'entrée ou la commande.

$y \in R^p$ dénote le vecteur de sortie.

Les fonctions f et h sont des champs de vecteurs supposés suffisamment continûment dérivables sur x .

L'entrée u est localement bornée et mesurable.

L'observateur mode glissant est défini avec la structure suivante [13] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - K \text{sign}(\hat{y} - y) \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où :

K est la matrice de gain de dimension $(n-p)$.

On remarque que l'observateur obtenu est une copie du modèle du système plus un terme correcteur qui établit la convergence de \hat{x} vers x .

La surface de glissement dans ce cas est donnée par :

$$s(x) = y - \hat{y} \quad (\text{II.3})$$

Le terme de correction utilisé est proportionnel à la fonction discontinue sign appliquée à l'erreur de sortie où la fonction $\text{sign}(x)$ est définie par [13] :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

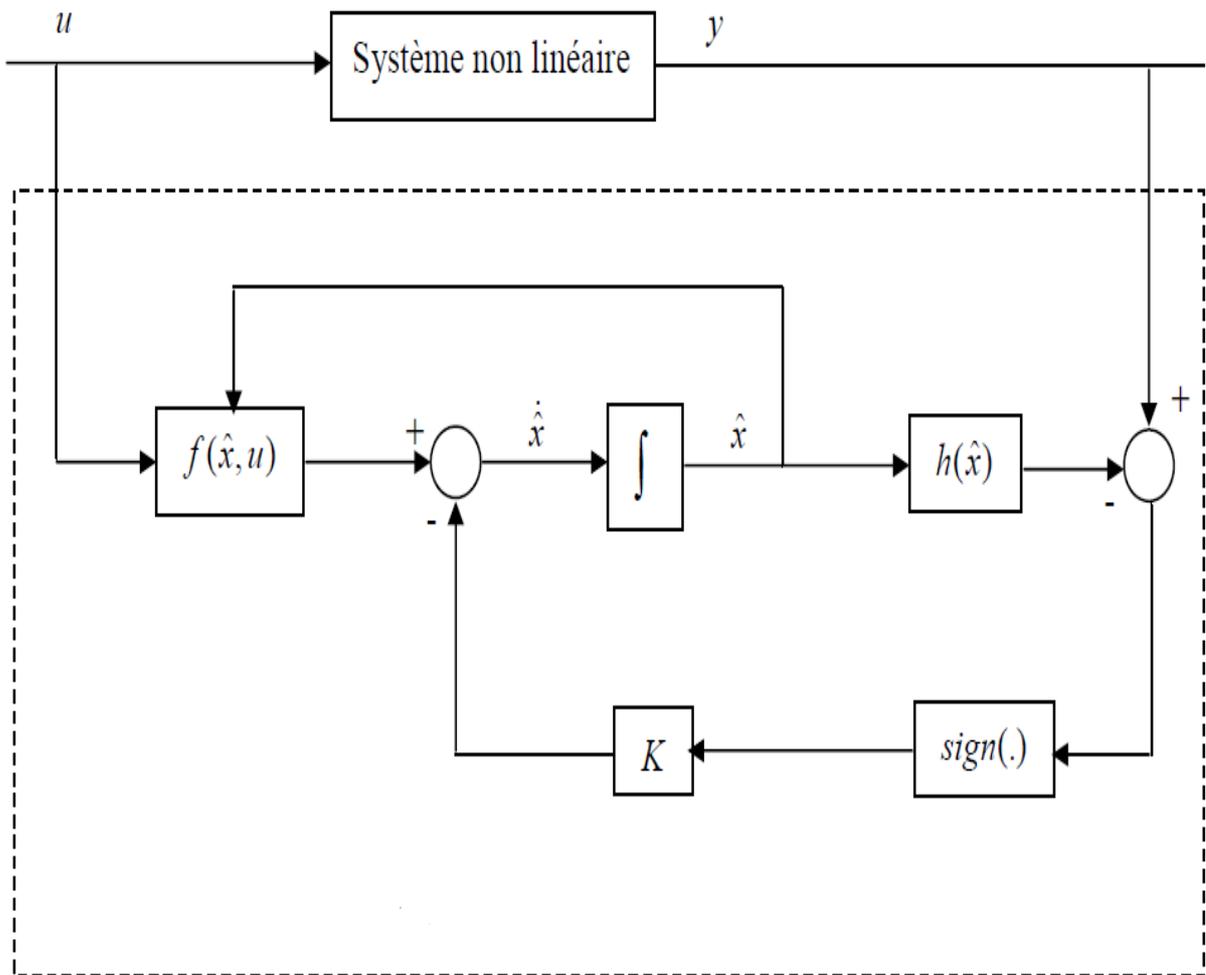


Figure II.1. Schéma fonctionnel d'un observateur mode glissant

Pour que l'état estimé converge vers l'état réel, l'observateur mode glissant doit respecter deux conditions :

La première condition concerne le mode d'atteinte et garantit l'attractivité de la surface de glissement $S=0$ de dimension p .

La surface de glissement est attractive si la fonction de Lyapunov $V(x) = S^T \times S$ vérifie la condition : $\dot{V}(x) < 0$ si $S \neq 0$.

La deuxième concerne le mode glissant, durant cette étape, la matrice des gains correctifs agit de manière à satisfaire la condition d'invariance suivante :

$$\begin{cases} \dot{S} = 0 \\ S = 0 \end{cases}$$

Durant ce mode, les dynamiques du système sont réduites et le système d'ordre n devient un système équivalent d'ordre $(n-p)$. Ces critères permettent la synthèse de l'observateur mode glissant et déterminent son fonctionnement [14].

II.3. observateur mode glissant des systèmes linéaires [8]

Considérons le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Où : $x \in R^n$ représente le vecteur d'état.

$u \in R^m$ est le vecteur d'entrée.

$y \in R^p$ dénote le vecteur de sortie.

Les matrices A , B et C ont des dimensions appropriées.

On suppose que la paire (A, C) est observable.

La reconstruction des variables d'état est basée sur les sorties mesurées, un changement de coordonnées peut être effectué pour que les sorties apparaissent directement comme des composantes du vecteur d'état. Sans perte de généralité la matrice de sortie peut être réécrite comme suit :

$$C = [C_1 \ C_2]$$

Avec:

$$C_1 \in R^{p \times (n-p)}$$

$$C_2 \in R^{p \times p}$$

Et le déterminant de C_2 est non nul.

En respectant ces conditions, une matrice de transformation non singulière T permet de réécrire respectivement les matrices de sortie, d'état et de commande dans les nouvelles coordonnées comme suit :

$$\tilde{C} = CT^{-1} = [0 \ I_p]$$

$$\tilde{A} = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B} = TB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} I_{n-p} & 0 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix}$$

Le système linéaire (II.5) peut donc être mis sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}y(t) + B_1u(t) \\ \dot{y} = A_{21}x_1(t) + A_{22}y(t) + B_2u(t) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = Tx(t)$$

$$x_1(t) \in R^{n-p}$$

L'observateur mode glissant proposé pour ce type de système est :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{y}(t) + B_1u(t) + LK\text{sign}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \\ \dot{\hat{y}} = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{y}(t) + B_2u(t) - K\text{sign}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$L \in R^{(n-p) \times p}$ est le gain de l'observateur.

$$K > 0$$

$\hat{y}_i(t)$ et $y_i(t)$ sont respectivement les composantes des vecteurs $\hat{y}(t)$ et $y(t)$.

Les erreurs d'estimation d'état et de sortie sont données par :

$$\begin{cases} e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t) \\ e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

A partir des équations (II.6), (II.7) et (II.8), la dynamique des erreurs d'estimation s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}e_y(t) + LK\text{sign}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}e_y(t) - K\text{sign}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

La paire (A_{11}, A_{21}) est observable car la paire (A, C) est observable. Par conséquent, le gain L peut être choisi tel que les valeurs propres de la matrice $A_{11} + LA_{21}$ soient dans le demi-plan gauche du plan complexe.

Exemple

On considère un système linéaire dont les matrices d'état de commande et de sortie sont :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 1]$$

Ce système est observable parce que le rang de la matrice $\begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}$ est égale à 2.

Pour une entrée $u = 0$ et avec un changement de coordonnées par la matrice $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ nous obtenons :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C} = [0 \ 1]$$

L'observateur mode glissant proposé pour ce système est:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = -\hat{x}_1(t) + \hat{y}(t) + LK\text{sign}(\hat{y}(t) - y(t)) \\ \dot{\hat{y}} = -3\hat{x}_1(t) + \hat{y}(t) - K\text{sign}(\hat{y}(t) - y(t)) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Pour des gains $K = 1$ et $L = 0.57$ les résultats de simulation sous matlab Simulink sont représentés dans les figures II.2 et II.3.

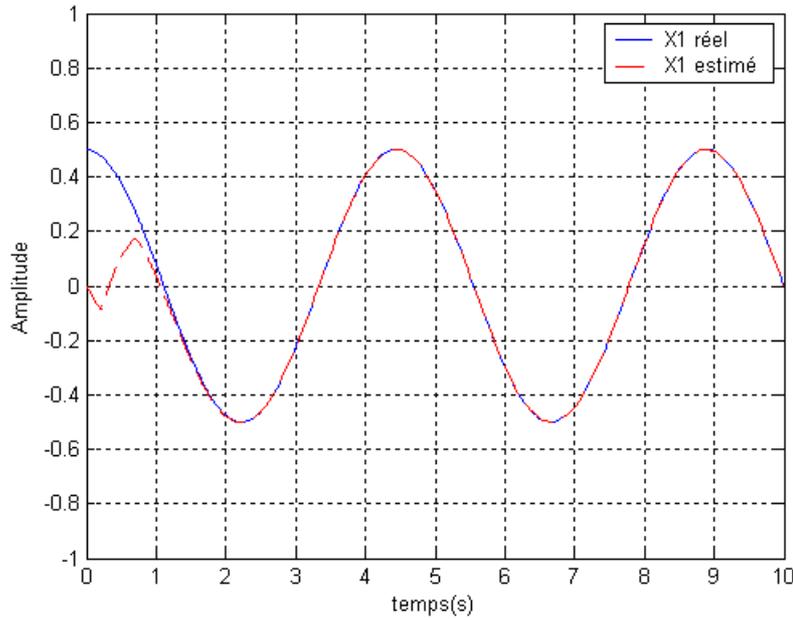


Figure II.2. L'état x_1 et leur estimé

Sur cette courbe, on remarque que la variable d'état estimée \hat{x}_1 est complètement confondue avec la variable d'état réelle x_1 après un temps fini, ce qui signifie que l'observateur conçu converge.

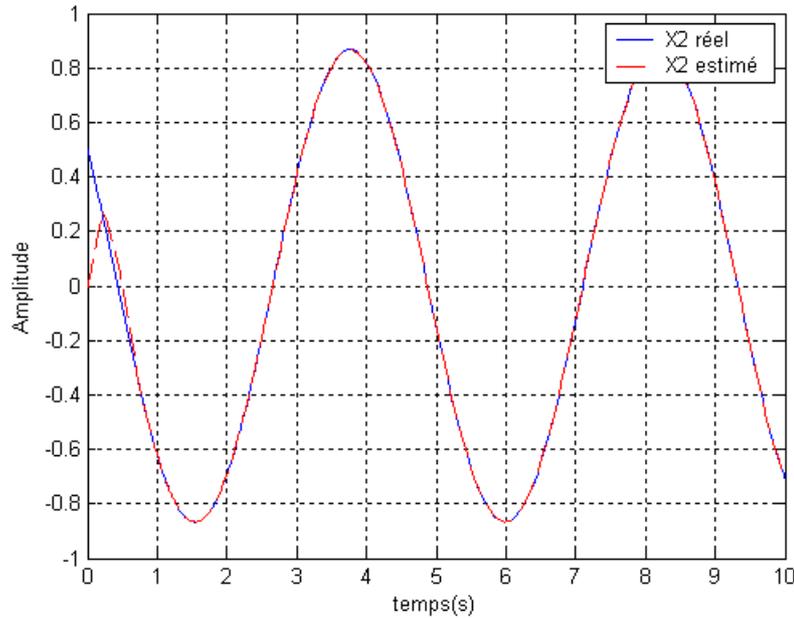


Figure II.3. L'état x_2 et leur estimé

Sur cette courbe, on remarque que la variable d'état estimée \hat{x}_2 est complètement confondue avec la variable d'état réelle x_2 après un temps fini, ce qui signifie que l'observateur conçu converge.

II.4. Observateur triangulaire mode glissant [1][12]

L'observateur triangulaire mode glissant a été développé pour des systèmes qui peuvent se mettre sous la forme suivante appelée forme triangulaire d'observation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \\ y = x_1 \end{array} \right. = \left(\begin{array}{l} x_2 + g_1(x_1, u) \\ x_3 + g_2(x_1, x_2, u) \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, u) \\ f_n(x) + g_n(x, u) \end{array} \right) \quad (\text{II.11})$$

Où les g_i et f_n pour $i=1,2,\dots, n$ sont des fonctions analytiques, $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in R^n$ l'état du système, $u \in R^m$ est le vecteur d'entrée et $y \in R$ la sortie.

La structure de l'observateur proposé est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{n-1} \\ \dot{\hat{x}}_n \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \hat{x}_2 + g_1(x_1, u) + \lambda_1 \text{sign}_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{x}_3 + g_2(x_1, \bar{x}_2, u) + \lambda_2 \text{sign}_2(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \\ \vdots \\ \hat{x}_n + g_{n-1}(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-1}, u) + \lambda_{n-1} \text{sign}_{n-1}(\bar{x}_{n-1} - \hat{x}_{n-1}) \\ f_n(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + g_n(x_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u) + \lambda_n \text{sign}_n(\bar{x}_n - \hat{x}_n) \end{array} \right) \\ \hat{y} = \hat{x}_1 \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

Où les variables \bar{x}_i sont données par :

$$\bar{x}_i = \hat{x}_i + \lambda_{i-1} \text{sign}_{\text{moy}, i-1}(\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1})$$

Avec $\text{sign}_{\text{moy}, i-1}$ désignant la fonction sign_{i-1} filtrée par un filtre passe bas ; la fonction $\text{sign}_i(\cdot)$ est mise à zéro s'il existe $j \in \{1, i-1\}$ tel que $\bar{x}_j - \hat{x}_j \neq 0$ (par définition $\bar{x}_1 = x_1$), si non $\text{sign}_i(\cdot)$ est prise égale à la fonction $\text{sign}(\cdot)$ classique. Grâce à cela nous imposons que le terme correcteur ne soit "actif" que si la condition $\bar{x}_j - \hat{x}_j = 0$ pour $j = 1, 2, \dots, i-1$ est vérifiée.

Il existe un choix de λ_i tel que l'état de l'observateur \hat{x} converge en un temps fini vers l'état x du système.

Considérons la dynamique de l'erreur d'observation $e = x - \hat{x}$ et procédons étape par étape.

Pour $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$, nous avons : $\dot{e}_1 = e_2 - \lambda_1 \text{sign}(e_1)$ avec : $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$.

Si $\lambda_1 > |e_2|_{\text{max}}$ pour $t < t_1$ alors la surface de glissement $e_1 = 0$ est attractive et est atteinte après un temps fini t_1 ce qui fait que $\dot{e}_1 = 0$.

Il existe une fonction continue notée sign_{eq} définie par : $e_2 - \lambda_1 \text{sign}_{eq}(e_1) = 0$ impliquant $\bar{x}_2 = x_2$ sur la surface de glissement, puisque $\text{sign}_{eq} = \text{sign}_{\text{moy}}$ alors :

$$\dot{e}_1 = x_2 - (\hat{x}_2 + \lambda_1 \text{sign}_{eq}(x_1 - \bar{x}_1)) = x_2 - \bar{x}_2 = 0$$

Une fois x_2 connu, nous allons passer à la dynamique de e_2 .

Nous avons après t_1 comme nous l'avons vu, $\bar{x}_2 = x_2$ ce qui implique que :

$$g_1(x_1, x_2) - g_2(x_1, \bar{x}_2) = 0.$$

Alors $\dot{e}_2 = e_3 - \lambda_2 \text{sign}(e_2)$, et suivant le même raisonnement si $\lambda_2 > |e_3|_{max}$ pour $t < t_2$ nous aurons après un temps fini $t_2 > t_1$ la convergence vers la surface $e_1 = e_2 = 0$.

La dynamique du reste de l'erreur d'observation sur la surface de glissement est donnée par $\dot{e}_2 = 0$ et on déduit donc $x_3 = \bar{x}_3$ car : $\dot{e}_2 = x_3 - (\hat{x}_3 + \lambda_2 \text{sign}_{eq}(x_2 - \bar{x}_2)) = x_3 - \bar{x}_3 = 0$.

En répétant $(n-1)$ fois ce processus, nous avons après un temps t_{n-1} convergence de toute l'erreur d'observation vers la surface $e_1 = e_2 = \dots = e_{n-1} = 0$ et par conséquent \bar{x} tend vers x , en un temps fini t_{n-1} tout l'état est connu et l'erreur d'observation est nulle.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié en détail les méthodes de conception de l'observateur mode glissant pour les systèmes linéaires et les systèmes type triangulaires et on a prouvé que la convergence de ce type d'observateur dépend essentiellement de la valeur du gain de l'observateur dont le choix reste une tâche difficile.

Dans le chapitre qui suit, on va réaliser un observateur non linéaire mode glissant pour estimer l'état complet d'un système physique de pompage qui possède une forme triangulaire non linéaire.

CHAPITRE III

Observateur mode glissant triangulaire pour un système de pompage

III.1. Introduction

Il existe une variété d'observateurs mode glissant non linéaires dont leur conception dépend essentiellement du modèle d'état représentant le système à étudier parmi les quels on peut citer l'observateur mode glissant triangulaire.

Un observateur mode glissant triangulaire a été développé pour des systèmes pouvant se mettre sous la forme, appelée forme triangulaire d'observation qu'on a déjà illustré dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre on va proposer la conception de ce type d'observateur pour estimer l'état complet d'un système de pompage qui doit être présenter par un modèle non linéaire triangulaire[15].

III. 2. Principe du système de pompage

Le système de pompage étudié est composé d'un convertisseur type " Buck ", d'un moteur et d'une pompe centrifuge, où l'entrée et la sortie du système sont respectivement, la tension de commande et la vitesse angulaire [1][15].

Le convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, il est aussi appelé hacheur abaisseur de tension.

Le moteur sera alimenté par la tension de sortie du convertisseur. Nous considérons un moteur à courant continu (MCC) à flux magnétique constant et nous négligeons la réaction magnétique d'induit et le phénomène de commutation.

La pompe utilisée sert à transmettre l'énergie cinétique du moteur au fluide.

III. 3. Modélisation du système dans l'espace d'état

Le schéma électrique du système de pompage est donné par la figure III.1

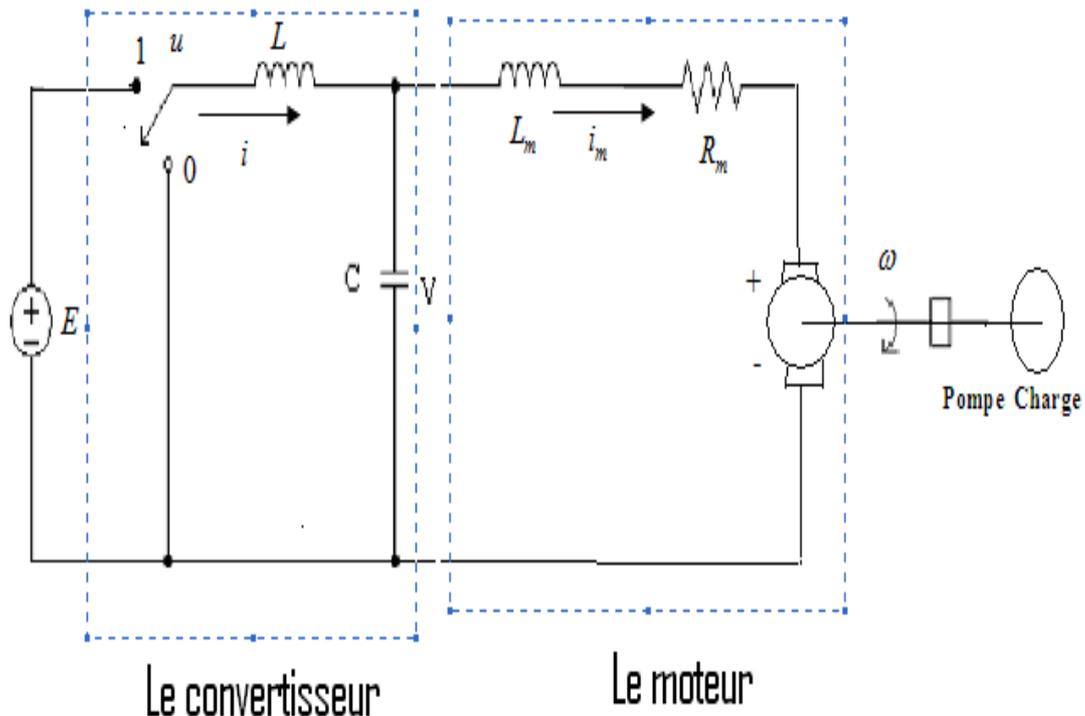


Figure III.1. Modèle du système de pompage.

Les équations électriques du convertisseur sont:

$$L \frac{di}{dt} = -V + uE \quad (\text{III.1})$$

Et :

$$C \frac{dV}{dt} = i - i_m \quad (\text{III.2})$$

Avec u dénote le rapport cyclique du convertisseur qui peut prendre des valeurs entre 0 et 1.

L'équation électrique du moteur est:

$$V = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} + K_e w \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$K_e w$ est la force contre électromotrice du moteur.

w est la vitesse de rotation du moteur en rad/s.

K_e (V/rad/s) est la constante du force contre électromotrice

L_m est l'inductance de l'enroulement de l'induit.

R_m est la résistance de l'enroulement de l'induit.

La pompe centrifuge oppose au moteur un couple résistant de la forme :

$$C_r = K_r w^2 \quad (\text{III.4})$$

Avec :

K_r est le Coefficient de proportionnalité en $N.m / (rad / s)^2$

L'équation dynamique du système électrique moteur-pompe est :

$$j \frac{dw}{dt} = -B_m w + K_m i_m - K_r w^2 \quad (\text{III.5})$$

Avec :

j est le moment d'inertie du groupe moteur-pompe exprimé en $Kg.m^2$.

B_m est le coefficient du frottement exprimé en (N.m/ rd).

K_m (N.m/A) est la constante du couple électrique.

$K_m i_m$ est le couple électrique du moteur.

Finalement, le modèle mathématique du système est le suivant:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -V + uE \\ C \frac{dV}{dt} = i - i_m \\ L_m \frac{di_m}{dt} = V - R_m i_m - K_e w \\ j \frac{dw}{dt} = -B_m w + K_m i_m - K_r w^2 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Si on pose :

x_1 égale à la vitesse du moteur exprimée en rad/s.

x_2 égale à la dérivé première de la vitesse du moteur.

x_3 égale à la dérivé seconde de la vitesse du moteur.

x_4 égale à la dérivé tertiaire de la vitesse du moteur

On aura :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + gu \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -(a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{14} x_1 x_4 + a_{23} x_2 x_3)$$

Et : $g = bE$

Les coefficients a_{ij} sont calculés à partir des équations suivantes :

$$a_1 = \frac{1}{jCLL_m} (K_e K_m + R_m B_m)$$

$$a_2 = \frac{B_m}{Cj} \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L} \right) + \frac{R_m}{CLL_m}$$

$$a_3 = \frac{1}{jL_m} (K_e K_m + R_m B_m) + \frac{1}{C} \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L} \right)$$

$$a_4 = \frac{B_m}{j} + \frac{R_m}{L_m}$$

$$a_{11} = \frac{R_m K_r}{jCLL_m}$$

$$a_{12} = \frac{2K_r}{Cj} \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L} \right)$$

$$a_{13} = \frac{2R_m K_r}{jL_m}$$

$$a_{14} = \frac{2K_r}{j}$$

$$a_{22} = \frac{2R_m K_r}{jL_m}$$

$$a_{23} = \frac{6K_r}{j}$$

$$b = \frac{K_m}{jCLL_m}$$

Les paramètres nominaux du modèle qu'on a choisi sont les suivants [1][15]:

Pour le moteur

DC moteur direct drive brushed type: 828500, de diamètre 42mm, et de puissance: $P = 42W$.

$$V_n = 12V, i_n = 4.25A, w_n = 324.47rad/s, L_m = 0.0275H.$$

$$R_m = 0.841\Omega, E = 24V, j = 0.14 \cdot 10^{-4}(\text{Kgm}^2), K_e = 0.0275(\text{V/rad/s}).$$

$$K_m = 2.541(\text{N.m/A}), B_m = 4.499 \cdot 10^{-5}(\text{N.m/rad}).$$

Pour le convertisseur statique

$$L = 75\text{mH}, C = 70\text{mF}.$$

Pour la pompe centrifuge

$$P_U = 3.2\text{KW}, w_n = 324.47\text{rad/s}, K_r = 9.5113 \cdot 10^{-7}\text{N.m}/(\text{rad/s})^2.$$

III. 4. Conception de l'observateur mode glissant triangulaire

Pour le modèle du système étudié l'observateur en mode glissant qui fait les erreurs observées tendent vers zéro en un temps fini peut être écrit comme suit:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + \lambda_2 \text{sign}(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \hat{x}_4 + \lambda_3 \text{sign}(\bar{x}_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 = f(x_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4) + gu + \lambda_4 \text{sign}(\bar{x}_4 - \hat{x}_4) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec:

$$\bar{x}_1 = x_1$$

$$\bar{x}_i = \hat{x}_i + \lambda_{i-1} \text{sign}_{\text{moy}}(\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1})$$

$$i = 2,3,4.$$

sign_{moy} est l'approximation continue de la fonction signe comme par exemple :

$$\text{sign}_{\text{moy}}(\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) = \text{arctg} \left[\frac{2}{\pi} (\bar{x}_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) \right]$$

III. 5. Convergence de l'observateur mode glissant triangulaire

La dynamique de l'erreur d'observation est :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \lambda_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{e}_2 = e_3 - \lambda_2 \text{sign}(\bar{x}_2 - \hat{x}_2) \\ \dot{e}_3 = e_4 - \lambda_3 \text{sign}(\bar{x}_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{e}_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) - f(x_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4) - \lambda_4 \text{sign}(\bar{x}_4 - \hat{x}_4) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Par le choix de $\lambda_1 > |e_2|_{\text{max}}$ nous obtenons la convergence de e_1 vers zéro après le temps t_1 .

Après le temps t_1 , l'état atteint la surface de glissement et sur cette surface nous avons :

$$e_1 = \dot{e}_1 = 0$$

Alors on a :

$$\bar{x}_2 = x_2.$$

De la même façon :

Par le choix de $\lambda_2 > |e_3|_{max}$ nous obtenons la convergence de e_2 vers zéro après le temps t_2 .

Par le choix de $\lambda_3 > |e_4|_{max}$ nous obtenons la convergence de e_3 vers zéro après le temps t_3 .

Par le choix de $\lambda_4 > 0$ nous obtenons la convergence de e_4 vers zéro après le temps t_4 .

III. 6. Résultats de simulation

La figure III.2 présente le schéma bloc utilisé dans la simulation.

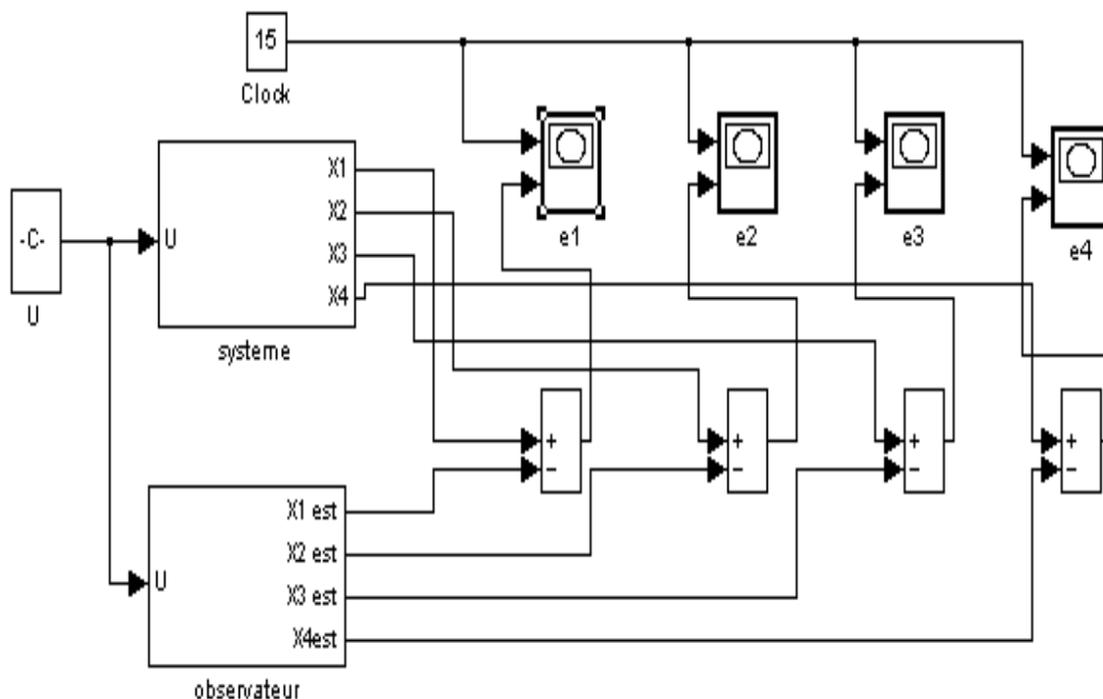


Figure III.2. Schéma bloc de la simulation

La simulation sous matlab/Simulink a donnée les résultats suivants :

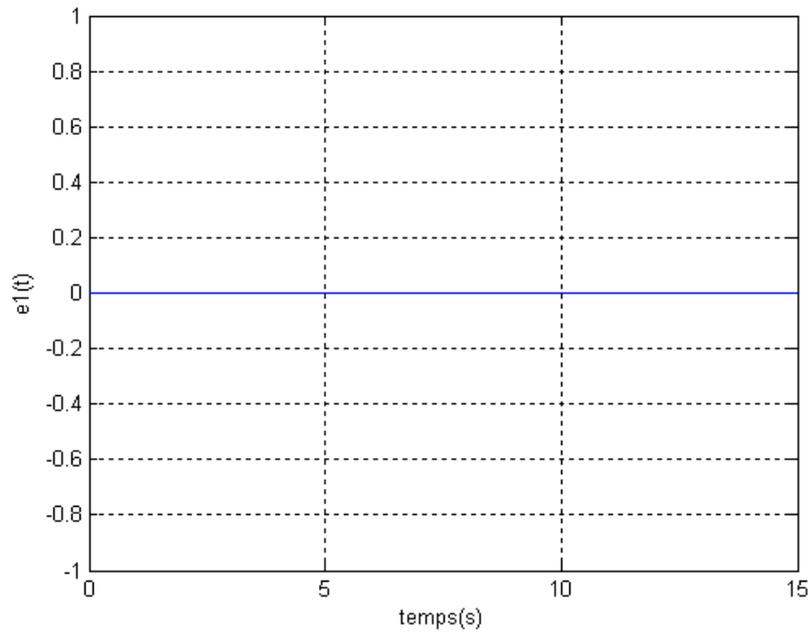


Figure III.3. Erreur d'observation $e_1(t)$.

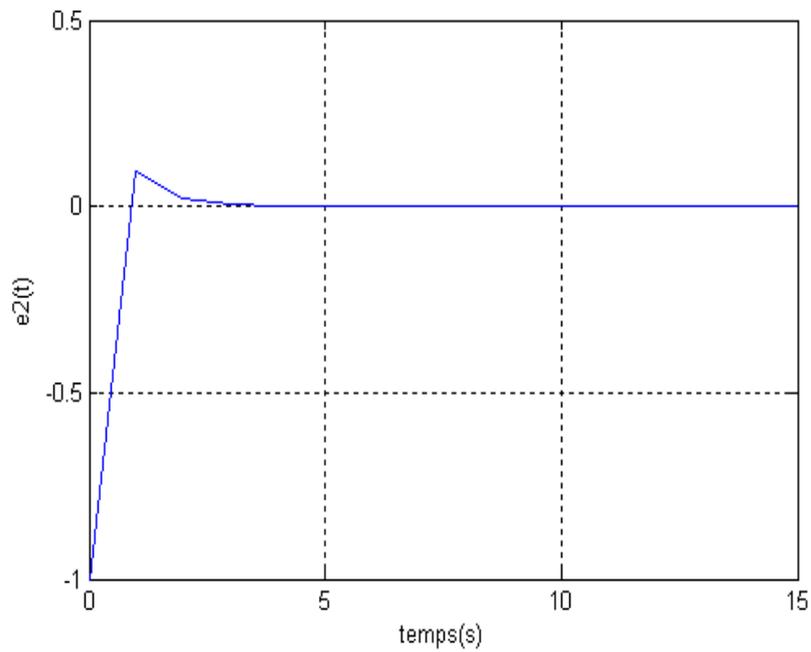


Figure III.4. Erreur d'observation $e_2(t)$.

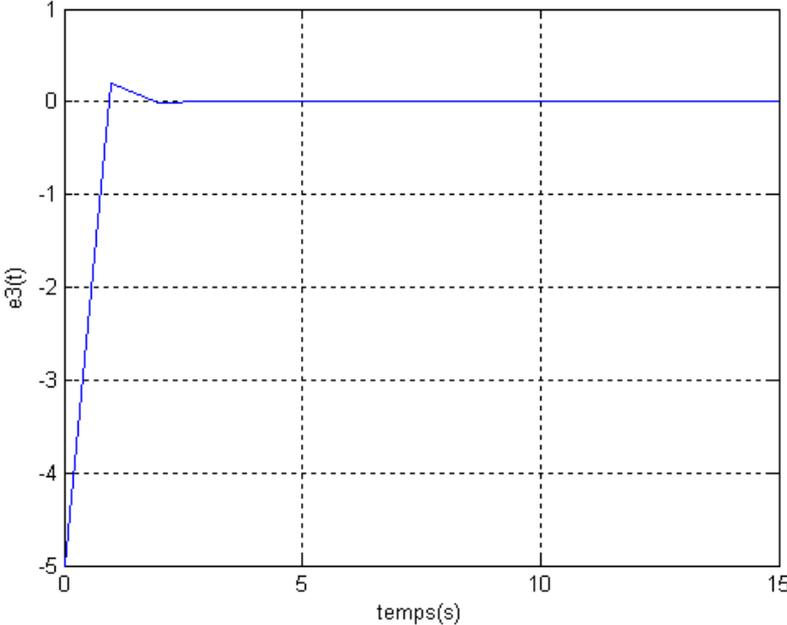
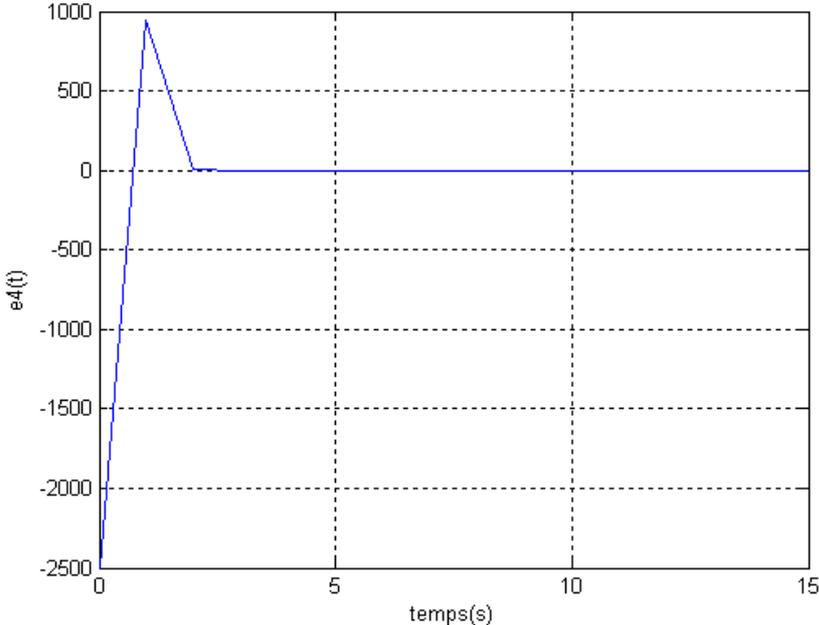


Figure III.5. Erreur d'observation $e_3(t)$.



Temps (s)

Figure III.6. Erreur d'observation $e_4(t)$.

Dans les figures III.3, III.4, III.5, III.6 on peut voir clairement les erreurs d'observation qui convergent tous vers zéro.

Les résultats obtenus montrent aussi l'efficacité et la robustesse de l'observateur mode glissant triangulaire appliqué sur le système de pompage proposé.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la réalisation d'un observateur mode glissant triangulaire non linéaire pour déterminer la dynamique des erreurs d'observation d'un système de pompage.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité et la robustesse de ce type d'observateur.

Les observateurs mode glissant ne sont pas utilisés uniquement pour les systèmes triangulaires mais ils peuvent être intégrés dans différents types des systèmes non linéaires et ceci est bien illustré dans le chapitre prochain qui présente de manière détaillée la conception d'un observateur non linéaire mode glissant pour la machine synchrone à aimants permanents pour estimer la vitesse de rotation ainsi que la position de ce système physique.

CHAPITRE IV

Conception d'observateur non linéaire mode glissant pour la machine synchrone à aimants permanents

IV.1. Introduction

Les machines à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor. C'est grâce à l'amélioration des qualités des aimants permanents plus précisément à l'aide des terres rares, au développement de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande non linéaire [11].

Les atouts de ce type de machine sont multiples, parmi lesquels nous pouvons citer : robustesse, faible inertie, couple massique élevé, rendement élevé, vitesse maximale supérieure et faible cout d'entretien [16].

Par ailleurs, les aimants permanents présentent des avantages indéniables : d'une part, le flux inducteur est créé sans pertes d'excitation et d'autre part, l'utilisation de ces matériaux va permettre de s'écarter notablement des contraintes usuelles de dimensionnement des machines et donc d'accroître la puissance massique de façon significative [17].

Ce type de machines peut être très utile dans de nombreuses applications, comme [11] :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives),
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste),
- les servomoteurs,
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous marins ;
- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolienne.

IV.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents [11]

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator.

Le stator est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électriques. Les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales

Le rotor se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation.

Les machines synchrones à aimants permanents peuvent être classées selon la forme de la force électromotrice sinusoïdale ou trapézoïdale.

En particulier, les machines synchrones à f.é.m. sinusoïdales sont classées en deux sous catégories selon la position des aimants :

1. Les machines à aimants permanents superficiels : les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène. Le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor.
2. Les machines à aimants permanents enterrés : les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances dépendent fortement de la position du rotor.

De plus, le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la priorité dans l'entraînement des charges rapides, et possèdent une robustesse mécanique élevée qui leur permet de travailler à des vitesses importantes.

La machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse et celle à rotor saillant sont bien représentées dans la figure IV.1 suivante :

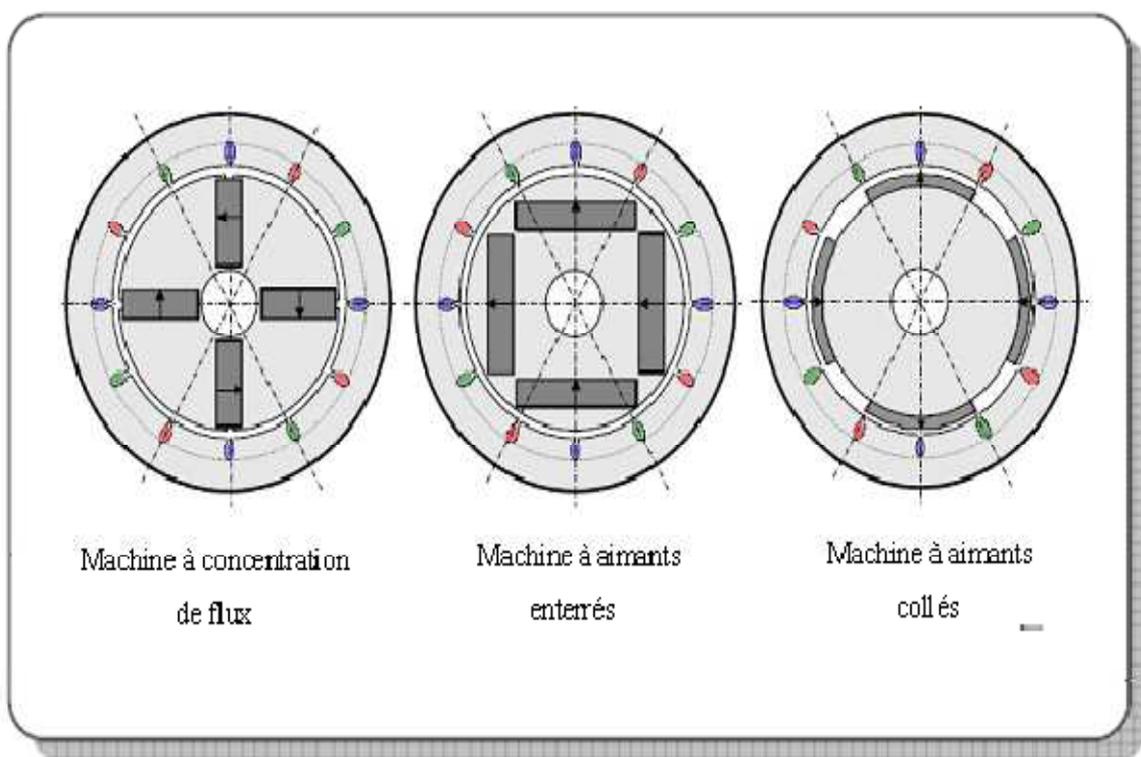


Figure IV.1. Les différents types de la machine synchrone à aimants permanents.

IV.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents [18]

La modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanents est identique à celle d'une machine synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu attachée au rotor est remplacée par le flux de l'aimant. Donc, le modèle est issu du modèle de la machine synchrone classique.

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) représentée par la figure IV.2 comporte un stator et un rotor de constitution symétrique avec une paire de pôle. Dans des encoches régulièrement réparties sur la surface interne du stator sont logés trois enroulements identiques, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à $(2\pi/3)$ et connectés en étoile à neutre isolé.

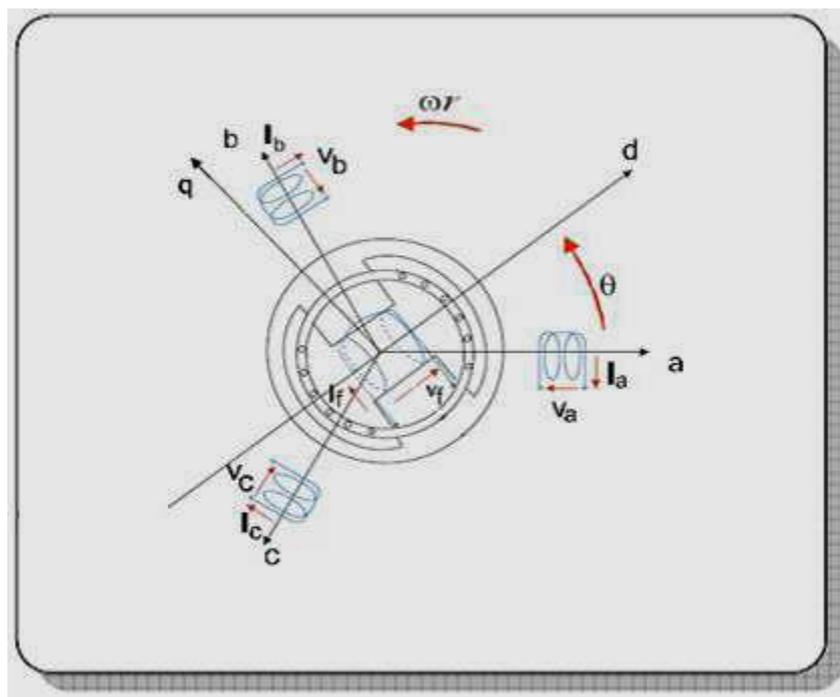


Figure IV.2. Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents

Pour une raison de simplification de la modélisation on prend en considération l'ensemble des hypothèses suivantes [18]:

- l'effet d'amortissement au rotor est négligé,
- le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé,
- la répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale,
- les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés,
- les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés,
- les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.

IV.3.1. Les équations électriques

Les équations triphasées des tensions statoriques sont :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 1})$$

Avec :

$[u_a \ u_b \ u_c]^t$ sont les tensions des phases statoriques.

R_s est la résistance statorique.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$ sont les courants des phases statoriques.

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$ sont les flux totaux statoriques.

Les flux totaux statoriques sont exprimés par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = [L_{ss}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_{af} \\ \varphi_{bf} \\ \varphi_{cf} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 2})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{af} \\ \varphi_{bf} \\ \varphi_{cf} \end{bmatrix} = \varphi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 3})$$

Où φ_f représente le flux induit par les aimants dans les enroulements statorique et θ est la position angulaire du rotor.

Pour les machines à pôles saillants, la matrice $[L_{SS}]$ qui se compose de termes variables et de termes constants s'écrit :

$$[L_{SS}] = [L_{SO}] + [L_{SV}]$$

Avec :

$$[L_{SO}] = \begin{bmatrix} L_{SO} & M_{SO} & M_{SO} \\ M_{SO} & L_{SO} & M_{SO} \\ M_{SO} & M_{SO} & L_{SO} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 4})$$

Et :

$$[L_{SV}] = L_{SV} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_e) & \cos\left(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta_e) \\ \cos\left(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta_e) & \cos\left(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 5})$$

Où :

$\theta_e = p\theta$ est la position électrique du rotor avec p est le nombre de paires de pôles.

Et :

Les constantes L_{SO} , L_{SV} et M_{SO} sont les inductances statoriques propres et mutuelle respectivement.

Afin de modéliser les machines triphasées, la transformation de Park est couramment utilisée pour obtenir l'expression des variables dans un repère tournant d-q.

Cette transformation rend les équations dynamiques des machines à courant alternatif plus simples, ce qui facilite leur étude et leur analyse [16] [17] [18].

Cette méthode se décompose en deux étapes :

1. Transformation Triphasé-Diphasé (dans un repère fixe) (Concordia),
2. Transformation Repère fixe-Repère tournant (Park).

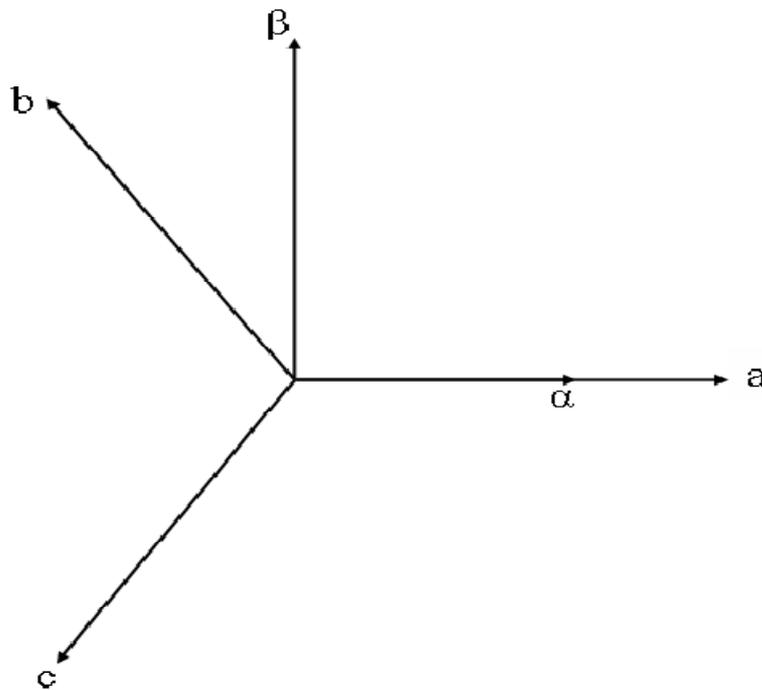


Figure IV.3. Transformation triphasé-diphasé (Transformation de Concordia).

Si on applique la première transformation (Concordia T_{32}) :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 6})$$

Avec :

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Et x peut être une variable réelle comme la tension, le courant et le flux, on obtient :

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_\alpha \\ \varphi_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 7})$$

Si on applique la deuxième transformation (Park $P(\theta_e)$) au système d'équations (IV. 7)

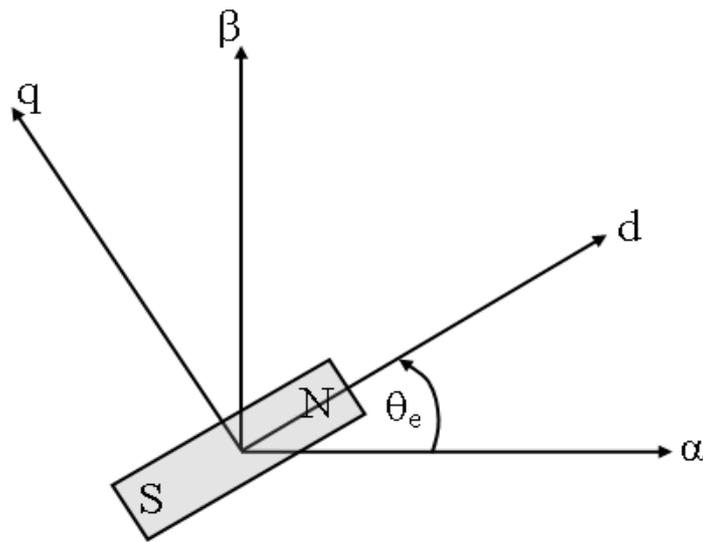


Figure IV.4. Transformation de Park

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\theta_e)^t \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 8})$$

Avec :

x peut être une variable réelle comme la tension, le courant et le flux.

$$P(\theta_e) = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \text{ est la matrice de Park.}$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} + w \begin{bmatrix} -\varphi_q \\ \varphi_d \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 9})$$

Avec :

u_d, u_q, i_d et i_q sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant.

φ_d et φ_q sont les composantes directe et en quadrature du flux.

w est la vitesse électrique du rotor.

Pour les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, φ_d et φ_q sont des fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \varphi_d = l_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = l_q i_q \end{cases} \quad (\text{IV. 10})$$

Avec :

l_d et l_q sont les inductances d'axes directe et en quadrature.

φ_f est le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

Si on remplace l'équation (IV. 10) dans l'équation (IV. 9), l'équation (IV. 11) est obtenue :

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + l_d \frac{di_d}{dt} - l_q w i_q \\ u_q = R_s i_q + l_q \frac{di_q}{dt} + w(l_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{IV. 11})$$

IV.3.2. Les équations mécaniques

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = (c_e - c_r - f\Omega) \quad (\text{IV. 12})$$

Avec :

$\Omega = \frac{w}{p}$ est la vitesse mécanique de rotation de la machine.

c_e est le couple électromagnétique.

c_r est le couple résistant.

j est le moment d'inertie.

p est le nombre de paires de pôles.

w est la vitesse électrique du rotor.

f est le coefficient de frottement visqueux.

IV.3.3. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.é.m. sinusoïdale peut être donné par la relation suivante :

$$c_e = p(\varphi_\alpha i_\beta - \varphi_\beta i_\alpha) = p(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$$

$$c_e = p((l_d - l_q)i_d + \varphi_f)i_q \quad (\text{IV. 13})$$

Dans le cas où la machine est à pôles lisses ($l_d = l_q$), le terme $p(l_d - l_q)i_d i_q$ formant le couple de réluctance est nul. L'équation du couple se simplifie en :

$$c_e = p\varphi_f i_q \quad (\text{IV. 14})$$

Par combinaison des équations électriques et des équations mécaniques, le modèle complet de la machine synchrone à aimants permanents peut être obtenu.

Pour présenter un modèle d'état, il faut définir le vecteur d'état x , le vecteur d'entrée u et le vecteur de sortie y . Le vecteur d'entrée est composé des tensions statoriques. Le vecteur d'état est constitué de grandeurs électriques (courants) et mécaniques (vitesse et/ou position).

IV.4. Modèle d'état dans le repère tournant (d – q)

Le modèle non linéaire d'état dans le repère tournant d-q est décrit par le système ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{l_d} i_d + \frac{p l_q}{l_d} i_q \Omega \\ \frac{-R_s}{l_q} i_q - \frac{p l_d}{l_q} i_d \Omega - \frac{p \varphi_f}{l_q} \Omega \\ \frac{p \varphi_f}{j} i_q - \frac{p(l_q - l_d)}{j} i_d i_q - \frac{f}{j} \Omega \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{l_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ c_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 15})$$

Si la machine synchrone à aimants permanents est à pôles lisses $l_d = l_q = l_s$ le modèle (IV. 15) sera plus simple comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{l_s} i_d + p i_q \Omega \\ \frac{-R_s}{l_s} i_q - p i_d \Omega - \frac{p \varphi_f}{l_s} \Omega \\ \frac{p \varphi_f}{j} i_q - \frac{f}{j} \Omega \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{l_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ c_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 16})$$

Le système d'équation décrivant le modèle d'état dans le repère tournant (d-q) est non linéaire. Ce modèle est non linéaire à cause des termes $i_d \Omega$, $i_q \Omega$ et c_r qui est supposé fonction non linéaire de Ω .

IV.5. Modèle d'état dans le repère fixe ($\alpha - \beta$)

Les variables électriques du modèle (IV. 16) sont décrites dans un repère tournant lié au rotor. Dans le cas d'une modélisation dans le repère fixe ($\alpha - \beta$), toutes les équations s'écrivent en fonction des nouvelles variables électriques i_α et i_β et des nouvelles entrées u_α et u_β ce qui conduit au modèle d'état non linéaire suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{A_\theta}{D} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{R_s A_\theta}{D} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{2 l_1 w B_\theta}{D} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{w \varphi_f (l_0 + l_1)}{D} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 17})$$

Avec :

$$l_0 = \frac{l_d + l_q}{2}$$

$$l_1 = \frac{l_d - l_q}{2}$$

$$l_{\alpha\beta} = l_1 \sin 2\theta_e$$

$$l_\alpha = l_0 + l_1 \cos 2\theta_e$$

$$l_\beta = l_0 - l_1 \cos 2\theta_e$$

$$A_\theta = \begin{bmatrix} l_\beta & -l_{\alpha\beta} \\ -l_{\alpha\beta} & l_\alpha \end{bmatrix}$$

$$B_\theta = \begin{bmatrix} -l_a & l_b \\ l_b & l_a \end{bmatrix}$$

$$l_a = l_0 \sin 2\theta_e$$

$$l_b = l_1 + l_0 \cos 2\theta_e$$

$$D = |A_\theta| = l_\alpha l_\beta - (l_{\alpha\beta})^2$$

Si la machine est à rotor lisse, son modèle sera :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{l_s} i_\alpha - \frac{e_\alpha}{l_s} & & & \\ & \frac{-R_s}{l_s} i_\beta - \frac{e_\beta}{l_s} & & \\ \frac{p\varphi_f}{j} (i_\beta \cos \theta_e - i_\alpha \sin \theta_e) - \frac{f}{j} \Omega & & & \\ & & \Omega & \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{l_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ c_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 18})$$

e_α et e_β sont les forces électromotrices avec :

$$\begin{cases} e_\alpha = -\varphi_f w \sin \theta_e \\ e_\beta = \varphi_f w \cos \theta_e \end{cases} \quad (\text{IV. 19})$$

IV.6. Observabilité de la machine synchrone à aimants permanents [11]

Il est évident que l'analyse de l'observabilité des systèmes linéaires est relativement simple. Par contre, cette analyse dans les cas non linéaires est complexe car l'observabilité peut dépendre de l'entrée du système et qu'il peut y avoir des singularités d'observation dans l'espace d'état.

La machine synchrone à aimants permanents est fortement non linéaire et l'analyse de son observabilité est basée sur le critère de rang d'observabilité générique.

IV.6.1. Observabilité de la machine avec mesure de vitesse et de position

Lorsque la vitesse et/ou la position est mesurée, le modèle de notre machine est réécrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{IV. 20})$$

Avec :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ c_r \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{l_d} x_1 + \frac{pl_q}{l_d} x_2 x_3 \\ \frac{-R_s}{l_q} x_2 - \frac{pl_d}{l_q} x_1 x_3 - \frac{p\varphi_f}{l_q} x_3 \\ \frac{p\varphi_f}{j} x_2 - \frac{p(l_q - l_d)}{j} x_1 x_2 - \frac{f}{j} x_3 \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Soit l'ensemble de fonctions $P_0(x)$ obtenu à partir des mesures de la façon suivante :

$$P_0(x) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 21})$$

Le jacobien $J_0(x)$ de $P_0(x)$ est :

$$J_0(x) = \frac{\partial(P_0(x))}{\partial(x)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 22})$$

Le déterminant D_0 de $J_0(x)$ est :

$$D_0 = 1$$

Le rang de la matrice $J_0(x)$ est égal à l'ordre du système et ce qui est une condition suffisante d'observabilité. La machine synchrone avec mesure de vitesse et/ou de position et de courants est donc localement observable.

IV.6.2. Observabilité de la machine sans mesure de vitesse et de position

L'analyse de l'observabilité sans mesure de vitesse ni position utilise le modèle suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{IV. 23})$$

Avec :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ c_r \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{l_d} x_1 + \frac{pl_q}{l_d} x_2 x_3 \\ \frac{-R_s}{l_q} x_2 - \frac{pl_d}{l_q} x_1 x_3 - \frac{p\varphi_f}{l_q} x_3 \\ \frac{p\varphi_f}{j} x_2 - \frac{p(l_q - l_d)}{j} x_1 x_2 - \frac{f}{j} x_3 \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Soit l'ensemble de fonctions $P_1(x)$ obtenu à partir des mesures de la façon suivante :

$$P_1(x) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 24})$$

Le jacobien $J_1(x)$ de $P_1(x)$ est :

$$J_1(x) = \frac{\partial(P_1(x))}{\partial(x)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-R_s}{l_d} & \frac{pl_q}{l_d} \Omega & \frac{pl_q}{l_d} i_q & 0 \\ \frac{-pl_d}{l_q} \Omega & \frac{-R_s}{l_q} & \frac{-pl_d}{l_q} i_d - \frac{p\varphi_f}{l_q} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 25})$$

Le déterminant de $J_1(x)$ est nul donc le système est non observable. Par conséquent, à partir du modèle dans le repère $(d - q)$, la machine synchrone à aimants permanents n'est pas observable et pour cette raison on va passer à l'analyse de l'observabilité de notre machine dans le repère fixe $(\alpha - \beta)$ à partir du modèle (IV. 17).

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \Omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 26})$$

$$u = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 27})$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 28})$$

$$P_2(x) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 29})$$

Le jacobien de la matrice $P_2(x)$ est :

$$J_2(x) = \frac{\partial(P_2(x))}{\partial(x)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 30})$$

Avec :

$$a_1 = \frac{-R_s l_\beta}{D} + \frac{2l_1 l_a w}{D}$$

$$a_2 = \frac{R_s l_{\alpha\beta}}{D} - \frac{2l_1 l_b w}{D}$$

$$a_3 = \frac{\varphi_f (l_0 + l_1) \sin\theta_e}{D} + \frac{2l_1 l_a i_\alpha}{D} - \frac{2l_1 l_b i_\beta}{D}$$

$$a_4 = \frac{\varphi_f (l_0 + l_1) w \cos\theta_e}{D} + \frac{2l_1 u_\alpha - 2R_s l_1 i_\alpha + 4l_1 l_0 w i_\beta}{D} \sin 2\theta_e - \frac{2l_1 u_\beta + 2R_s l_1 i_\beta + 4l_1 l_0 w i_\alpha}{D} \cos 2\theta_e$$

$$b_1 = \frac{R_s l_{\alpha\beta}}{D} - \frac{2l_1 l_b w}{D}$$

$$b_2 = \frac{-R_s l_\alpha}{D} - \frac{2l_1 l_a w}{D}$$

$$b_3 = \frac{-\varphi_f(l_0 + l_1)\cos\theta_e}{D} - \frac{2l_1l_b i_\alpha}{D} - \frac{2l_1l_a i_\beta}{D}$$

$$b_4 = \frac{\varphi_f(l_0 + l_1)w\sin\theta_e}{D} - \frac{2l_1u_\alpha - 2R_s l_1 i_\alpha + 4l_1 l_0 w i_\beta}{D} \cos 2\theta_e$$

$$- \frac{2l_1u_\beta - 2R_s l_1 i_\beta - 4l_1 l_0 w i_\alpha}{D} \sin 2\theta_e$$

Le déterminant D_2 de $J_2(x)$ est:

$$D_2 = a_3 b_4 - a_4 b_3$$

$$D_2 = \frac{2l_1\varphi_f(l_0 + l_1)u_\alpha \sin\theta_e}{D^2} - \frac{2l_1\varphi_f(l_0 + l_1)u_\beta \cos\theta_e}{D^2} - \frac{2R_s l_1\varphi_f(l_0 + l_1)i_\alpha \sin\theta_e}{D^2}$$

$$+ \frac{2R_s l_1\varphi_f(l_0 + l_1)i_\beta \cos\theta_e}{D^2} + \frac{\varphi_f^2 w(l_0 + l_1)^2}{D^2} + \frac{8l_1 l_0 \varphi_f w(l_0 + l_1)i_\beta \sin\theta_e}{D^2}$$

$$+ \frac{8l_1 l_0 \varphi_f w(l_0 + l_1)i_\alpha \cos\theta_e}{D^2} + \frac{4l_1^2 l_0}{D^2} (i_\beta u_\alpha - i_\alpha u_\beta)$$

$$+ \left[\frac{8l_1^2 l_0^2 w - 4R_s l_1^3 \sin 2\theta_e + 8l_1^3 l_0 w \cos 2\theta_e}{D^2} \right] (i_\alpha^2 + i_\beta^2)$$

$$+ \frac{4l_1^3 i_\beta}{D^2} (u_\alpha \cos 2\theta_e + u_\beta \sin 2\theta_e) + \frac{4l_1^3 i_\alpha}{D^2} (u_\alpha \sin 2\theta_e + u_\beta \cos 2\theta_e)$$

$$+ \frac{2l_1^2 \varphi_f w(l_0 + l_1)}{D^2} (i_\alpha \cos\theta_e - i_\beta \sin\theta_e)$$

Dans le cas où la machine est à pôles lisses $l_d = l_q = l_0$ La valeur du déterminant sera :

$$D_2 = \frac{\varphi_f^2 w}{l_0^2}$$

Le système est localement génériquement observable si la vitesse w diffère de zéro, parceque le flux de l'aimant φ_f ainsi que l'inductance l_0 sont toujours constants et également différents de zéro.

IV.7. Conception de l'observateur mode glissant

Cet observateur est basé sur le modèle de la machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse dans un repère fixe exprimé par le système d'équations (IV. 18).

Un observateur mode glissant peut alors être conçu comme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_{\alpha} = \frac{-R_s}{l_s} \hat{i}_{\alpha} + \frac{p\varphi_f \hat{\Omega} \sin \hat{\theta}_e}{l_s} + \frac{1}{l_s} u_{\alpha} + K_1 \text{sign}(\bar{i}_{\alpha}) \\ \dot{\hat{i}}_{\beta} = \frac{-R_s}{l_s} \hat{i}_{\beta} - \frac{p\varphi_f \hat{\Omega} \cos \hat{\theta}_e}{l_s} + \frac{1}{l_s} u_{\beta} + K_1 \text{sign}(\bar{i}_{\beta}) \\ \dot{\hat{\Omega}} = \frac{p\varphi_f}{j} (\hat{i}_{\beta} \cos \hat{\theta}_e - \hat{i}_{\alpha} \sin \hat{\theta}_e) - \frac{f_v}{j} \hat{\Omega} + K_2 \text{sign}(\bar{i}_{\alpha}) + K_2 \text{sign}(\bar{i}_{\beta}) \\ \dot{\hat{\theta}} = \hat{\Omega} \end{cases} \quad (\text{IV. 31})$$

Avec:

$$\bar{i}_{\alpha} = i_{\alpha} - \hat{i}_{\alpha}$$

$$\bar{i}_{\beta} = i_{\beta} - \hat{i}_{\beta}$$

K_1 et K_2 sont les gains de l'observateur.

Les dynamiques des erreurs sont exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\bar{i}}_{\alpha} = \frac{-R_s}{l_s} \bar{i}_{\alpha} + \frac{p\varphi_f (\Omega \sin \theta_e - \hat{\Omega} \sin \hat{\theta}_e)}{l_s} - K_1 \text{sign}(\bar{i}_{\alpha}) \\ \dot{\bar{i}}_{\beta} = \frac{-R_s}{l_s} \bar{i}_{\beta} + \frac{p\varphi_f (-\Omega \cos \theta_e + \hat{\Omega} \cos \hat{\theta}_e)}{l_s} - K_1 \text{sign}(\bar{i}_{\beta}) \\ \dot{\bar{\Omega}} = \frac{p\varphi_f}{j} [(i_{\beta} \cos \theta_e - i_{\alpha} \sin \theta_e) - (\hat{i}_{\beta} \cos \hat{\theta}_e - \hat{i}_{\alpha} \sin \hat{\theta}_e)] - \frac{f_v}{j} \bar{\Omega} - K_2 \text{sign}(\bar{i}_{\alpha}) - K_2 \text{sign}(\bar{i}_{\beta}) \\ \dot{\bar{\theta}} = \Omega - \hat{\Omega} \end{cases} \quad (\text{IV. 32})$$

Avec :

$$\bar{\Omega} = \Omega - \hat{\Omega}$$

$$\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}$$

Pour étudier la convergence en temps fini de notre observateur, on considère la fonction suivante de Lyapunov :

$$V = \frac{1}{2}(\bar{i}_\alpha^2 + \bar{i}_\beta^2 + \bar{\Omega}^2 + \bar{\theta}^2) \quad (\text{IV. 33})$$

Alors :

$$\dot{V} = \bar{i}_\alpha \dot{\bar{i}}_\alpha + \bar{i}_\beta \dot{\bar{i}}_\beta + \bar{\Omega} \dot{\bar{\Omega}} + \bar{\theta} \dot{\bar{\theta}} \quad (\text{IV. 34})$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -A_1 \bar{i}_\alpha^2 + A_2 \bar{i}_\alpha (\Omega \sin \theta_e - \hat{\Omega} \sin \hat{\theta}_e) - K_1 \bar{i}_\alpha \text{sign}(\bar{i}_\alpha) - A_1 \bar{i}_\beta^2 + A_2 \bar{i}_\beta (\Omega \cos \theta_e - \\ & \hat{\Omega} \cos \hat{\theta}_e - K_1 i_\beta \text{sign} i_\beta - A_4 \Omega^2 + A_3 \Omega i_\beta \cos \theta_e - i_\alpha \sin \theta_e - (i_\beta \cos \theta_e - i_\alpha \sin \theta_e) - \Omega K_2 \text{sign} i_\alpha - \\ & \bar{\Omega} K_2 \text{sign}(\bar{i}_\beta) + \bar{\theta} \bar{\Omega} \end{aligned} \quad (\text{IV. 35})$$

Avec :

$$A_1 = \frac{R_s}{l_s}$$

$$A_2 = \frac{p\varphi_f}{l_s}$$

$$A_3 = \frac{p\varphi_f}{J}$$

$$A_4 = \frac{f_v}{J}$$

On considère les conditions initiales suivantes à $t = 0$:

$$|\Omega \sin \theta_e - \hat{\Omega} \sin \hat{\theta}_e| < 2\Omega_{max} \quad (\text{IV. 36})$$

$$|\bar{i}_\alpha| = |\bar{i}_\beta| < 2i_{max} \quad (\text{IV. 37})$$

$$|\bar{i}_\alpha (\Omega \sin \theta_e - \hat{\Omega} \sin \hat{\theta}_e)| < 4i_{max} \Omega_{max} \quad (\text{IV. 38})$$

$$|\bar{i}_\beta (\Omega \cos \theta_e - \hat{\Omega} \cos \hat{\theta}_e)| < 4i_{max} \Omega_{max} \quad (\text{IV. 39})$$

$$|\bar{\Omega} [(i_\beta \cos \theta_e - i_\alpha \sin \theta_e) - (\hat{i}_\beta \cos \hat{\theta}_e - \hat{i}_\alpha \sin \hat{\theta}_e)]| < 8i_{max} \Omega_{max} \quad (\text{IV. 40})$$

$$|\bar{\theta}\bar{\Omega}| < 4\theta_{max}\Omega_{max} \quad (IV. 41)$$

Pour :

$$-A_1\bar{i}_\alpha^2 < 0 \quad (IV. 42)$$

$$-A_1\bar{i}_\beta^2 < 0 \quad (IV. 43)$$

$$-A_4\bar{\Omega}^2 < 0 \quad (IV. 44)$$

Les gains de l'observateur qui assurent la convergence de l'observateur pour $t > 0$ sont donnés par :

$$K_1 > 4a_2\Omega_{max} \quad (IV. 45)$$

$$K_2 > 2a_3i_{max} + \frac{\theta_{max}}{2} \quad (IV. 46)$$

IV.8. Résultats de simulation

Pour la validation de cet observateur en simulation, des testes sont été réalisés sous Matlab/Simulink à partir du schéma bloc de la figure IV. 5 :

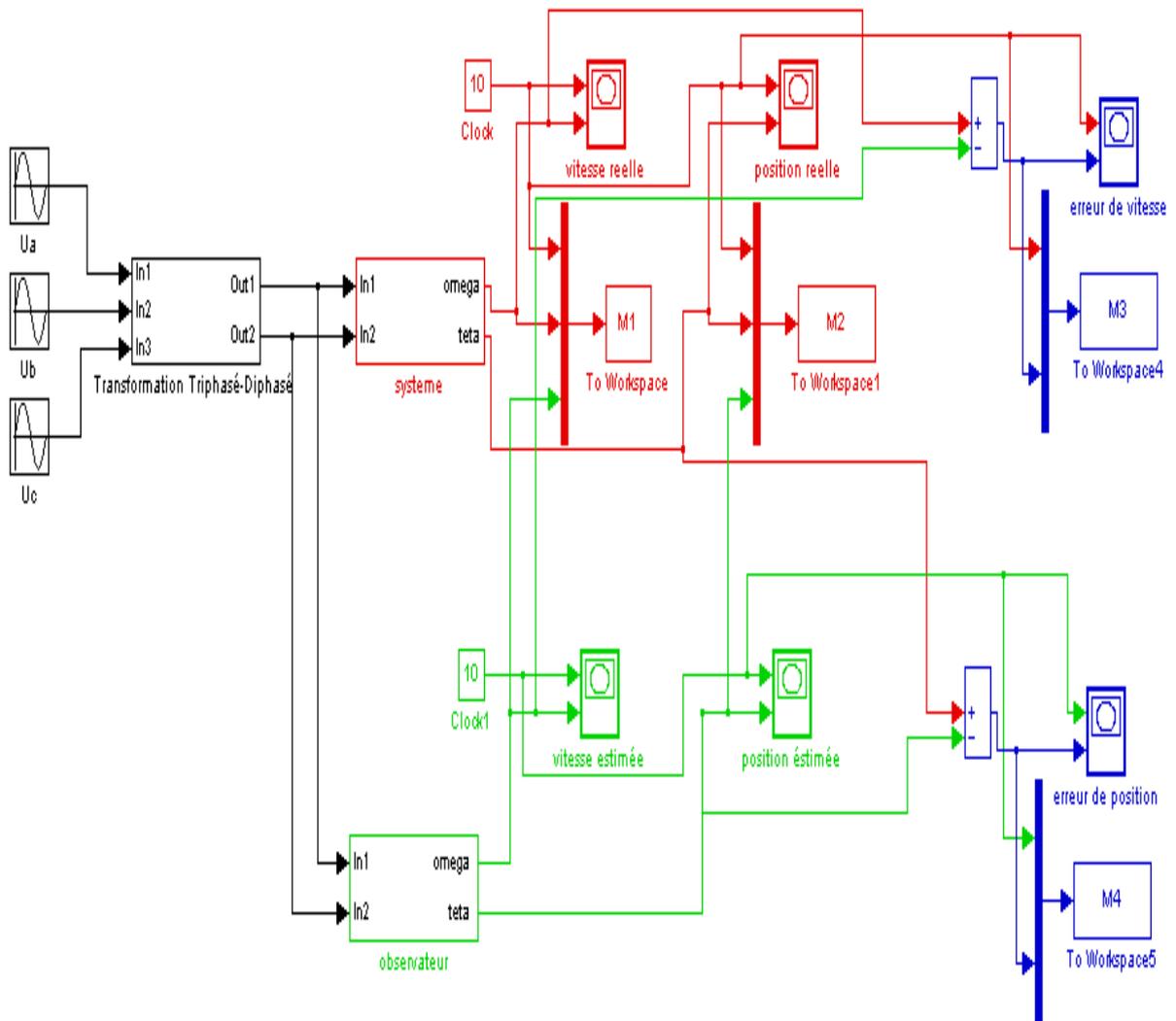


Figure IV. 5. Schéma bloc de la simulation

Les paramètres nominaux de la machine étudiée et utilisés dans la simulation sont [16]:

Vitesse nominale=1000 tr par min

Flux nominal (φ_f) =0.1564wb

Resistance statorique (R_s) =0.45 Ω

Inductance statorique (l_s)=6mH

Moment d'inertie =0.00176 kg.m²

Conception d'observateur non linéaire mode glissant pour la machine synchrone à aimants permanents

Coefficient du frottement visqueux (f_v)= 0.0003881Nm/s

Nombre de paires de pôles (p)=3.

Les résultats de simulation sont mentionnés dans les figures IV. 6, IV. 7, IV. 8, IV. 9 :

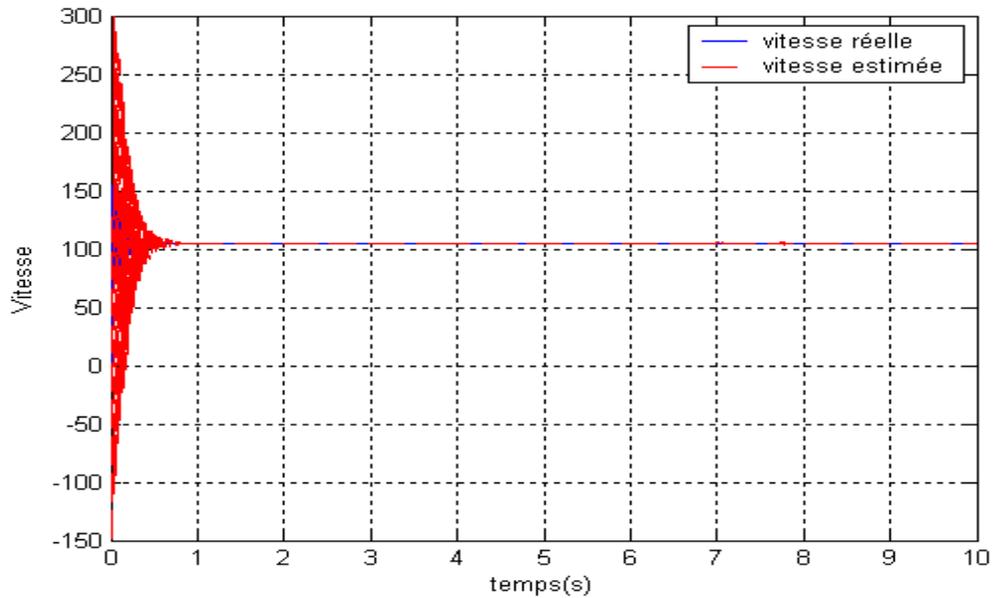


Figure IV. 6. La vitesse mesurée et estimée

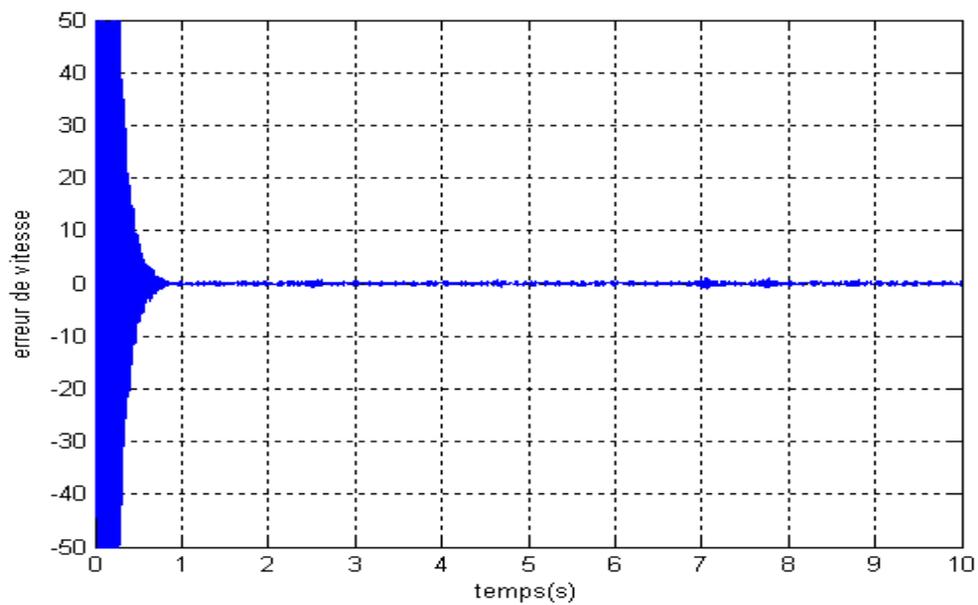


Figure IV. 7. Erreur de vitesse

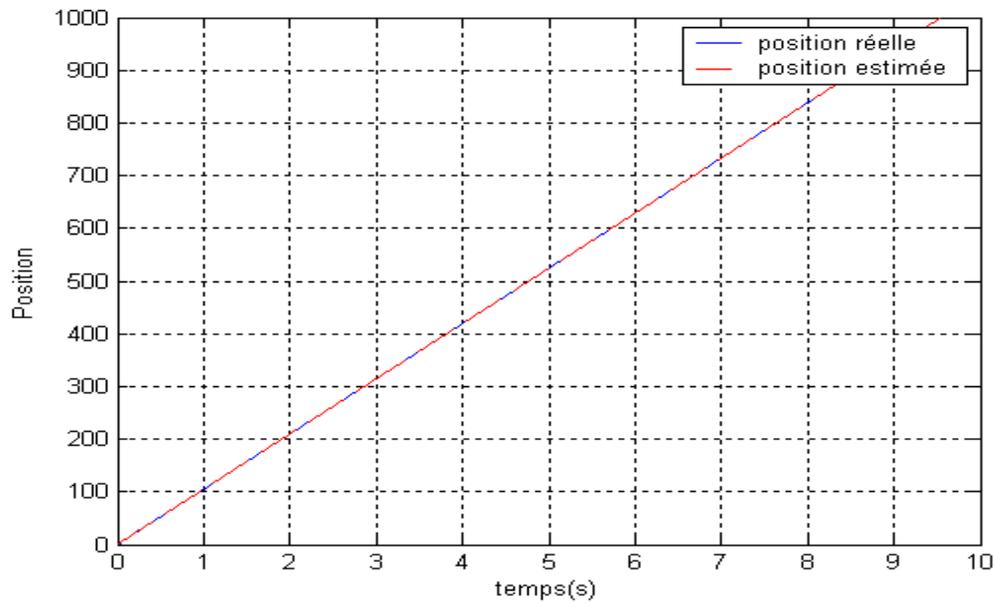


Figure IV. 8. La position mesurée et estimée

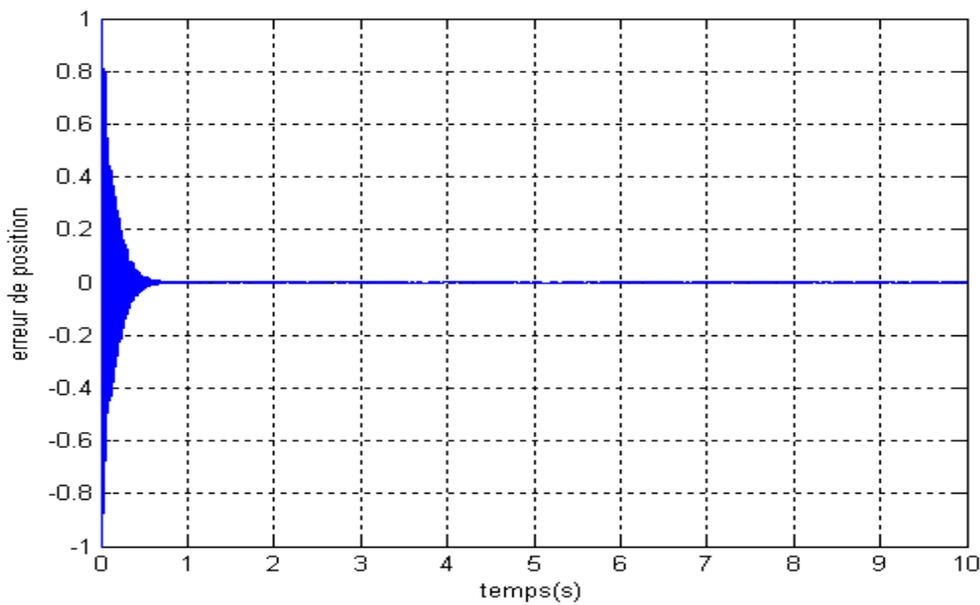


Figure IV. 9. Erreur de position

La figure IV. 6 montre la vitesse mesurée et la vitesse observée à travers un observateur mode glissant obtenu à partir du modèle d'état non linéaire de la machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse dans le repère fixe $(\alpha - \beta)$.

La figure IV. 7 montre clairement l'erreur d'observation de la vitesse de la machine, et nous informe sur le temps de convergence de l'observateur $t < 1s$.

La figure IV. 8 montre la position mesurée et la position observée à travers l'observateur mode glissant proposé.

La figure IV. 9 montre clairement l'erreur d'observation de la position de la machine avec un temps de convergence égale à 0.5s.

Les résultats de la simulation obtenus montrent clairement l'efficacité et la robustesse de l'observateur mode glissant appliqué à la machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse pour estimer sa vitesse et sa position.

IV.9. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a étudié en détail la modélisation et l'observabilité de la machine synchrone à aimants permanents, ensuite on est passé à la conception d'un observateur mode glissant utilisé pour estimer la vitesse de rotation ainsi que la position de cette machine.

Les résultats de la simulation qu'on a obtenu prouvent la convergence en un temps fini, l'efficacité et la robustesse de ce type d'observateur.

Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire nous avons abordé le problème d'estimation d'état des systèmes physiques généralement non linéaires par l'utilisation des observateurs qui sont considérés comme des capteurs informatiques.

Les systèmes non linéaires ont des représentations d'état très variées qui exploitent la structure et les propriétés de la fonction non linéaire qui intervient dans le modèle du système. Il semble donc difficile à priori, de trouver une théorie générale sur l'estimation d'état non linéaire, qui unifierait les approches déjà établies.

La technique d'observation basée sur les modes glissants permet la synthèse d'observateurs pour de nombreuses classes de systèmes non linéaires tel que les systèmes à forme triangulaire et même, sous certaines conditions, les systèmes à fortes non linéarités.

Ceci est bien illustré dans les deux applications proposées dans le troisième et le quatrième chapitre de ce mémoire concernant la conception d'un observateur non linéaire mode glissant pour un système triangulaire de pompage et la machine synchrone à aimants permanents fortement non linéaire.

Les résultats de la simulation sous Matlab/Simulink des deux systèmes non linéaires proposés dans ce travail montrent clairement la convergence en un temps fini, l'efficacité et la robustesse de ce type d'observateur.

Les perspectives que nous pouvons lancer au terme de ce travail, se résument en deux points essentiels :

-Développer les méthodes proposées dans ce mémoire pour résoudre les problèmes d'estimation d'état lorsqu'il s'agit des systèmes physiques hybrides.

-Utilisation des observateurs mode glissant d'ordres supérieurs pour avoir des résultats meilleurs et résoudre surtout le problème de chattering.

Bibliographie

- [1] Mohammed Chakib Sosse Alaoui, "Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur, " thèse de doctorat. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah. Maroc. 2009.
- [2] Jean-Pierre Barbot, "Observateur pour le diagnostic, " ECS-EA-3649-ENSEA.
- [3] J.J.E. Slotine, J.K. Hedrick, and E.A. Misawa, "Nonlinear state estimation using sliding observers, " 25th IEEE Conf. pages 332.339. Greece.1986.
- [4] Tian Yang, "Une contribution à l'observation et à l'estimation des systèmes linéaires, " thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille. 2010.
- [5] Frédéric Rotella, "Observation, " Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes.
- [6] Malek GHANES, "Observation et commande de la machine Asynchrone sans capteur mécanique, " thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes. 2005.
- [7] DG. Luenberger, "An introduction to observers, " IEEE Trans. automatic control.1971.
- [8] NAIT SLIMANI Boukhalifa, "Synthèse d'observateurs : application au diagnostic de défauts, " mémoire de magister. Université de Tizi ouzou.
- [9] R.E. KALMAN, "A new approach to linear filtering, " Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering. Vol 82. pp 35-45. 1960.
- [10] A.J.Fossad and D. Normand-Cyrot, "Non linear systems, " Masson. Paris. 1993.

- [11] Marwa Mohamed Moustafa EZZAT, "Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents, " thèse de doctorat. Université de Nantes. 2011.
- [12] W. Perruquetti, J.P. Barbot, "Sliding Mode Control in Engineering," Marcel Dekker.2002.
- [13] H. Sira-Ramirez, "On the sliding mode control of nonlinear systems, " Syst & Cont. Lett 19. 303. 312. 1992.
- [14] Sébastien Solvar, "Observateur à mode glissant d'ordre 2 appliqué à la MAS sans capteur mécanique, " réunion GDR CE2, E.N.S.A.M. 2010.
- [15] BOUCHAREB Hanane, "Sliding mode observer for a system of pumping, " CIAM'11.Oran.2011.
- [16] LAHOUEL Dalila, "Commande non linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents, " mémoire de magister. Université de Batna. 2009.
- [17] Romain DELPOUX, "Contribution à l'identification, l'estimation et la commande de moteur synchrone à aimants permanents, " thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille. 2012.
- [18] Babak NAHID MOBARAKEH, "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants, " thèse de doctorat. Université de Téhéran. Iran. 2001.
- [19] Marwa Mohamed Moustafa EZZAT, "Comparaison de deux observateurs non linéaires pour la commande sans capteur de la MSAP : validation expérimentale, "Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes. 2010.
- [20] Isidori, "Nonlinear control system, " Springer Verlag. Berlin. third edition. 1995.
- [21] Abdelkader AKHENAK, "Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodèle : application au diagnostic, " thèse de doctorat. Institut National polytechnique de lorraine. 2004.

- [22] Benoît LARROQUE, "Observateurs de systèmes linéaires: application à la détection et localisation de fautes, " thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2008.
- [23] Jean-Pierre Barbot, "Sliding mode observer for triangular input form, " the 35th conference en decision and control. Japan. 1996.
- [24] H.Chekireb, "On a Class of Manifolds for Sliding Mode Control and Observation of Induction Motor, " International Journal of Systems Science. 2008.
- [25] P.Borne, G.Dauphin.Tanguy, J.P.Richard, F.Rotella, I.Zambettakis, " Modélisation et identification des processus tome 1, " Editions TECHNIP. 1992.
- [26] P.Borne, G.Dauphin.Tanguy, J.P.Richard, F.Rotella, I.Zambettakis, " Modélisation et identification des processus tome 2, " Editions TECHNIP. 1992.
- [27] Yves Granjon, " Systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état, cours et exercices corrigés, " DUNOD. 2001.
- [28] Pascal Cordon, Sandrine le Ballois, " Systèmes linéaires et continus, cours et exercices résolus, " DUNOD. 1998.
- [29] Rosario Toscano, "Commande et diagnostic des systèmes dynamiques, " Ellipses. 1998.
- [30] M. Sebba, A.Chaker, "Commande en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'état de Luenberger, "4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing . 2007.
- [31] Amar SI Ammour, "Contribution à la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire, " thèse de doctorat. Université de Tizi ousou. 2011.
- [32] R.LATEB, "Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps, " thèse de doctorat. Institut National polytechnique de Lorraine. 2006.

- [33] Ahmed RédhaMEGHNOUS, "Identification non linéaire des paramètres électriques et mécaniques d'une machine synchrone à aimants permanents, " Journée du groupe Inter GDR MACS-SEEDS CSE Commande des Systèmes Electriques. Paris.2011.
- [34] Vincent BREGEAULT, " Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants, " thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes.2010.
- [35] H.SEDIKI, "Contribution à la synthèse d'observateurs des systèmes non linéaires," thèse de doctorat. Université de Tizi ouzou.2010.
- [36] M. Djemai, T. Boukhobza, " Rotor Speed and Flux Nonlinear Observer for Speed Sensorless Induction Motors, " International Conference on Control Applications. Italy. 1998.
- [37] Boussekra Faiza, " La commande non linéaire à régime glissant de la MSAP, " mémoire de magister. Université de M'sila. 2011.
- [38] Mohamed Assaad Hamida, Marwa Ezzat, " Commande par Backstepping avec action intégrale pour la MSAP, " Conférence Internationale Francophone d'Automatique. France. 2012.

المستشعرات يمكن أن تكون باهضة الثمن، و إدماجها جد صعب في بعض التجهيزات الصناعية. المقادير غير المقاسة و المقدرة بواسطة المراقبين تسمح بتخفيض كلفة الإنتاج عن طريق تجنب وضع المستشعرات. في الحالة الخطية، المراقبة تتم بطريقة كلاسيكية عن طريق شرط الرتبة و المراقبون لهذا النوع من الأنظمة يكونون بصفة عامة من نوع ليونيرغر، لكن في الحالة غير الخطية المراقبة تتم بطرق متعددة غير أن الفكر الكلاسيكي يؤدي إلى شرط الرتبة مع تعديلات صغيرة. من بين المشاكل المواجهة في دراسة مراقبة الأنظمة غير الخطية هي: المراقبة متعلقة بالمدخل، وفردية المراقبة. إن استعمال مراقب نمط زالق غير خطي في هذا التقرير من أجل إعادة بناء حالة نظام الضخ وتقدير سرعة و وضع الجهاز المتزامن بمغانط دائمة أثبت فعالية و متانة هذا النوع من المراقبين المستعمل في الحالة غير الخطية.

الكلمات المفتاحية: نظام غير خطي، مراقبة، مراقب غير خطي نمط زالق، نظام ضخ، جهاز متزامن بمغانط دائمة.

Résumé

Les capteurs peuvent être très chers et leur intégration très complexe dans certains procédés industriels. Les grandeurs non mesurées estimées à l'aide d'observateurs vont nous permettre de réduire le prix de production en nous évitant de placer des capteurs. Dans le cas linéaire l'observabilité se détermine classiquement par une condition de rang et les observateurs pour de tels systèmes sont généralement de type Luenberger, par contre dans le cas non linéaire, l'observabilité se détermine de multiple façons mais la pensée classique conduit à une condition de rang avec de petits arrangements. Parmi les problèmes rencontrés dans l'étude de l'observabilité des systèmes non linéaires sont : l'observabilité fonction de l'entrée, et la singularité d'observabilité. L'utilisation d'un observateur mode glissant non linéaire dans ce mémoire pour la reconstruction d'état d'un système de pompage et l'estimation de la vitesse et la position de la machine synchrone à aimants permanents a prouvé l'efficacité et la robustesse de ce type d'observateur utilisé dans le cas non linéaire.

Mots clés : système non linéaire, observabilité, observateur non linéaire mode glissant, système de pompage, machine synchrone à aimants permanents.

Abstract

The sensors can be very expensive and their integration very complex in certain industrial processes. The greatnesses not measured estimated by means of observers are going to allow us to reduce the production cost by avoiding us placing sensors. In the linear case the observability is classically determined by a condition of rank and the observers for such systems are generally of type Luenberger, on the other hand in the not linear case, the observability is determined of multiple manners but the classic thought drives to a condition of rank with small arrangements. Among the problems met in the study of the observability of the not linear systems are: the observability function of the input, and the singularity of observability. The use of a sliding mode not linear observer in this report for the reconstruction of state of a system of pumping and the estimation of the speed and the position of the synchronous machine with permanent magnets proved the efficiency and the robustness of this type of observer used in the not linear case.

Key words: not linear system, observability, sliding mode not linear observer, system of pumping, synchronous machine with permanent magnets.